Software & Systems
2022, vol. 35, no. 3

Print ISSN 0236-235X
Online ISSN 2311-2735

Программные продукты и системы

DOI 10.15827/0236-235X

/ Частичная параллелизация для триангуляции двумерных областей

/ Применение технологии CUDA для обучения нейронной сети Кохонена

/ Разработка автоматизированной системы анализа ключевых терминов

№ 3

том 35
2022

Уважаемые читатели, коллеги!

Журнал продолжает знакомить вас с работами ученых и специалистов в области развития программных систем и их применения.

В рамках программы «Приоритет-2030» в марте 2022 года в Казанском федеральном университете открылись научно-исследовательские лаборатории «Высокопроизводительные вычисления, медицинская кибернетика и машинное зрение» и «Разработка интеллектуальных инструментов для компьютерных игр». Часть материалов данного номера журнала отражает результаты исследований лабораторий по следующим направлениям: параллельные вычисления, математическое моделирование, технологии виртуальной реальности. Разработки находят свое применение во многих отраслях, в частности, в региональных клиниках.

В этом выпуске также опубликованы статьи, подготовленные в рамках научного семинара «Золотовские чтения», посвященного 100-летию со дня рождения академика РАН Евгения Васильевича Золотова, основателя научной школы по системным исследованиям и межвузовской научно-исследовательской лаборатории с мощным вычислительным центром (авторы статей: Калабин А.Л., Морозов А.К.; Мешков В.В., Федосов Ю.А.; Коробейников А.Г.).

Внимание читателей привлекут работы Мешалкина В.П., Бутусова О.Б., Кантюкова Р.Р., Чистяковой Т.Б.; Кириллова Н.Д., Кольцовой Э.М.; Глушкова И.В., Авериной Ю.М., приуроченные к 90-летию со дня рождения Павла Джибраеловича Саркисова – первого президента РХТУ им. Д.И. Менделеева, академика РАН, известного ученого в области науки и технологии стекла и силикатных материалов.

Кроме того, в номере опубликованы материалы, отражающие направления развития искусственного интеллекта, автоматизации проектирования, методов тестирования программ и многие другие аспекты.

С наилучшими пожеланиями,
научный редактор номера профессор А.М. Елизаров

Dear readers, colleagues!

The journal continues presenting the works of scientists and specialists in the field of software systems development and their application.

In March 2022, within the framework of the Priority 2030 program, the Kazan Federal (Volga region) University opened the research laboratories called “High-Performance Computing, Medical Cybernetics and Machine Vision” and “Development of Intelligent Tools for Computer Games”. Some articles in this journal issue reflects the results of laboratory research in the following areas: parallel computing, mathematical modeling, virtual reality technologies. Promising developments find their application in many industries, in regional clinics in particular.

This issue also contains articles prepared as a part of the Zolotov Readings scientific seminar that was dedicated to the 100th anniversary of the birth of the academician of the Russian Academy of Sciences Evgeny Vasilyevich Zolotov, who was a founder of the scientific school for system research and interuniversity research laboratory with a powerful computing center (the authors of the articles are: Kalabin A.L., Morozov A.K.; Meshkov V.V., Fedosov Yu.A.; Korobeynikov A.G.).

The works of Meshalkin V.P., Butusov O.B., Kantyukov R.R., Chistyakova T.B.; Kirillov N.D., Koltsova E.M.; Glushkov I.V., Averina Yu.M. might be also interesting for readers. These papers coincide with P.D. Sarkisov's 90th birth anniversary. P.D. Sarkisov was an Academician of the Russian Academy of Sciences, the first President of the Mendeleev University of Chemical Technology, a well-known scientist in the field of science and technology of glass and silicate materials.

In addition, the issue contains materials reflecting the development of artificial intelligence, design automation, software testing methods and many other aspects.

Best wishes,
Science editor of the issue Professor A. Elizarov

Научно-исследовательский институт
«Центрпрограммсистем»

Программные продукты и системы

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2022, том 35, № 3
(год издания тридцать пятый)

Главный редактор
Г.И. САВИН, академик РАН

SOFTWARE & SYSTEMS

International research journal

2022, vol. 35, no. 3

Editor-in-Chief
G.I. SAVIN, Academician of the Russian Academy of Sciences

Research Institute CENTERPROGRAMSYSTEM

© ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ И СИСТЕМЫ
Международный научный журнал

2022. Т. 35. № 3
DOI: 10.15827/0236-235X.139

Издатель НИИ «Центрпрограммсистем»
(г. Тверь, Россия)

Учредитель В.П. Куприянов

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 3 марта 2020 г.
Регистрационное свидетельство ПИ № ФС 77-77843

Подписные индексы в каталогах
Почты России **ПП879**
Урал-Пресс **70799**

ISSN 0236-235X (печатн.)
ISSN 2311-2735 (онлайн)

Главный редактор

Г.И. САВИН, академик РАН

Научные редакторы номера:

А.М. ЕЛИЗАРОВ, д.ф.-м.н., профессор

Н.А. СЕМЕНОВ, д.т.н., профессор

В.П. МЕШАЛКИН, академик РАН

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семенов Н.А. – заместитель главного редактора, д.т.н., профессор Тверского государственного технического университета (г. Тверь, Россия)
Сотников А.Н. – заместитель главного редактора, д.ф.-м.н., профессор, заместитель директора Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (г. Москва, Россия)
Афанасьев А.П. – д.ф.-м.н., профессор Московского физико-технического института (технического университета), заведующий Центром распределенных вычислений Института проблем передачи информации РАН (г. Москва, Россия)
Баламетов А.Б. – д.т.н., профессор Азербайджанского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института энергетики (г. Баку, Азербайджан)
Батыршин И.З. – д.т.н., профессор Мексиканского института нефти (г. Мехико, Мексика)
Борисов В.В. – д.т.н., профессор филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске (г. Смоленск, Россия)
Голенков В.В. – д.т.н., профессор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)
Елизаров А.М. – д.ф.-м.н., профессор Института математики и механики им. Н.И. Лобачевского Казанского федерального университета (г. Казань, Россия)
Еремеев А.П. – д.т.н., профессор Национального исследовательского университета «МЭИ» (г. Москва, Россия)
Кузнецов О.П. – д.т.н., профессор Института проблем управления РАН (г. Москва, Россия)
Курейчик В.М. – д.т.н., профессор Инженерно-технологической академии Южного федерального университета (г. Таганрог, Россия)
Лисецкий Ю.М. – д.т.н., генеральный директор «S&T Ukraine» (г. Киев, Украина)
Мамросенко К.А. – к.т.н., доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), руководитель Центра визуализации и спутниковых информационных технологий НИИСИ РАН (г. Москва, Россия)
Мейер Б. – доктор наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей политехнической школы – ETH (г. Цюрих, Швейцария)
Палюх Б.В. – д.т.н., профессор Тверского государственного технического университета (г. Тверь, Россия)
Серов В.С. – д.ф.-м.н., профессор Университета прикладных наук Оулу (г. Оулу, Финляндия)
Сулейманов Д.Ш. – академик АН Республики Татарстан, д.т.н., профессор Казанского государственного технического университета (г. Казань, Республика Татарстан, Россия)
Татарникова Т.М. – д.т.н., доцент, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (г. Санкт-Петербург, Россия)
Ульянов С.В. – д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Россия)
Хорошевский В.Ф. – д.т.н., профессор Московского физико-технического института (технического университета) (г. Москва, Россия)
Шабанов Б.М. – д.т.н., чл.-корр. РАН, директор Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (г. Москва, Россия)
Язенин А.В. – д.ф.-м.н., профессор Тверского государственного университета (г. Тверь, Россия)

АССОЦИИРОВАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИИ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
Технологический институт Южного федерального университета, г. Таганрог, Россия
Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ И РЕДАКЦИИ
Россия, 170024,
г. Тверь, просп. Николая Корыткова, д. 3а
Телефон (482-2) 39-91-49
Факс (482-2) 39-91-00
E-mail: red@cps.tver.ru
Сайт: www.swsys.ru

Дата выхода в свет 16.09.2022 г.
Отпечатано ИПП «Фактор и К»
Россия, 170100, г. Тверь, ул. Крылова, д. 26
Выпускается один раз в квартал
Год издания тридцать пятый
Формат 60×84 1/8. Объем 248 стр.
Заказ № 15. Тираж 1000 экз. Цена 550,00 руб.

© SOFTWARE & SYSTEMS
International research journal

2022, vol. 35, no. 3
DOI: 10.15827/0236-235X.139

Editor-in-chief

G.I. SAVIN, Academician of RAS

Science editors of the issue:

A.M. Elizarov, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
N.A. Semenov, Dr.Sc. (Engineering), Professor
V.P. Meshalkin, Academician of RAS

Publisher Research Institute
CENTERPROGRAMSYSTEM (Tver, Russian Federation)

Founder V.P. Kupriyanov

The journal is registered with the Federal Service
for Supervision of Communications, Information Technology
and Mass Communications (Roskomnadzor)
March 3rd, 2020

Registration certificate ПИ № ФС 77-77843
ISSN 0236-235X (print)
ISSN 2311-2735 (online)

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Semenov N.A. – Deputy Editor-in-Chief, Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Tver State Technical University (Tver, Russian Federation)
Sotnikov A.N. – Deputy Editor-in-Chief, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Deputy Director of the Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)
Afanasiev A.P. – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Moscow Institute of Physics and Technology, Head of Centre for Distributed Computing of Institute for Information Transmission Problems (Moscow, Russian Federation)
Balametov A.B. – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Azerbaijan Scientific-Research & Design-Prospecting Power Engineering Institute (Baku, Azerbaijan)
Batyrshin I.Z. – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Mexican Petroleum Institute (Mexico City, Mexico)
Borisov V.V. – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the MPEI Branch in Smolensk (Smolensk, Russian Federation)
Golenkov V.V. – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)
Elizarov A.M. – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the N.I. Lobachevsky Institute of Mathematics and Mechanics of the Kazan Federal University (Kazan, Russian Federation)
Eremeev A.P. – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (Moscow, Russian Federation)
Kuznetsov O.P. – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)
Kureichik V.M. – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Academy of Engineering and Technology of the Southern Federal University (Taganrog, Russian Federation)
Lisetsky Yu.M. – Dr.Sc. (Engineering), CEO of "S&T Ukraine" (Kiev, Ukraine)
Mamrosenko K.A. – Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Moscow Aviation Institute (National Research University), Head of the Center of Visualization and Satellite Information Technologies SRISA RAS (Moscow, Russian Federation)
Meyer B. – Dr.Sc., Professor, Head of Department in the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich, ETH (Zurich, Switzerland)
Palyukh B.V. – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Tver State Technical University (Tver, Russian Federation)
Serov V.S. – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Oulu University of Applied Sciences (Oulu, Finland)
Suleimanov D.Sh. – Academician of TAS, Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Kazan State Technical University (Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation)
Tatarnikova T.M. – Dr.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" (St. Petersburg, Russian Federation)
Ulyanov S.V. – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Dubna International University for Nature, Society and Man (Dubna, Russian Federation)
Khoroshevsky V.F. – Dr.Sc. (Engineering), Professor of the Moscow Institute of Physics and Technology (Moscow, Russian Federation)
Shabanov B.M. – Dr.Sc. (Engineering), Corresponding Member of the RAS, Director of the Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)
Yazenin A.V. – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Tver State University (Tver, Russian Federation)

ASSOCIATED EDITORIAL BOARD MEMBERS

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation
Technology Institute at Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation
Tver State Technical University, Tver, Russian Federation

EDITORIAL BOARD AND PUBLISHER OFFICE ADDRESS
Nikolay Korytkov Ave. 3a, Tver, 170024, Russian Federation
Phone: (482-2) 39-91-49 **Fax:** (482-2) 39-91-00
E-mail: red@cps.tver.ru
Website: www.swsys.ru

Release date 16.09.2022
Printed in printing-office "Faktor i K"
Krylova St. 26, Tver, 170100, Russian Federation
Published quarterly. 35th year of publication
Format 60×84 1/8. Circulation 1000 copies
Prod. order № 15. Wordage 248 pages. Price 550,00 rub.

Вниманию авторов

Международный журнал «Программные продукты и системы» публикует материалы научного и научно-практического характера по новым информационным технологиям, результаты академических и отраслевых исследований в области использования средств вычислительной техники. Практикуются выпуски тематических номеров по искусственному интеллекту, системам автоматизированного проектирования, по технологиям разработки программных средств и системам защиты, а также специализированные выпуски, посвященные научным исследованиям и разработкам отдельных вузов, НИИ, научных организаций.

Решением Президиума ВАК Минобрнауки РФ международный журнал «Программные продукты и системы» внесен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Информация об опубликованных статьях по установленной форме регулярно предоставляется в систему РИНЦ, в CrossRef и в другие базы и электронные библиотеки.

Журнал «Программные продукты и системы» включен в ядро коллекции РИНЦ, размещенное на платформе Web of Science в виде базы данных RSCI.

Автор статьи отвечает за подбор, оригинальность и точность приводимого фактического материала. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Статьи публикуются бесплатно.

Условия публикации

К рассмотрению принимаются оригинальные материалы, отвечающие редакционным требованиям и соответствующие тематике журнала. Группа научных специальностей:

1.2. Компьютерные науки и информатика

1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение (физико-математические науки).

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки, технические науки)

2.3. Информационные технологии и телекоммуникации

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки, физико-математические науки).

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки, физико-математические науки).

2.3.6. Методы и системы защиты информации (технические науки, физико-математические науки).

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация (технические науки, физико-математические науки).

2.3.8. Информатика и информационные процессы (технические науки).

Работа представляется в электронном виде в формате Word. Объем статьи вместе с иллюстрациями – не менее 10 000 знаков. Диаграммы, схемы, графики должны быть доступными для редактирования (Word, Visio, Excel). Заголовок должен быть информативным; сокращения, а также терминологию узкой тематики желательно в нем не использовать. Количество авторов на одну статью – не более 4, количество статей одного автора в номере, включая соавторство, – не более 2. Список литературы, наличие которого обязательно, должен включать не менее 10 пунктов.

Необходимы также содержательная структурированная аннотация (не менее 250 слов), ключевые слова (7–10) и индекс УДК. Название статьи, аннотация и ключевые слова должны быть переведены на английский язык (машинный перевод недопустим), а фамилии авторов, названия и юридические адреса организаций (если нет официального перевода) – транслитерированы по стандарту BGN/PCGN.

Вместе со статьей следует прислать экспертное заключение, лицензионное соглашение, а также сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, название и юридический адрес организации, структурное подразделение, должность, ученые степень и звание (если есть), контактный телефон, электронный адрес.

Порядок рецензирования

Все статьи, поступающие в редакцию (соответствующие тематике и оформленные согласно требованиям к публикации), подлежат двойному слепому рецензированию в течение месяца с момента поступления, рецензия отправляется авторам.

В редакции сформирован устоявшийся коллектив рецензентов, среди которых члены международной редколлегии журнала, эксперты из числа крупных специалистов в области информатики и вычислительной техники ведущих вузов страны, а также ученые и специалисты НИИСИ РАН, МСЦ РАН (г. Москва) и НИИ «Центрпрограммсистем» (г. Тверь).

Редакция международного журнала «Программные продукты и системы» в своей работе руководствуется сводом правил Кодекса этики научных публикаций, разработанным и утвержденным Комитетом по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics – COPE).

УДК 004.946
DOI: 10.15827/0236-235X.139.285-292
Дата подачи статьи: 01.08.22, после доработки: 05.08.22
2022. Т. 35. № 3. С. 285–292

Тренажер для реабилитации пациентов с проблемами мобильности руки, построенный с использованием технологий виртуальной реальности

Ф.Р. Аглямов [1], *магистр, aglyamov.fox@gmail.com*
В.С. Кугураков [2], *к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник, vladimir.kugurakov@kpfu.ru*

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*
[2] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, SIM – лаборатория симуляционных технологий в биомедицине, г. Казань, 420008, Россия*

Рука – одна из самых важных частей человеческого тела, травмы которой серьезно влияют даже на обычную деятельность. Поэтому восстановление функций и подвижности руки является одной из самых сложных проблем, решение которой необходимо для обеспечения нормальной повседневной жизни человека.

Предметом настоящего исследования является аппаратно-программный тренажерный комплекс для реабилитации пациентов с нарушениями подвижности руки, построенный с использованием технологии виртуальной реальности. Актуальность этой темы обусловлена высоким уровнем заинтересованности и мотивированности пациента, что потенциально может повысить интерес и эффективность реабилитационных процедур.

Проанализированы современные методы моделирования движения, а также оценены возможности применения технологии виртуальной реальности для реабилитации и отслеживания изменения двигательных функций пациентов с проблемами когнитивного характера.

Результатами проведенного исследования стали прототип перчатки и программное обеспечение для сбора информации о степени сгиба пальцев, а также комплекс упражнений для пациента и записи прогресса реабилитации для дальнейшего анализа. Представлен возможный вариант архитектуры интеграции считывающей перчатки с современными VR-системами. Названные результаты практически использованы в экспериментальном методе реабилитации, апробированном в медицинской практике. Приведены дальнейшие планы развития этого метода и расширения его функционала.

Ключевые слова: *виртуальная реальность, VR, реабилитация кисти, перчатка, серьезные игры, экзергейминг, целенаправленная терапия, инсульт.*

Подвижность кистей и пальцев рук является одним из наиболее важных условий нормальной повседневной жизни человека. В настоящей работе описана разработанная программная система, которая потенциально может помочь в решении возникших у человека проблем с движением конечностей. Полученные результаты в той или иной степени могут быть применены при реабилитации пациентов с тяжелейшими заболеваниями: инсульт, апраксия, болезнь Паркинсона, рассеянный склероз, ожоги [1–5].

В 2016 году глобальный пожизненный риск инсульта для людей в возрасте 25 лет и старше составил примерно 25 % как для мужчин, так и для женщин [6]. Полностью восстанавливаются после инсульта меньше 3 % пациентов. В десятке приоритетов людей, переживших инсульт, на первом месте стоит необходимость реабилитации рук [7]. Дефицит подвижности конечностей возникает у 85 % людей, переживших инсульт, и оказывает значительное влияние на их обычную деятельность [8].

Постановка проблемы

Для выздоровления крайне необходимы регулярные тренировки. Поэтому очень важно сформировать у пациента мотивацию к выполнению ежедневных рутинных задач. С помощью геймификации можно значительно повысить вовлеченность пациента в процесс реабилитации.

Виртуальная реальность (ВР) позволяет обучать как медицинским упражнениям, так и действиям, имитирующим реальную жизнь. Все это можно сделать, не прибегая к поиску дополнительных предметов и инструментов, а также легко научить или напомнить о необходимых действиях во время тренировки. Важ-

ным преимуществом является возможность автоматически фиксировать прогресс в реабилитации пациента и отображать его в наглядной форме в любое время.

Кроме того, ВР может быть механизмом отвлечения, который потребляет когнитивные и аттенционные ресурсы, а также снижает психологический стресс, тем самым ограничивая процессы боли и действуя как нефармакологический анальгетик [9].

Рандомизированное перекрестное исследование показало [10], что при использовании виртуальной реальности время размышлений о боли сокращается на 56 % по сравнению с другими средствами самостоятельного отвлечения (например, медитацией, смартфоном).

Близкие исследования

В работе [3] предложена реабилитационная система с мягкими перчатками для пациентов с параличом рук после инсульта. Разработана пара перчаток: одна – для фиксации жестов на непораженной руке, другая с микродвигателями – для пораженной руки. Основная часть системы предназначена для идентификации конкретных жестов и основана на машинном обучении. Жесты отображаются на мониторе, поэтому пользователь может посмотреть, как данные передаются от перчатки к системе, и убедиться в их правильности.

Авторы [11] представили тест Box and Blocks Test (BBT) с использованием ВР для пациентов с болезнью Паркинсона. Для захвата руки использован контроллер Leap Motion Controller (LMC), проведены также оценка и сравнение физических и ВР-тестов. В результате эта система может стать надежным инструментом для оценки двигательной функции рук в более дружественной и стимулирующей среде.

В [12] проанализированы и описаны современное моделирование и анимация рук: анатомия кистей и пальцев рук, а также различные методы захвата движениями рук и их перевода в виртуальную среду или анимации без захвата.

В [13] предложена система захвата взаимодействия. Основными моментами являются управление двигателем, движение пальцев и реализм взаимодействия. Авторы описывают свою систему как простую, но гибкую и устойчивую к неизвестным объектам в реальном времени.

Автор статьи [14] предположила, что иммерсивная ВР может помочь в случае пространственного познания и использоваться для достоверной оценки производительности пространственной памяти. Разработаны два задания: первое – запоминание расположения объектов, второе –- переход через оживленную улицу.

Разработанная система

Структура системы. Детали перчатки подключаются к микроконтроллеру Arduino, который соединяется с *персональным компьютером* (ПК) через USB-кабель. Также к ПК подключаются шлем ВР HMD (Head-Mounted Display), трекеры Vive и базовые станции. Трекеры Vive должны знать положение руки в перчатке. Базовые станции принимают сигналы от трекеров и HMD и обеспечивают их стабильную ориентацию в пространстве. Приложение Unity, запущенное на ПК, получает эту информацию, обрабатывает ее в соответствии с заданной программой и с помощью дополнительного меню помощника выводит изображение на экраны (HMD пользователя и монитор ПК).

На рисунке 1 показаны логические компоненты и связи между ними, реализованные в разработанной системе.

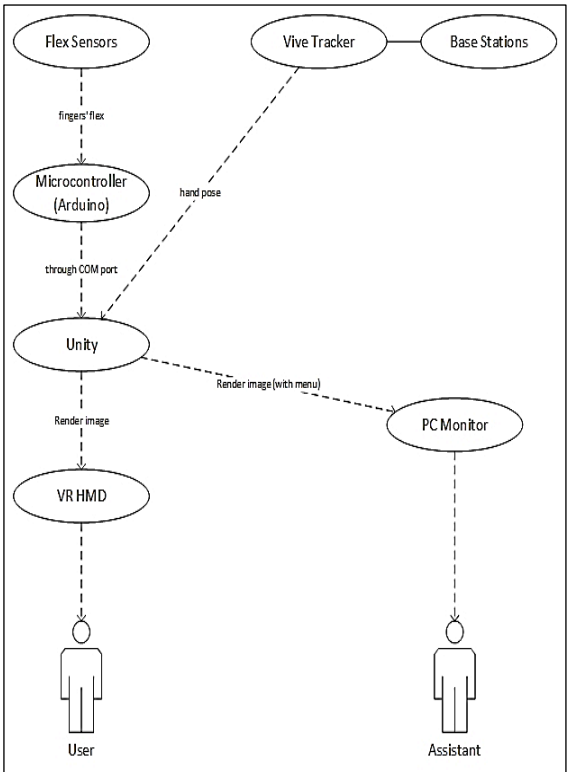


Рис. 1. UML-схема компонентов системы

Fig. 1. UML diagram of system components

Оборудование. Основными компонентами аппаратной части являются ПК, гарнитура ВР HTC Vive с контроллерами и трекерами Vive, базовые станции (маяки) и разработанная перчатка. Перчатка (рис. 2) представляет собой концепцию [15, 16], а не окончательный вариант. Компоненты перчатки: обычная тканевая перчатка, гибкие датчики (производитель Spectra Symbol), Arduino Mega 2560 на базе микроконтроллера ATmega2560, USB-кабель и множество кабелей для подключения деталей пластины.

ПО. Поскольку перчатка основана на контроллере Arduino, сценарий был написан в среде Arduino IDE. Он считывает данные с гибких датчиков в виде значений сопротивления, а затем переводит значения сопротивления в новые значения в диапазоне 0–100 для лучшего понимания и удобства использования в Unity. Решение с открытым исходным кодом Ardity [17] применено для соединения через COM-порт контроллера Arduino и Unity.

Для разработки приложения был использован движок Unity версии 2020 LTS, а для ВР-части – новый стандарт OpenXR, который облегчает расширение и обновление в будущем для других платформ.

Система взаимодействия. Движение руки фиксируется в компоненте под названием PhysicsPoser. Если рука находится рядом с другим физическим объектом с коллайдерами и недалеко от реального положения, то она плавно перемещается и вращается с помощью встроенного физического движка Unity, в противном случае помещается непосредственно в целевое положение, минуя физический движок.

На рисунке 3 показаны зеленые капсулы коллайдеров, которые являются их физическим представлением в движке.

В основании руки и на каждой фаланге пальцев прикреплены компоненты ArticulationBody. Они работают как суставы, поэтому при приложении внешней силы пальцы сгибаются. Сгибание также может быть выполнено путем установки нужных значений, что используется при хватании.

Конвейер с основными компонентами системы хватания и порядок потока информации следующие: GloveDevice + SerialController ⇒ GloveListener ⇒ GloveDetector ⇒ GloveManager. Опишем компоненты более подробно.

Компоненты GloveDevice и SerialController отвечают за получение информации от перчатки и ее интерпретацию. GloveDevice определяет устройство и его характеристики в среде Unity. SerialController получает информацию из указанного COM-порта.

Компонент GloveListener на основе информации, полученной от предыдущих компонентов (степень сгибания), изменяет угол расположения суставов, сгибая пальцы виртуальной руки.

Компонент GloveDetector определяет, когда фаланги пальцев касаются объекта.

Компонент GloveManager работает с информацией от GloveDetector. Он проверяет две группы детектора: на большом пальце и на остальных. Условия для захвата: хотя бы один GloveDetector из каждой группы должен сигна-

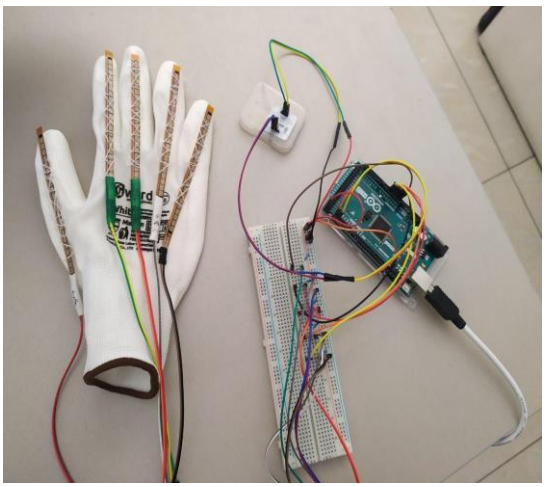


Рис. 2. Разработанная перчатка (на стадии проверки концепции)

Fig. 2. The designed glove (proof-of-concept stage)

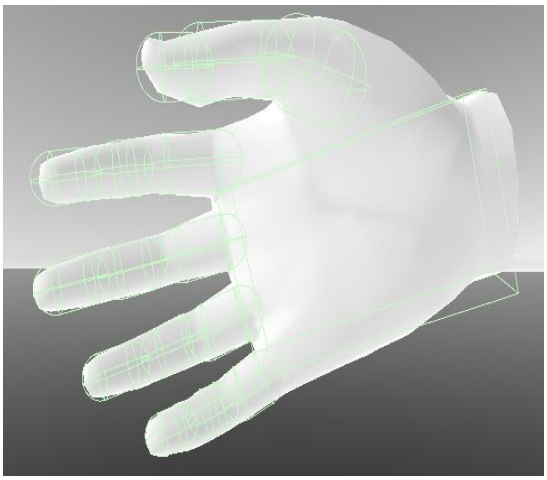


Рис. 3. Коллайдеры руки

Fig. 3. Hand colliders

лизировать о контакте, ни один другой объект в данный момент не захватывается, и существует минимально необходимый уровень складки. Захват объекта осуществляется по средней точке, полученной из точек контакта, о которых сигнализируют GloveDetector.

Ощущение веса предметов также является важным моментом для погружения [18]: в зависимости от веса должно изменяться движение виртуального положения руки к реальному. Для более четкого понимания, когда достигается заметное различие в положениях виртуальной и реальной рук, появляется прозрачная проекция реальной руки (рис. 4).

Упражнения. Разработанные упражнения представлены в таблице.

Меню ассистента используется врачом или другим лицом для настройки параметров или помощи в выполнении некоторых полезных действий. В левой части экрана находятся универсальные настройки, в правой – специфические настройки текущего упражнения.

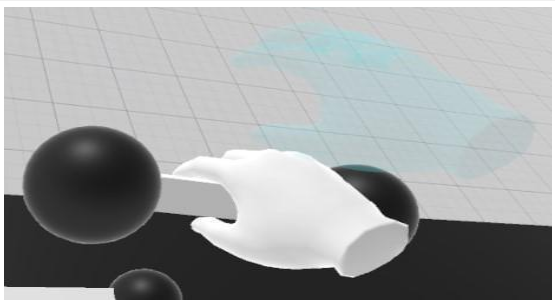


Рис. 4. Поднятие объекта с весом и прозрачная проекция руки

Fig. 4. Lifting an object with weight and a transparent projection of the hand

Ручное меню (рис. 5) позволяет пациенту самостоятельно использовать основные, наиболее часто используемые действия внутри ВР-приложения. Меню появляется при повороте лицевой стороны ладони к лицу. Таким образом, оно не будет мешать процессу выполнения упражнений.

Разработанные упражнения

The designed exercises

Упражнение	Описание	Условие успеха
Lever	Пациенту нужно потянуть за рычаг, который имеет постепенно нарастающую тугость (чем ближе к концу, тем туже)	Угол рычага больше или равен целевому углу
Glowing points	Появляются светящиеся точки, и больному нужно попасть по ним пальцем	Попасть по необходимому количеству точек или по наибольшему количеству точек за отведенное время
Ball tossing	Пациент подбрасывает мячик пальцем вверх	Подбросить мяч на определенную высоту заданное количество раз
Cubes (BBT)	Box and Blocks Test. Пациенту необходимо переместить кубики из одного отсека в другой	Переместить необходимое количество кубиков или наибольшее количество за отведенное время
Ball and glass	Пациент должен схватить шарик, положить его в стакан, затем поднести стакан к губам и выпить	Положить мяч в стакан, поднести его к голове, выкатить шарик из стакана на лицо
Door	Открытие двери	Повернуть ручку на необходимый угол, открыть дверь на необходимый угол
Jar	Открытие крышки банки	Повернуть крышку банки на нужный угол
Flex fingers	Упражнение на сгибание пальцев	Поочередно сгибать и разгибать каждый палец на необходимый угол, в конце сгибать и разгибать все пальцы одновременно
Flex wrist	Упражнение на сгибание запястья	Сгибание и разгибание запястья до необходимого угла
Moving objects	Сцена, содержащая объекты разных размера, формы и веса	На данный момент нет критериев успеха

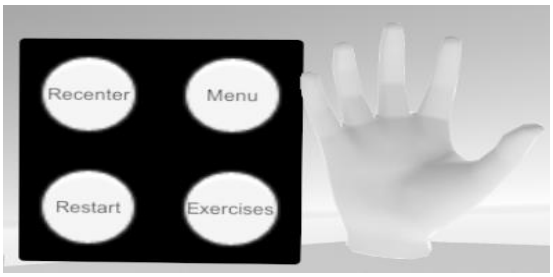


Рис. 5. Интерактивное меню, расположенное на руке

Fig. 5. An interactive menu located on the hand

На графике (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/23.jpg) пациент или врач могут динамически просматривать прогресс. В выпадающем списке пользователь может изменить отображаемое упражнение, а с помощью кнопок «+» и «–» – количество отображаемых сохраненных дней.

Если в один и тот же день было несколько сохранений, отображается лучшее из них. График автоматически подстраивает свой размер как под количество сохранений, так и под значения. При наведении курсора на элемент сохранения появляется всплывающая подсказка с точным значением. Прогресс может отображаться в двух видах: график и гистограмма.

Заключение

Инсульт и многие другие заболевания являются проблемой для полноценной повседневной жизни многих людей. Поэтому применение развивающихся отраслей технологии является одним из наиболее вероятных способов улучшения процесса реабилитации. ВР, как одна из таких областей, может обеспечить существенно новый уровень погружения, который потенциально способствует повышению комфорта и эффективности, а также уменьшению боли.

В рамках настоящей работы как одно из возможных решений разработаны и представлены следующие основные компоненты программной системы [19]: взаимодействие, интеграция перчаток, а также различные дополнительные инструменты (описание прогресса, вспомогательные меню, разнообразные упражнения и др.).

В будущем запланировано сконструировать новую перчатку с Bluetooth, моторами и т.д., чтобы сделать ее более компактной и удобной в использовании, отшлифовать упражнения и пользовательские интерфейсы. В планах также эксперимент с группой пациентов, анкетирование и анализ результатов, получение рекомендаций специалистов-медиков.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Mekbib D.B., Han J., Zhang L., Fang S., Jiang H., Zhu J., Roe A.W., Xu D. Virtual reality therapy for upper limb rehabilitation in patients with stroke: a meta-analysis of randomized clinical trials. Brain Injury, 2020, vol. 34, no. 4, pp. 456–465. DOI: 10.1080/02699052.2020.1725126.

2. Park W., Kim J., Kim M.Y. Efficacy of virtual reality therapy in ideomotor apraxia rehabilitation: A case report. Medicine, 2021, vol. 100, no. 28, PMCID: art. e26657. DOI: 10.1097/MD.0000000000026657.

3. Oña E., Cuesta-Gómez A., Garcia J., Raffe W., Sánchez-Herrera P., Cuerda R.C.L., Jardón A. Evaluating a VR-based box and blocks test for automatic assessment of manual dexterity: A preliminary study in Parkinson's disease. Proc. VII IEEE Int. Conf. SeGAH, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SeGAH.2019.8882472.

4. Webster A., Poyade M., Rea P., Paul L. The co-design of hand rehabilitation exercises for multiple sclerosis using hand tracking system. In: Advances in Experimental Medicine and Biology, 2019, pp. 83–96. DOI: 10.1007/978-3-030-06070-1_7.

5. Joo S.Y., Cho Y.S., Lee S.Y., Seok H., Seo C.H. Effects of virtual reality-based rehabilitation on burned hands: a prospective, randomized, single-blind study. J. of Clinical Medicine, 2020, vol. 9, no. 3, art. 731. DOI: 10.3390/jcm9030731.

6. Feigin V.L., Nguyen G., Cercy K. et al. Global, regional, and country-specific lifetime risks of stroke, 1990 and 2016. New England J. of Medicine, 2018, vol. 379, no. 25, pp. 2429–2437. DOI: 10.1056/NEJMoa1804492.

7. Ciorap R., Andritoi D., Ciorap M., Munteanu M. Monitoring system for home-based hand rehabilitation. Proc. Int. Conf. and Exposition EPE, 2018, pp. 836–839. DOI: 10.1109/ICEPE.2018.8559682.

8. Lai S., Studenski S., Duncan P., Perera S. Persisting consequences of stroke measured by the Stroke Impact Scale. Stroke, 2002, vol. 33, no. 7, pp. 1840–1844. DOI: 10.1161/01.STR.0000019289.15440.F2.

9. Tran J.E., Fowler C.A., Delikat J. et al. Immersive virtual reality to improve outcomes in veterans with stroke: Protocol for a single-arm pilot study. JMIR Research Protocols, 2021, vol. 10, no. 5, art. e26133. DOI: 10.2196/26133.

10. Hoffman H.G., Boe D.A., Rombokas E. et al. Virtual reality hand therapy: A new tool for nonopioid analgesia for acute procedural pain, hand rehabilitation, and VR embodiment therapy for phantom limb pain. J. of Hand Therapy, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 254–262. DOI: 10.1016/j.jht.2020.04.001.

11. Chen X., Gong L., Wei L., Yeh S., Xu L.D., Zheng L., Zou Z. A wearable hand rehabilitation system with soft gloves. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 943–952. DOI: 10.1109/TII.2020.3010369.

12. Wheatland N., Wang Y., Song H., Neff M., Zordan V.B., Jörg S. State of the art in hand and finger modeling and animation. Computer Graphics Forum, 2015, vol. 34, no. 2, pp. 735–760. DOI: 10.1111/cgf.12595.

13. Oprea S., Martinez-Gonzalez P., Garcia-Garcia A., Castro-Vargas J.A., Orts-Escolano S., Garcia-Rodriguez J. A visually realistic grasping system for object manipulation and interaction in virtual reality environments. Computers & Graphics, 2019, vol. 83, pp. 77–86. DOI: 10.1016/j.cag.2019.07.003.

14. Belger J. DC: Clinical application of immersive VR in spatial cognition: The assessment of spatial memory and unilateral spatial neglect in neurological patients. Proc. IEEE Conf. VRW, 2021, pp. 723–724. DOI: 10.1109/VRW52623.2021.00244.

15. Shigapov M., Kugurakova V. Design and development of a hardware and software system for simulation of feedback tactility. Proc. SIBCON, 2021, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438902.

16. Shigapov M., Kugurakova V., Zykov E. Design of digital gloves with feedback for VR. Proc. IEEE EWDTS, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524807.

17. Ardity: Arduino + Unity over COM Ports. URL: https://ardity.dwilches.com/ (дата обращения: 14.06.2022).

18. Rietzler M., Geiselhart F., Gugenheimer J., Rukzio E. Breaking the tracking: Enabling weight perception using perceivable tracking offsets. Proc. CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems, 2018, pp. 1–12. DOI: 10.1145/3173574.3173702.

19. Аглямов Ф.Р., Кугуракова В.В., Шигапов М.И. Система реалистичного взаимодействия рук с виртуальным пространством на основе тактильных перчаток с учетом прогресса пациентов: Свид. о регистр. ПрЭВМ № 2022611166. Рос. Федерация, 2022.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.285-292

Received 01.08.22, Revised 05.08.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 285–292

A rehabilitation simulator for patients with hand mobility problems using virtual reality technologies

F.R. Aglyamov [1], *Master of Science, aglyamov.fox@gmail.com*
V.S. Kugurakov [2], *Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, vladimir.kugurakov@kpfu.ru*

[1] *Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russian Federation*
[2] *Kazan Federal University, SIM – Laboratory of Simulation Technologies in Biomedicine, Kazan, 420008, Russian Federation*

Abstract. A hand is one of the most important parts of the human body; its injuries seriously affect even normal activities. Thus, restoring the hand function and mobility is one of the most complex and important topics for normal daily life. The subject of this study is a hardware-software simulator complex to rehabilitate patients with hand mobility disorders using virtual reality technology. The topic is relevant due to a higher level of patient's interest and motivation, which can potentially increase the interest and effectiveness of rehabilitation procedures.

The authors have analyzed modern motion modeling methods, as well as the use of a virtual reality technology for rehabilitation and tracking changes in motor functions of patients with cognitive problems.

The result of the study is a prototype glove and software for collecting information about the finger flexion degree, as well as a set of exercises for a patient and rehabilitation progress recordings for further analysis. The paper presents a possible architecture option for integrating the reading glove with modern VR systems.

Practical relevance relates to the introduction of an experimental method for rehabilitation, the effectiveness of which has been proven theoretically and will probably be effective in practice, which is planned to be proven later.

Section 6 outlines further plans for the glove development, as well as the addition of functionality to the rehabilitation application.

Keywords: VR, hand rehabilitation, glove, serious games, exergaming, task-oriented therapy, stroke.

Acknowledgements. *This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").*

References

1. Mekbib D.B., Han J., Zhang L., Fang S., Jiang H., Zhu J., Roe A.W., Xu D. Virtual reality therapy for upper limb rehabilitation in patients with stroke: a meta-analysis of randomized clinical trials. *Brain Injury*, 2020, vol. 34, no. 4, pp. 456–465. DOI: 10.1080/02699052.2020.1725126.
2. Park W., Kim J., Kim M.Y. Efficacy of virtual reality therapy in ideomotor apraxia rehabilitation: A case report. *Medicine*, 2021, vol. 100, no. 28, PMCID: art. e26657. DOI: 10.1097/MD.0000000000026657.
3. Oña E., Cuesta-Gómez A., Garcia J., Raffe W., Sánchez-Herrera P., Cuerda R.C.L., Jardón A. Evaluating a VR-based box and blocks test for automatic assessment of manual dexterity: A preliminary study in Parkinson's disease. *Proc. VII IEEE Int. Conf. SeGAH*, 2019, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SeGAH.2019.8882472.
4. Webster A., Poyade M., Rea P., Paul L. The co-design of hand rehabilitation exercises for multiple sclerosis using hand tracking system. In: *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2019, pp. 83–96. DOI: 10.1007/978-3-030-06070-1_7.
5. Joo S.Y., Cho Y.S., Lee S.Y., Seok H., Seo C.H. Effects of virtual reality-based rehabilitation on burned hands: a prospective, randomized, single-blind study. *J. of Clinical Medicine*, 2020, vol. 9, no. 3, art. 731. DOI: 10.3390/jcm9030731.
6. Feigin V.L., Nguyen G., Cercy K. et al. Global, regional, and country-specific lifetime risks of stroke, 1990 and 2016. *New England J. of Medicine*, 2018, vol. 379, no. 25, pp. 2429–2437. DOI: 10.1056/NEJMoa 1804492.
7. Ciorap R., Andritoi D., Ciorap M., Munteanu M. Monitoring system for home-based hand rehabilitation. *Proc. Int. Conf. and Exposition EPE*, 2018, pp. 836–839. DOI: 10.1109/ICEPE.2018.8559682.
8. Lai S., Studenski S., Duncan P., Perera S. Persisting consequences of stroke measured by the Stroke Impact Scale. *Stroke*, 2002, vol. 33, no. 7, pp. 1840–1844. DOI: 10.1161/01.STR.0000019289.15440.F2.
9. Tran J.E., Fowler C.A., Delikat J. et al. Immersive virtual reality to improve outcomes in veterans with stroke: Protocol for a single-arm pilot study. *JMIR Research Protocols*, 2021, vol. 10, no. 5, art. e26133. DOI: 10.2196/26133.
10. Hoffman H.G., Boe D.A., Rombokas E. et al. Virtual reality hand therapy: A new tool for nonopioid analgesia for acute procedural pain, hand rehabilitation, and VR embodiment therapy for phantom limb pain. *J. of Hand Therapy*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 254–262. DOI: 10.1016/j.jht.2020.04.001.
11. Chen X., Gong L., Wei L., Yeh S., Xu L.D., Zheng L., Zou Z. A wearable hand rehabilitation system with soft gloves. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 943–952. DOI: 10.1109/TII.2020.3010369.
12. Wheatland N., Wang Y., Song H., Neff M., Zordan V.B., Jörg S. State of the art in hand and finger modeling and animation. *Computer Graphics Forum*, 2015, vol. 34, no. 2, pp. 735–760. DOI: 10.1111/ cgf.12595.
13. Oprea S., Martinez-Gonzalez P., Garcia-Garcia A., Castro-Vargas J.A., Orts-Escolano S., Garcia-Rodriguez J. A visually realistic grasping system for object manipulation and interaction in virtual reality environments. *Computers & Graphics*, 2019, vol. 83, pp. 77–86. DOI: 10.1016/j.cag.2019.07.003.
14. Belger J. DC: Clinical application of immersive VR in spatial cognition: The assessment of spatial memory and unilateral spatial neglect in neurological patients. *Proc. IEEE Conf. VRW*, 2021, pp. 723–724. DOI: 10.1109/VRW52623.2021.00244.
15. Shigapov M., Kugurakova V. Design and development of a hardware and software system for simulation of feedback tactility. *Proc. SIBCON*, 2021, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438902.

16. Shigapov M., Kugurakova V., Zykov E. Design of digital gloves with feedback for VR. *Proc. IEEE EWDTS*, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524807.

17. *Ardity: Arduino + Unity over COM Ports*. Available at: https://ardity.dwilches.com/ (accessed June 14, 2022).

18. Rietzler M., Geiselhart F., Gugenheimer J., Rukzio E. Breaking the tracking: Enabling weight perception using perceivable tracking offsets. *Proc. CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems*, 2018, pp. 1–12. DOI: 10.1145/3173574.3173702.

19. Aglyamov F.R., Kugurakova V.V., Shigapov M.I. *A System of Realistic Interaction of Hands with Virtual Space Based on Tactile Gloves Taking Into Account the Progress of Patients*. Patent RF, no. 2022611166, 2022.

Для цитирования

Аглямов Ф.Р., Кугураков В.С. Тренажер для реабилитации пациентов с проблемами мобильности руки, построенный с использованием технологий виртуальной реальности // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 285–292. DOI: 10.15827/0236-235X.139.285-292.

For citation

Aglyamov F.R., Kugurakov V.S. A rehabilitation simulator for patients with hand mobility problems using virtual reality technologies. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 285–292 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.285-292.

УДК 515.142.33
DOI: 10.15827/0236-235X.139.293-304
Дата подачи статьи: 01.08.22, после доработки: 04.08.22
2022. Т. 35. № 3. С. 293–304

Использование частичной параллелизации для триангуляции двумерных областей

Т.Х. Бикбулатов [1], *студент, ch7cly@gmail.com*
Д.Н. Тумаков [1], *к.ф.-м.н., доцент, dtumakov@kpfu.ru*

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт вычислительной математики и информационных технологий, г. Казань, 420008, Россия*

Триангуляция произвольной области является одной из фундаментальных задач вычислительной геометрии. Классические подходы к триангуляции, например, триангуляции Делоне, дают треугольники, которые имеют достаточно широкий диапазон изменения значений их углов. Однако для ряда задач необходимо, чтобы полученные треугольники обладали более конкретными свойствами.

В работе предложен алгоритм триангуляции областей сложной геометрии с учетом заранее заданных ограничений на минимальные значения углов и максимальные длины сторон полученных треугольников. Алгоритм состоит из трех основных этапов. Первый этап принимает на вход набор точек, задающих границу фигуры, и формирует из них начальное разбиение на подобласти, генерируя точки для дальнейшей триангуляции. Такая генерация для каждой подобласти проводится совершенно независимо, что позволяет достичь максимального ускорения при распараллеливании (нагружая все логические ядра процессора с технологией hyper-threading). Затем фигура триангулируется алгоритмом «разделяй и властвуй». Здесь наибольшая производительность достигается при числе потоков, равных числу физических ядер процессора. На последнем этапе произведено уточнение параметров треугольников на основе алгоритма Рупперта. В силу специфики алгоритма последовательный код является оптимальным на этом этапе.

Все этапы параллелизации реализованы с использованием технологии OpenMP на языке C++. Показаны численные результаты, характеризующие прирост производительности вычислений для различного числа потоков в зависимости от размерности задачи.

Ключевые слова: *триангуляция Делоне, алгоритм Рупперта, параллелизация, OpenMP.*

Известно, что триангуляция – это разбиение области на треугольные подобласти. Методы триангуляции широко используются в различных областях, таких как математическое моделирование, компьютерная графика, визуализация данных, распознавание образов [1], моделирование местности [1–3], при решении алгоритмических задач на основе графов [4, 5] и т.д. Сами задачи и области, для которых выполняется триангуляция, усложняются, поэтому быстрая и эффективная триангуляция остается актуальным направлением исследований.

Существуют последовательные эффективные реализации алгоритмов для триангуляции Делоне [6–8]. С развитием вычислительных возможностей компьютеров все больший интерес вызывают параллельные алгоритмы [9, 10], причем реализуемые подходы могут быть самыми разными. Наиболее часто используется алгоритм «разделяй и властвуй» [11]. В одних работах авторы отдают предпочтение так называемому алгоритму «продвигаемого фронта» [12], в других пытаются пойти дальше и представляют варианты формирования сеток с уникальными алгоритмами декомпозиции данных и последующей композицией полной триангуляции [13] или обработки независимых областей с параллельной реализацией [14].

Сегодня основная стратегия формирования сеток заключается в том, чтобы разбить интересующую нас область на как можно более маленькие части. Это нужно делать до тех пор, пока в оставшихся частях не останутся фрагменты, которые можно будет легко обработать. Такие части можно триангулировать независимо друг от друга. Но последующий шаг предусматривает обратный ход – композицию обработанных элементов до тех пор, пока все элементы исходной области не соединятся вместе. Конечное время такого алгоритма будет зависеть в основном от способа композиции элементов. Трудозатраты на композицию сильно влияют на конечную фактическую сложность алгоритма.

Но не только эффективные алгоритмы триангуляции ускоряют работу программы. Правильное представление области также имеет

большое значение, поскольку помогает подготовить данные так, чтобы при последующей обработке алгоритм проходил меньше шагов для достижения успеха. Существует несколько способов обработки. В данной работе один из ее этапов основан на методе «отрезания ушей» [14]. Более эффективной реализации также может способствовать та или иная генерация начальных сеток (или точек). В зависимости от расстановки точек может увеличиваться или уменьшаться фактическое время работы алгоритма уточнения триангуляции всей области. При правильном подходе может быть сэкономлено достаточно много времени.

При необходимости изменить триангуляцию, удалив из нее ненужные элементы, используются алгоритмы, способные анализировать общую топологию заданной сложной геометрии, удаляя ненужные элементы, но при этом не нарушая условие Делоне [15].

В настоящей работе рассмотрена задача триангуляции двумерной односвязной области сложной геометрии, включающей как выпуклые, так и невыпуклые многоугольники. Подробно описаны и проиллюстрированы рисунками алгоритмы этапов триангуляции. Выделены три этапа: генерация набора точек, триангуляция алгоритмом «разделяй и властвуй» и уточнение параметров треугольников методом, основанным на алгоритме Рупперта [16].

Вычисления и сравнение алгоритмов проведены на 18-ядерном процессоре Intel Core i9 10980XE с 64 Гб оперативной памяти. Показано ускорение производительности параллельного кода по сравнению с последовательным для двух первых этапов.

Генерация набора точек

Сгенерировать набор точек для фигуры со сложной геометрией – нетривиальная задача, так как сначала нужно определиться с тем, как обрабатывать область. От способа генерации набора точек может зависеть сложность приведения вычислительной сетки к нужным параметрам. Поэтому необходимо сгенерировать набор точек наилучшим образом, соответствующим заданным параметрам триангуляции.

Разбиение фигуры на большие треугольники. Определить, попала ли точка в многоугольник, можно различными способами. Существует классический алгоритм установки этого факта путем проведения луча из рассматриваемой точки и последующего подсчета числа пересечений с границей многоугольника, но такой подход требует дополнительных уточнений. Наиболее эффективным является разбиение фигуры на треугольники методом «отрезания ушей» [14] с дальнейшим определением принадлежности точки одному из полученных треугольников.

Зададим фигуры набором точек, последовательно расположенных против хода часовой стрелки. Применим алгоритм «отрезания ушей» и сформируем треугольники, заполняющие фигуру. В последующем, перебирая элементы этого списка и проверяя принадлежность точки хотя бы одному из треугольников, можно установить принадлежность точки всей фигуре: $v_i \in \Delta_j \in D \Rightarrow v_i \in D$, где v_i – точка из множества всех генерируемых вершин; Δ_j – треугольник из множества, покрывающего всю область; D – обрабатываемая область. Пример такого разбиения приведен на рисунке 1.

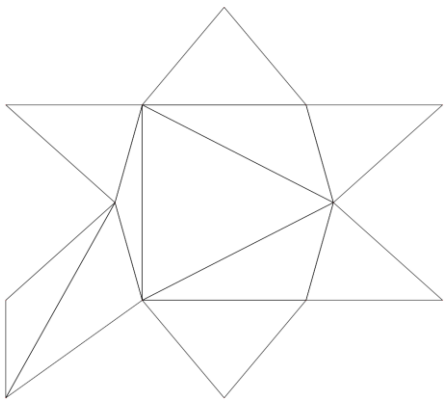


Рис. 1. Разделение области на треугольные подобласти

Fig. 1. Dividing an area into triangular subareas

Для проверки попадания точки в треугольник достаточно установить, что проверяемая точка и третья вершина лежат в одной полуплоскости относительно прямой, образованной двумя оставшимися вершинами треугольника, причем эту проверку необходимо выполнить для каждой стороны (прямой) треугольника.

Из-за дискретности графики в компьютерах все аналитические бесконечно тонкие линии перестают быть тонкими, и при изменении толщины линии изменяется точность таких проверок. Значит, от толщины линии зависит, насколько близко к стороне такого треугольника может лежать точка. С помощью списка ребер, ограничивающих обрабатываемую плоскость, при дальнейшей проверке на при-

надлежность им можно получать набор точек, попадающий на границу фигуры.

Как уже было сказано, исходный набор точек может влиять на последующую сложность генерации треугольной сетки, удовлетворяющей заданным параметрам. Рассмотрим два подхода к генерации набора точек: генерацию сетки из вершин со случайным распределением и генерацию сетки, вершины которой образуют правильные треугольники.

Генерация точек для сетки со случайным равномерным распределением. Для построения сетки используем генератор случайных чисел из библиотеки Standard template library (STL). В листинге (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/22.jpg) приведена функция, генерирующая набор равномерно распределенных вершин. Для каждой нити в потоке определяется своя область для генерации точек, которая записывается в переменные `losStart` и `locEnd`. По ним с помощью генератора случайных чисел для каждой координаты вершины формируется число. Далее проверяется попадание точки в фигуру. Если вхождение подтверждается, то вершина сохраняется в общем контейнере `tFilling-Points` в критической секции, чтобы избежать конфликтов при одновременной записи информации в одну и ту же ячейку памяти. Также используется сквозной счетчик amount. Он нужен для того, чтобы плотность точек сохранялась примерно одинаковой для каждой нити. Таким способом пользователь заранее может задать для всей области сложной геометрии количество точек, необходимое для генерации.

На рисунке 2 показан график усредненного отношения времени (последовательного) выполнения одной нитью кода ко времени (параллельного) выполнения несколькими нитями, необходимого для генерации сетки из случайно равномерно распределенных вершин. Установлено, что при генерации случайной сетки максимальное ускорение достигается на 4 нитях. Вероятнее всего, это связано с тем, что дополнительное использование атомарных операций излишне замедляет весь процесс. Таким образом, дополнительные расходы, связанные с подготовкой данных для параллельных вычислений, не всегда могут быть компенсированы самими вычислениями.

Генерация точек для сетки из вершин, образующих правильные треугольники. Отличительной особенностью генерации такой сетки является выполнение нескольких дополнительных действий, связанных с триангуляцией границ области. В случае же с обычной сеткой из правильных треугольников оставляются только те точки, которые оказались внутри фигуры. Поэтому треугольники, изначально получившиеся на краях области, могут иметь слишком большие или малые углы.

Для формирования такой сетки сначала в функции `formNeighbourPoints()` найдем все соседние вершины сетки, то есть точки, расстояние до которых равно длине стороны треугольника. Эти данные нужны для дальнейшей обработки положения текущей вершины. Весь анализ проводит функция `formPoint-ForSpecialHexMesh()`. Сначала каждая такая соседняя точка анализируется функцией `isInFigureWithBorders()`, отличие которой от `isInFigure()` состоит только в том, что при попадании точки на границу фигуры выдается ответ 2, а при попадании точки внутрь – 1 и 0 в случае, когда точка оказывается вне треугольника. Если же соседняя точка попала в фигуру, то в переменную dragp добавляются ее координаты, чтобы в дальнейшем использовать суперпозицию всех точек, попавших внутрь, для сдвига координат текущей точки.

Если все соседние точки попали внутрь фигуры, очевидно, что текущая точка также расположена внутри, и она заносится в список. В противном случае сначала строится прямая, проходящая через координаты текущей точки и точки-суперпозиции с координатами, представляющими собой арифметическое среднее

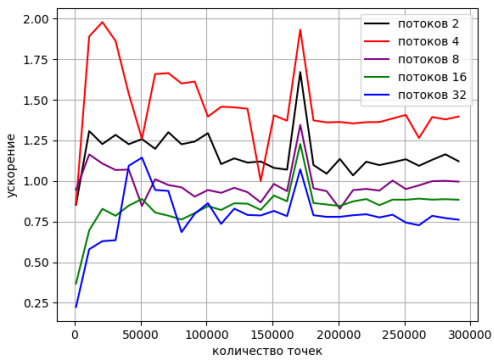


Рис. 2. График ускорения генерации набора точек из равномерно распределенных вершин

Fig. 2. An acceleration graph for generating a set of points from uniformly distributed vertices

координат соседних точек. Далее находится пересечение отрезков, образующих фигуру, с построенной прямой и определяется ближайшая точка пересечения к текущей точке. После этого координаты текущей точки изменяются на координаты ближайшей точки пересечения, тем самым текущая точка сдвигается на границу фигуры.

В случае, когда точка лежит внутри фигуры, выполняется следующее. Если расстояние между точкой пересечения и текущей точкой меньше четверти длины шага, то текущая точка отбрасывается. Если же эта длина больше половины длины шага, то точка сдвигается ближе к точке пересечения. Функция `formPoint-ForSpecialHexMesh` приведена в листинге (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/31.jpg). Она формирует набор точек, не имеет сквозного счетчика и атомарной секции, так как каждая нить обрабатывает свою область сетки.

На рисунке 3 приведен пример триангуляции фигуры с равномерной сеткой. На рисунке 4 показан график отношения времени исполнения кода на одной нити ко времени исполнения на нескольких нитях для генерации сетки из правильных треугольников. Видно, что при 32 нитях ускорение производительности достигает 10–12 раз для такого типа сетки. Еще большему ускорению мешает то, что при добавлении точки в критических областях все нити останавливают работу. Затраты также уходят на некоторые последовательные области и работу с памятью.

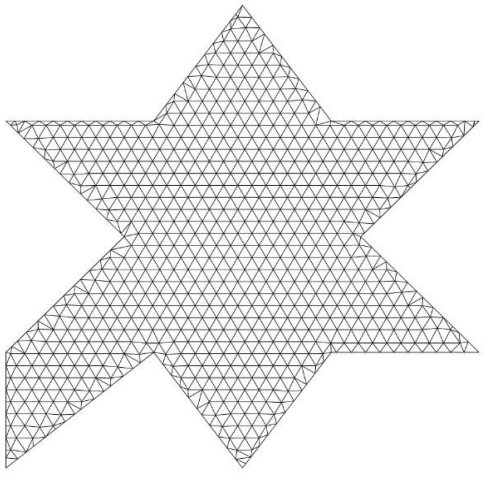


Рис. 3. Триангуляция Делоне по набору точек, составляющих правильные треугольники

Fig. 3. Delaunay triangulation on a set of points making up regular triangles

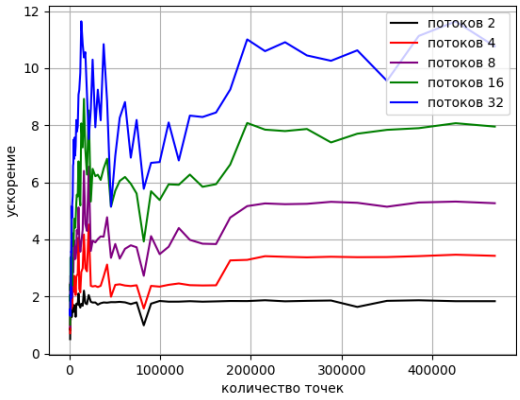


Рис. 4. График ускорения генерации набора точек из равномерно распределенных вершин

Fig. 4. An graph for accelerating the generation of a set of points from uniformly distributed vertices

Вычислительные эксперименты показали, что равномерная сетка требует меньшего числа итераций и, соответственно, времени, поэтому в дальнейшем для триангуляции будет использоваться такая сетка.

Триангуляции Делоне по набору точек

Перейдем к генерации по заданному набору точек сетки, удовлетворяющей условию Делоне. Рассмотрим два способа триангуляции: по всему набору точек и по отдельности на выпуклых подобластях.

Триангуляция по всему набору точек. Этот способ заключается в том, чтобы построить триангуляцию по заданному набору точек напрямую, а затем удалить лишние образовавшиеся ребра (ребра, изначально не принадлежащие заданной фигуре). Так как в местах, где образуются лишние ребра, мало вершин, небольшое количество ребер будет удалено.

Общий принцип алгоритма взят из [15] с использованием алгоритма сшивания подтриангуляций (триангуляций части исходной фигуры) «строй перестраивая». Рекурсивный подход разделен на две части – прямой и обратный, с использованием стека состояний вместо простого вызова рекурсивной функции. Таким способом алгоритм адаптирован к параллельной реализации.

Для более быстрого разделения областей на подобласти используем два массива, отсортированных по осям абсцисс и ординат. Чтобы поделить текущую подобласть пополам, достаточно разделить один из отсортированных массивов пополам, тогда в каждой из новых подоб-

ластей окажется примерно по половине вершин. Также для удобства отделим друг от друга операцию разделения области на подобласти и триангуляцию. Алгоритм приведен в листинге (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/32.jpg).

В реализации функции триангуляции использованы стеки и очереди, которые помогают имитировать проход по дереву. Это необходимо для более эффективной работы с памятью в параллельных секциях программы.

Идея параллелизации довольно проста. Сначала необходимо разделить область на достаточное число подобластей, чтобы в дальнейшем работать уже с ними. Но не всегда в наборе точек хватает количества вершин, чтобы поровну поделить их между всеми нитями. Для этого используется переменная threads, в которую записывается оптимальное число нитей, вычисленное по количеству точек. Далее производится деление области на число подобластей, равное threads. Затем, раздавая каждой нити по своему набору вершин, запускается функция `foo`, описанная в следующем листинге:

```
void recurrentAlgorithm::foo(std::map<Rib,
SidePoints> & rc,
std::map<Point*, chain>& m, std::vector
<Point*>vx, std::vector<Point*>vy, bool ox)
{
  std::queue<mTh> climb;
  diggingDepth(climb, vx, vy, ox);
  totalmerging(climb, rc, m);
}
```

Так выполняется классический алгоритм триангуляции «разделяй и властвуй». Каждая нить занимается этим независимо, поэтому удается достичь максимального ускорения.

Как уже было замечено, сложной частью является композиция подтриангуляций. Чтобы решить эту задачу, нить получает две соседние подтриангуляции и реализует алгоритм «строй перестраивая», реализованный функцией mergeContainers. После того как все подтриангуляции были попарно сшиты, их остается в два раза меньше. Таким образом, на каждом шаге одна нить обрабатывает все большее число подтриангуляций. Это приводит к излишней нагрузке на одну нить и простаиванию остальных, что негативно влияет на общую скорость выполнения алгоритма.

На рисунке 5 показан результат работы алгоритма по набору точек для невыпуклой фигуры. Зоны, где не генерировались точки, перекрыты лишними ребрами, которые впоследствии следует удалить.

На рисунке 6 представлен график ускорения работы алгоритма в зависимости от количества потоков. Видно, что производительность увеличилась на 16 ядрах почти в 3,4 раза. 32 потока показали более низкую скорость, это объясняется тем, что на тестируемом процессоре всего 18 физических и 32 логических ядра. Таким образом, при 32 потоках используется технология hyper-threading. Однако специфика алгоритма не позволяет получить ускорение за счет использования логических ядер.

Способ первый. Удаление лишних ребер. Приведенный алгоритм триангуляции корректно работает как для выпуклых, так и для невыпуклых многоугольников. После работы алгоритма «разделяй и властвуй» всегда полу-

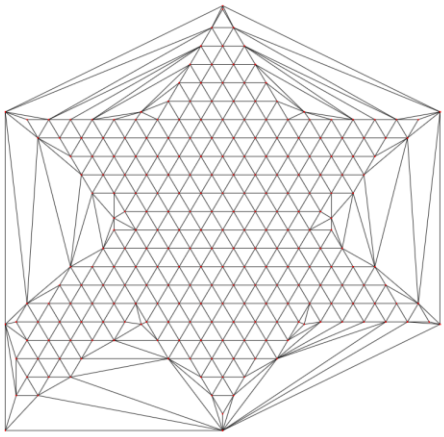


Рис. 5. Триангуляция по набору точек невыпуклой фигуры

Fig. 5. Triangulation on a set of non-convex figure points

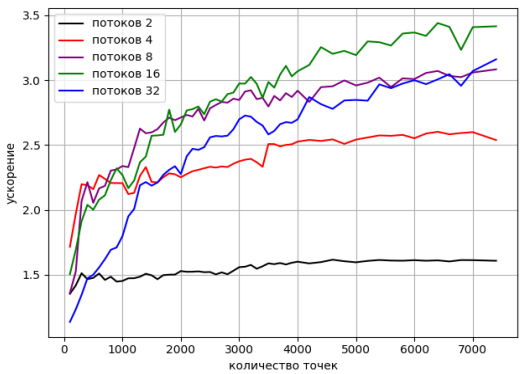


Рис. 6. График ускорения триангуляции области методом «разделяй и властвуй»

Fig. 6. A graph of the area triangulation acceleration using the divide-and-conquer method

чается выпуклая область. Из этого следует необходимость в некоторых случаях удалять лишние ребра. Продемонстрируем данную процедуру на наборах точек, которые не лежат на границе, но ее легко можно расширить на случай граничных точек.

Начнем с анализа недостающих ребер и их вставки в триангуляцию. Для этого найдем вершины ребер, которые необходимо вставить, – ребра, ограничивающие фигуру. На рисунке 7 такое ребро выделено фиолетовым цветом. Все треугольники, которые пересекаются выделенным ребром, запомним – на рисунке 7 они выделены красным цветом. Далее найдем все ребра красных треугольников, которые пересекают фиолетовое ребро, и удалим их. Затем отсортируем вершины красных треугольников, записав их в список так, чтобы они оказались по разные стороны от вставляемого ребра и образовали две фигуры.

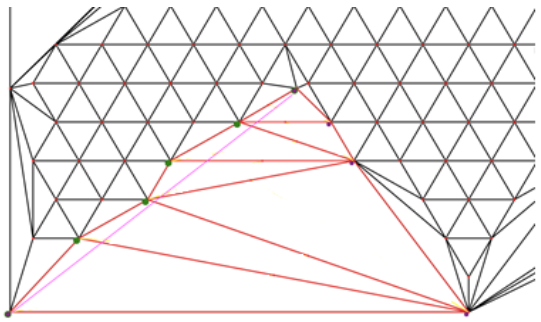


Рис. 7. Поиск ребер, мешающих вставке

Fig. 7. Searching edges that interfere with insertion

Фигуры со вставленным ребром не содержат триангуляции. Поэтому проведем триангуляцию этих двух фигур, находящихся по обе стороны от фиолетового ребра, простым алгоритмом [15]. Затем для образованных новых треугольников проверим выполнение условия Делоне и при необходимости произведем их перестроение [15].

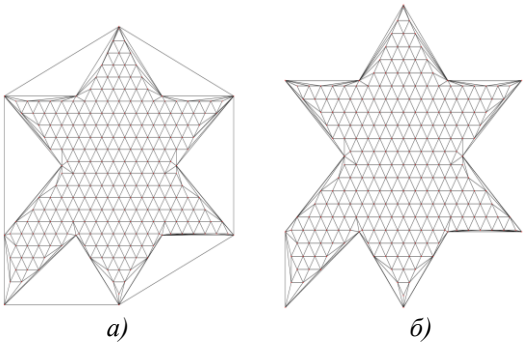
Все вставленные ребра также запомним. После этого останется только определить лишние ребра на границе триангуляции и удалить их. Сам алгоритм приведен в листинге:

```
   void cutfigure:: cutUnneces-
saryEdge(){
     std::stack<Rib> del;

  for(auto a: _excess){
    auto it = _rc.find(a);
    if(it == _rc.end()){
      printf("Error no such Rib\n");
    }
    else{
      Rib temp;
      del.push(it->first);
      while (!del.empty()){
        temp = del.top();
        del.pop();
        auto tempit1 = _rc.find(temp);
        Point * p0 = tempit1->first.p[0];
        Point * p1 = tempit1->first.p[1];
        Point *mas[]={p1,p0};
        for(int i = 0; i<2;++i){
          temp = Rib(tempit1->first.p[i],
tempit1->second.notNULL());
          if(_figureRibs.find(temp)==
 figureRibs.end()){
            del.push(temp);
          }}
        _rc[Rib(tempit1->first.p[0],
tempit1->second.notNULL())].swap(
tempit1->first.p[1], nullptr);
        _rc[Rib(tempit1->first.p[1],
tempit1->second.notNULL())].swap(
tempit1->first.p[0], nullptr);
        _rc.erase(tempit1->first); }}}
}
```

Пример удаления ребер отражен на рисунке 8.

В функции `cutUnnecessaryEdge()` реализован алгоритм, который от внешнего лишнего ребра расходящейся волной удаляет все ребра, являющиеся ненужными. Такая рекурсивная волна идет до ребра, ограничивающего область. В конце необходимо перестроить по условию Делоне ребра, соседние с ограничивающими.



а) *б)*

Рис. 8. Триангуляция а) после вставки всех требуемых ребер; б) после удаления всех лишних ребер

Fig. 8. Triangulation a) after inserting all required edges; б) after removing all extra edges

Способ второй. Этап 1. Деление фигуры на выпуклые части. Суть этого способа в том, чтобы изначально поделить область на выпуклые элементы и независимо распределить точки по ним, затем протриангулировать по отдельности и соединить. При большом количестве точек процесс должен выполниться быстрее, так как меньше работы с элементами три-

ангуляции, поскольку необходимо всего лишь запустить перестроение общих ребер по условию Делоне.

На вход алгоритму подается массив последовательно записанных вершин фигуры. Включим их в первый список, формально представляющий кольцо, где за последним элементом сразу идет первый (фигура является замкнутой). Этот список представляет собой текущую обрабатываемую фигуру. Для удобства формируем второй кольцевой список вершин, являющихся основанием для невыпуклых углов (больших 180°).

Пока во втором списке содержатся невыпуклые углы, будем отделять из первого списка вершины, образующие выпуклые подфигуры. При этом первый и второй списки будут постепенно сокращаться. Так, если во втором списке содержится лишь один невыпуклый угол, то сдвигаемся на $n/2$ вершин по первому списку, где n – количество вершин в первом списке. Затем, проходя в первом списке вершин в обе стороны от текущей вершины, по очереди пытаемся соединить вершины, чтобы получилась выпуклая подфигура. Эту подфигуру отсекаем, удалив лишние вершины из первого списка, и проверяем текущую фигуру на выпуклость.

Если во втором списке более одной вершины, находим в нем ближайшие вершины, являющиеся основаниями для невыпуклых углов. Соответственно, во втором списке это будут вершины с индексом, отличающимся на единицу. Соединяем эти вершины. Если хотя бы часть полученного ребра лежит вне фигуры, то ребро не принимаем и ищем другие вершины. Для этого в первом списке от непринятых вершин двигаемся поэлементно обратно к текущей вершине, пытаясь найти такую, соединение с которой даст выпуклую подфигуру. Если это удается сделать, также отсекаем ее, удаляя лишние вершины из первого списка. Если же не удается, переходим к следующей вершине во втором списке. Цикл продолжаем, пока не пройдем все невыпуклые углы.

Таким образом получим несколько выпуклых подфигур. Для них также произведем разрез на треугольники (пункт «Разбиение фигуры на треугольники») для локализации точек. Затем для каждой вершины определим ее подфигуру. Пример разбиения приведен на рисунке 9.

Алгоритм, используемый для триангуляции, такой же, как и при триангуляции по всему набору точек. С увеличением количества точек его эффективность увеличивается.

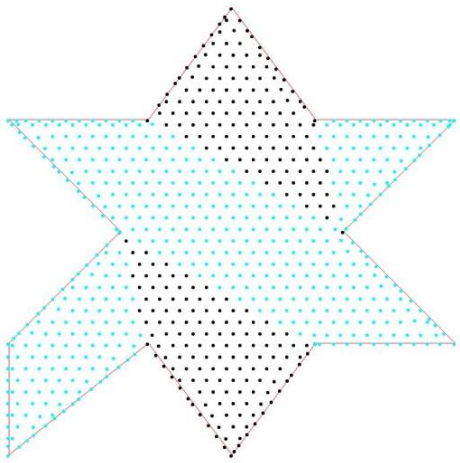
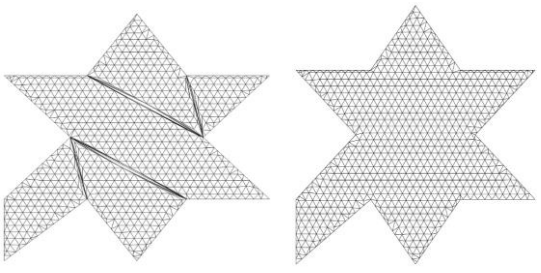


Рис. 9. Распределение точек на выпуклые подфигуры

Fig. 9. Distributing points to convex subfigures

Способ второй. Этап 2. Сшивание подобластей. Последний этап состоит в том, чтобы найти общие ребра у подфигур и объединить подтриангуляции в одну общую триангуляцию. Результат такого соединения можно увидеть на рисунке 10а. На следующем шаге отправим места сшивания на проверку и при необходимости перестроим общие ребра подфигур с учетом условия Делоне. Конечный результат этого алгоритма представлен на рисунке 10б.

В некоторых случаях такой подход может оказаться более эффективным, так как при триангуляции пропускаются самые трудозатрат-



а) *б)*

Рис. 10. Результат алгоритма сшивания подобластей: а) сшитые вместе подтриангуляции; б) перестроенная триангуляция, удовлетворяющая условию Делоне

Fig. 10. The result of the subdomain stitching algorithm is the following: a) the subtriangulations stitched together; б) a rearranged triangulation that satisfies the Delaunay condition

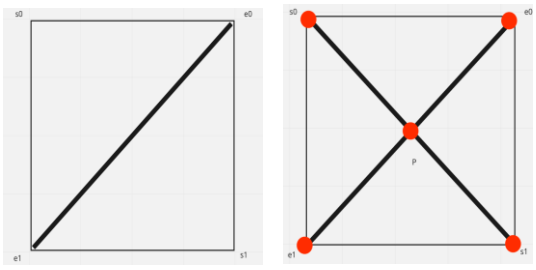
ные этапы, связанные с соединением самых больших частей через алгоритм «строй перестраивая».

Первый подход является более трудоемким, однако второй обладает неустойчивостью для областей сложной геометрии, делая разбиение на треугольники с параметрами, очень далекими от заданных. Поэтому, по мнению авторов, целесообразнее использовать первый подход без разбиения на подфигуры.

Приведение сетки к заданным параметрам

Длина каждого элемента должна получиться не больше заданной величины, а величина минимального угла – не меньше заданного значения. Для достижения нужного результата длину можно изменить за счет деления элементов пополам, а минимальный угол – за счет применения алгоритма Рупперта [16].

Последовательный алгоритм. Последовательный вариант представляет собой последовательный вызов нескольких функций. Функция `splitAllLongSegments()` делит пополам все элементы, длина которых превышает заданную, образуя 2 или 4 треугольника, как показано на рисунке 11. `splitEnroachedSegments()` делит пополам вторгшиеся ребра (те, внутри описанной окружности которых лежит любая вершина из триангуляции, кроме вершин самих ребер), также образуя 2 или 4 треугольника, а `fixingAngleByInsertAdditionalVertexes()` реализует алгоритм Рупперта.



а) *б)*

Рис. 11. Деление элементов: а) ребро до вставки вершины в середину; б) ребро после вставки вершины в середину

Fig. 11. Division of elements: a) an edge before inserting the vertex into the middle; б) an edge after inserting the vertex into the middle

Параллельный алгоритм. Параллельный вариант требует выполнения нескольких дополнительных этапов. Идея ускорения алгоритма заключается в том, чтобы сначала декомпозировать исходную триангуляцию, провести над ней необходимые операции, а затем объединить в единое целое.

Сначала нужно получить необходимое число подтриангуляций. Для этого разделим всю фигуру на подфигуры, а затем при необходимости будем делить эти подфигуры пополам. Пример для 32 зон (разделены красными отрезками) приведен на рисунке 12. Все ребра, которые касаются линий этих новых подфигур, зафиксируем, то есть запретим их изменять. Тогда получим 32 области, ограниченные собственными границами. Обратная компоновка будет осуществляться аналогично триангуляции по всему набору точек: попарно параллельно сшиваем подобласти. Функция, реализующая описанный алгоритм, представлена в листинге (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/33.jpg).

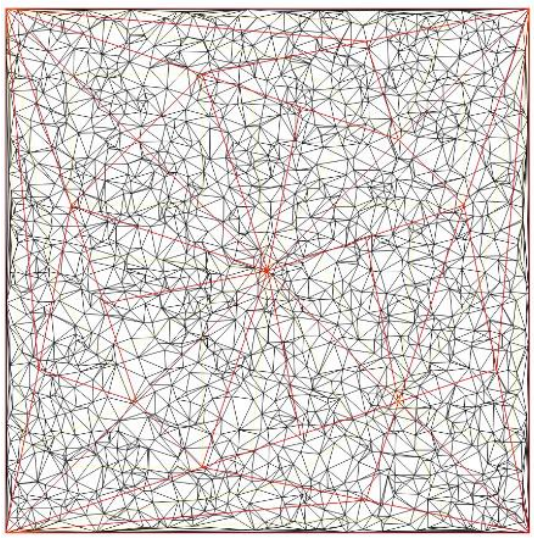
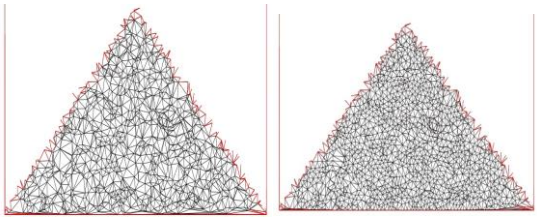


Рис. 12. Пример разделения триангуляции на подобласти

Fig. 12. An example of dividing a triangulation into subdomains

Также желательно ввести ограничение на количество допустимых вторгшихся ребер, чтобы избежать возможных зацикливаний программы. Тогда внутри можно будет делить пополам только одно вторгшееся ребро. Таким образом, допустим лишь предобработку подтриангуляции. В параллельную область вклю-

чим деление пополам длинных ребер и удаление вторгшихся ребер первого порядка. Пример такой предобработки можно увидеть на рисунке 13.



а) *б)*

Рис. 13. Подтриангуляция:
а) до предобработки; б) после предобработки

Fig. 13. Subtriangulation:
a) before preprocessing; б) after preprocessing

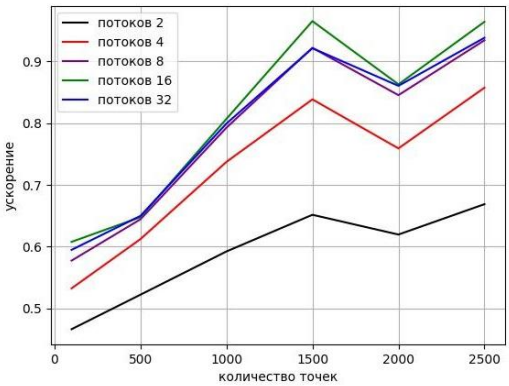
Оценить ускорение параллельного алгоритма, реализованное таким образом, достаточно сложно. Это связано с тем, что вставка точек является итеративным процессом. При этом изменение триангуляции происходит по формуле $x_{k+1} = x_k + v_k$, где x_k – триангуляция на k-м шаге, а v_k – вставляемая вершина. Соответственно, после добавления вершины в триангуляцию перестраиваем прилегающие треугольники по условию Делоне.

Рассмотрим триангуляцию с равномерно распределенными вершинами. Тогда при делении такой фигуры внутри каждой подобласти окажется примерно равное количество элементов. В этом случае при сохранении формы и увеличении плотности точек внутри элементов окажется больше, чем ограничивающих ребер, составляющих их список. Значит, предполагается, что количество элементов внутри фигуры будет расти быстрее, чем список ограничивающих ребер, и гораздо эффективнее произвести предобработку в параллельной области. Это может произойти или при большом количестве крупных элементов, или при множественном присутствии вторгшихся ребер.

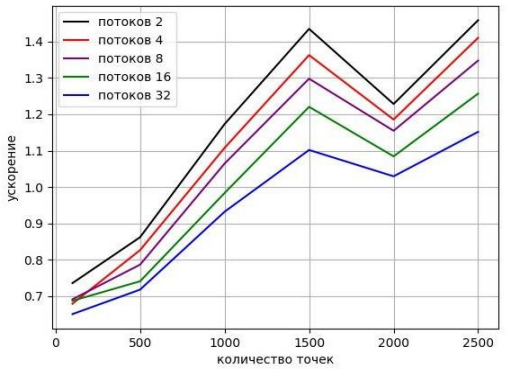
Программа может особенно заметно ускориться при разбиении длинных элементов, так как алгоритмом можно разбить почти все из них. В случае же со вторгшимися элементами можно только разделить их, потому что в противном случае программа может зациклиться из-за присутствия ребер из списков ограничивающих ребер, которые делить не разрешено. На практике ускорение может быть замечено только при больших размерностях задачи, так как накладные расходы на деление области и слияние подтриангуляций достаточно велики. Таким образом, планируется ускорять только два первых шага: удаление длинных элементов и удаление вторгшихся ребер. Оценим ускорение для этих шагов.

Чтобы оценить ускорение, сравним между собой тот блок, который производит подготовку к основному алгоритму Рупперта, то есть без функции `fixingAngleByInsertAdditionalVertexesScanningRib()`. На рисунке 14 отображены результаты сравнения производительности параллельного алгоритма.

Очевидно, что происходит замедление работы параллельного кода относительно последовательного. Снижение результатов ускорения на последних шагах можно объяснить тем, что с увеличением количества точек возрастает



а)



б)

Рис. 14. Ускорение приведения триангуляции (сторона фигуры – 1900):
а) с учетом объединения;
б) без учета объединения

Fig. 14. Acceleration of triangulation reduction (figure side – 1900):
a) the association is taken into account;
б) without taking the association into account

и их плотность, значит, меньший вклад дает параллелизованная функция `splitAllLongSegmentsP()`. При этом разделенные подобласти уточняются, не имея информации о соседних подобластях. В такой ситуации может произойти излишнее добавление вершин в одной подобласти, что в дальнейшем также потребует добавления вершин в соседних подобластях. Чем меньше дробится область, тем больше информации доступно в потоке, это приводит к снижению производительности.

Заключение

Предложен алгоритм, покрывающий сеткой односвязную область сложной геометрии. Рассмотрены обработка областей и генерация двух типов сеток: сеток со случайным набором точек, распределенных по равномерному закону, и сеток с вершинами, соответствующими правильным треугольникам. Для каждого типа сетки предложен свой параллельный алгоритм генерации вершин. Для сетки со случайным распределением вершин получено ускорение в 1,5 раза на 4 потоках, а для равномерной сетки – до 12 раз на 32 потоках.

После генерации точек предложены два алгоритма триангуляции Делоне по полученным наборам точек. Первый подход заключается в триангуляции сразу всей фигуры, второй – в триангуляции отдельных выпуклых частей исходной фигуры. Сделан вывод, что первый подход более трудозатратный, однако устойчив к сложности геометрии триангулируемого объекта. В обоих случаях триангуляция осуществлена алгоритмом «разделяй и властвуй». Наибольшая производительность достигнута при числе потоков, равных числу физических ядер процессора, ускорение составило 3,5 раза.

На последнем этапе проведено уточнение параметров треугольников на основе алгоритма Рупперта. Полученные результаты свидетельствуют о том, что последовательный код работает быстрее параллельного. Прежде всего это происходит из-за трудоемкого пересчета при сшивании подобластей.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Kugunavar S., Prabhakar C.J. Content-based medical image retrieval using Delaunay triangulation segmentation technique. J. of Information Technology Research, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 48–66. DOI: 10.4018/JITR.2021040103.

2. Giniyatova D.K., Tumakov D.N., Markina A.G. Solving the problem of electromagnetic wave diffraction by a flat screen using CUDA. Lobachevskii J. of Mathematics, 2021, vol. 42, no. 6, pp. 1335–1344. DOI: 10.1134/S1995080221060081.

3. Tang L., Ren C., Liu Z., Li Q. A road map refinement method using Delaunay triangulation for big trace data. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 2017, vol. 6, no. 2, art. 45. DOI: 10.3390/ijgi6020045.

4. Liu Z., Liu H., Lu Z., Zeng Q. A dynamic fusion pathfinding algorithm using Delaunay triangulation and improved A-star for mobile robots. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 20602–20621. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3055231.

5. Agayan G.M., Balabaev N.K., Rodnikova M.N. Description of mixed networks of H-bonds in a water-ethylene glycol system by methods of graph theory and Delaunay simplices. Russian J. of Physical Chemistry A, 2021, vol. 95, no. 7, pp. 1283–1290. DOI: 10.1134/S0036024421070025.

6. Su P., Drysdale R.L.S. A comparison of sequential Delaunay triangulation algorithms. Computational Geometry, 1997, vol. 7, no. 5-6, pp. 361–385. DOI: 10.1016/S0925-7721(96)00025-9.

7. Shewchuk J. Triangle: engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator. In: Computational Geometry Towards Geometric Engineering. Proc. WACG, 1996, vol. 1148, pp. 203–222. DOI: 10.1007/BFb0014497.

8. CGAL 5.4.1 – dD Convex Hulls and Delaunay Triangulations. URL: https://doc.cgal.org/latest/Convex_hull_d/index.html (дата обращения: 10.07.2022).

9. Batista V.H.F., Millman D.L., Pion S., Singler J. Parallel geometric algorithms for multi-core computers. Computational Geometry, vol. 43, no. 8, pp. 663–677. DOI: 10.1016/j.comgeo.2010.04.008.

10. Blelloch E.G., Miller L.G., Hardwick C.J., Talmor D. Design and implementation of a practical parallel Delaunay algorithm. Algorithmica, 1999, vol. 24, pp. 243–269. DOI: 10.1007/PL00008262.

11. Yang H., Liu L., Zhang C., Li R. et al. PatCC1: an efficient parallel triangulation algorithm for spherical and planar grids with commonality and parallel consistency. Geoscientific Model Development, 2019, vol. 12, pp. 3311–3328. DOI: 10.5194/gmd-12-3311-2019.

12. Nguyen C., Rhodes P.J. TIPP: parallel Delaunay triangulation for large-scale datasets. Proc. XXX Int. Conf. SSDM, 2018, no. 8, pp. 1–12. DOI: 10.1145/3221269.3223034.

13. Yu F., Zeng Y., Guan Z.Q., Lo S.H. A robust Delaunay-AFT based parallel method for the generation of large-scale fully constrained meshes. Computers & Structures, 2020, vol. 228, art. 106170. DOI: 10.1016/j.compstruc.2019.106170.

14. Mei G., Tipper J.C., Xu N. Ear-clipping based algorithms of generating high-quality polygon triangulation. In: Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, vol. 212, pp. 979–988. DOI: 10.1007/978-3-642-34531-9_105.

15. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 128 с.

16. Ruppert J. A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation. J. of Algorithms, 1995, vol. 18, no. 3, pp. 548–585. DOI: 10.1006/jagm.1995.1021.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.293-304

Received 01.08.22, Revised 04.08.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 293–304

Using partial parallelization to triangulate 2D domains

T.Kh. Bikbulatov [1], *Undergraduate Student, ch7cly@gmail.com*
D.N. Tumakov [1], *Ph.D. (Mathematics and Physics), Associate Professor, dtumakov@kpfu.ru*

[1] *Kazan Federal University, Institute of Computational Mathematics and Information Technologies, Kazan, 420008, Russian Federation*

Abstract. Delaunay triangulation of an arbitrary domain is one of the fundamental problems of computational geometry. Classical approaches to Delaunay triangulation produce triangles that have a wide range of angle values.

The paper proposes an algorithm for triangulation of complex geometry domains taking into account predetermined parameters: the minimum angle and the maximum side length of the obtained triangles. The algorithm consists of three main stages. The first stage takes a set of points that set the figure boundary as input, and forms an initial partition into subdomains from them generating points for further triangulation. Such generation for subdomains is completely independent; therefore, it is most effectively parallelized by the number of logical cores. The figure is then triangulated by the divide-and-conquer algorithm. Here, the highest performance is achieved with the number of threads equal to the number of physical processor cores. At the last stage, the parameters of triangles are refined by a method based on Ruppert's algorithm. Due to the specifics of the algorithm, the serial code is optimal at this stage.

All parallelization is implemented using OpenMP technology in C++. The paper shows numerical results representing the increase in computing performance for a different number of threads depending on the problem dimension.

Keywords: Delaunay triangulation, Ruppert's algorithm, parallelization, OpenMP.

Acknowledgements. *This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").*

References

1. Kugunavar S., Prabhakar C.J. Content-based medical image retrieval using Delaunay triangulation segmentation technique. *J. of Information Technology Research*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 48–66. DOI: 10.4018/JITR.2021040103.

2. Giniyatova D.K., Tumakov D.N., Markina A.G. Solving the problem of electromagnetic wave diffraction by a flat screen using CUDA. *Lobachevskii J. of Mathematics*, 2021, vol. 42, no. 6, pp. 1335–1344. DOI: 10.1134/S1995080221060081.

3. Tang L., Ren C., Liu Z., Li Q. A road map refinement method using Delaunay triangulation for big trace data. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 2017, vol. 6, no. 2, art. 45. DOI: 10.3390/ijgi6020045.

4. Liu Z., Liu H., Lu Z., Zeng Q. A dynamic fusion pathfinding algorithm using Delaunay triangulation and improved A-star for mobile robots. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 20602–20621. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3055231.

5. Agayan G.M., Balabaev N.K., Rodnikova M.N. Description of mixed networks of H-bonds in a water-ethylene glycol system by methods of graph theory and Delaunay simplices. *Russian J. of Physical Chemistry A*, 2021, vol. 95, no. 7, pp. 1283–1290. DOI: 10.1134/S0036024421070025.

6. Su P., Drysdale R.L.S. A comparison of sequential Delaunay triangulation algorithms. *Computational Geometry*, 1997, vol. 7, no. 5-6, pp. 361–385. DOI: 10.1016/S0925-7721(96)00025-9.

7. Shewchuk J. Triangle: engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator. In: *Computational Geometry Towards Geometric Engineering. Proc. WACG*, 1996, vol. 1148, pp. 203–222. DOI: 10.1007/BFb0014497.

8. *CGAL 5.4.1 – dD Convex Hulls and Delaunay Triangulations*. Available at: https://doc.cgal.org/latest/Convex_hull_d/index.html (accessed July 10, 2022).

9. Batista V.H.F., Millman D.L., Pion S., Singler J. Parallel geometric algorithms for multi-core computers. *Computational Geometry*, vol. 43, no. 8, pp. 663–677. DOI: 10.1016/j.comgeo.2010.04.008.

10. Blelloch E.G., Miller L.G., Hardwick C.J., Talmor D. Design and implementation of a practical parallel Delaunay algorithm. *Algorithmica*, 1999, vol. 24, pp. 243–269. DOI: 10.1007/PL00008262.

11. Yang H., Liu L., Zhang C., Li R. et al. PatCC1: an efficient parallel triangulation algorithm for spherical and planar grids with commonality and parallel consistency. *Geoscientific Model Development*, 2019, vol. 12, pp. 3311–3328. DOI: 10.5194/gmd-12-3311-2019.

12. Nguyen C., Rhodes P.J. TIPP: parallel Delaunay triangulation for large-scale datasets. *Proc. XXX Int. Conf. SSDM*, 2018, no. 8, pp. 1–12. DOI: 10.1145/3221269.3223034.

13. Yu F., Zeng Y., Guan Z.Q., Lo S.H. A robust Delaunay-AFT based parallel method for the generation of large-scale fully constrained meshes. *Computers & Structures*, 2020, vol. 228, art. 106170. DOI: 10.1016/j.compstruc.2019.106170.

14. Mei G., Tipper J.C., Xu N. Ear-clipping based algorithms of generating high-quality polygon triangulation. In: *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, vol. 212, pp. 979–988. DOI: 10.1007/978-3-642-34531-9_105.

15. Skvortsov A.V. *Delaunay Triangulation and its Application*. Tomsk, 2002, 128 p. (in Russ.).

16. Ruppert J. A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation. *J. of Algorithms*, 1995, vol. 18, no. 3, pp. 548–585. DOI: 10.1006/jagm.1995.1021.

Для цитирования

Бикбулатов Т.Х., Тумаков Д.Н. Использование частичной параллелизации для триангуляции двумерных областей // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 293–304. DOI: 10.15827/0236-235X.139.293-304.

For citation

Bikbulatov T.Kh., Tumakov D.N. Using partial parallelization to triangulate 2D domains. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 293–304 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.293-304.

УДК 519.68
DOI: 10.15827/0236-235X.139.305-315
Дата подачи статьи: 25.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 305–315

Решение задачи дифракции электромагнитной волны на экранах произвольной формы с использованием технологии CUDA

Д.Х. Гиниятова [1], *старший преподаватель, normaliti@gmail.com*
А.Г. Маркина [1], *младший научный сотрудник, m8angelina@gmail.com*

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт вычислительной математики и информационных технологий, г. Казань, 420008, Россия*

Рассмотрен алгоритм решения задачи дифракции плоской электромагнитной волны на экранах произвольной формы с применением технологии параллельного программирования CUDA.

Задача сформулирована в виде интегро-дифференциального уравнения. Ее численное решение условно разделено на три этапа. На первом этапе построена треугольная сетка, покрывающая поверхность исходной области. На основе этой сетки сформирован массив так называемых RWG-элементов (пар треугольников с общим внутренним ребром) и вычислены дополнительные геометрические характеристики. На втором этапе вычислены элементы матрицы моментов и столбца правой части системы линейных алгебраических уравнений, для решения которой на третьем этапе применен метод моментов. В качестве базисных и пробных функций использованы RWG-функции.

Для построения соответствующих RWG-элементов на GPU разработан простой и быстрый алгоритм триангуляции области с произвольной границей. Представлены численные результаты решения задачи дифракции для экрана канонической (квадратной) формы и правильного восьмиугольника с разным уровнем дискретизации области. Полученные значения хорошо согласуются с результатами прежних исследований.

Проведен сравнительный анализ времени выполнения последовательного и параллельного алгоритмов, который показал, что применение технологии CUDA существенно ускоряет решение задачи дифракции электромагнитной волны на плоских металлических экранах произвольной формы. При заполнении матрицы моментов максимальное 20-кратное ускорение достигнуто при количестве RWG-элементов, превышающем 2 500.

Ключевые слова: *задача дифракции, технология CUDA, метод моментов, RWG-функция, параллельный алгоритм.*

Задачи дифракции электромагнитных волн на плоских металлических экранах произвольной формы возникают при исследовании самых разных электродинамических систем, например, при проектировании микрополосковых антенн со сложной формой излучателя. Для их решения необходимо использовать строгие аналитические методы прикладной электродинамики [1–3]. Для решения подобных задач также разработан ряд приближенных численных методов [4–6]. На сегодняшний день широкое распространение в специализированном ПО получили метод моментов, метод конечных элементов (FEM) и метод конечных разностей во временной области (FDTD) [7, 8]. Первые два метода обусловливают необходимость решать комплексные *системы линейных алгебраических уравнений* (СЛАУ), порядок которых напрямую зависит от желаемой степени точности решения задачи. Применение эффективных численных методов и новых компьютерных технологий позволяет решать подобные задачи за приемлемое время. Перспективной технологией с точки зрения времени расчета являются параллельные вычисления на графическом процессоре (NVIDIA CUDA) [9–12].

В статье представлен параллельный алгоритм решения задачи дифракции на экранах произвольной формы методом моментов, реализуемый на GPU посредством технологии CUDA.

Как известно, задача дифракции плоской электромагнитной волны может быть сформулирована в терминах операторного уравнения для поверхностного тока [13, 14], где в качестве оператора может выступать линейный интегральный или интегро-дифференциальный оператор, причем интегрирование ведется по всей области дифракции. Для численного решения таких уравнений используют метод

моментов. Теоретические основы этого метода наиболее полно изложены в работах Харрингтона, в частности, в его монографии [15]. В русскоязычной литературе последовательное описание и анализ метода моментов даны в [16]. Современное изложение метода моментов для задач электродинамики содержится в монографиях [17] и [14]. Кроме того, есть работы, посвященные математическому обоснованию метода моментов и оценке сходимости приближенного решения к точному (например [18]).

Как отмечено выше, разбиение поверхности дифракции на небольшие конечные области приводит к построению и дальнейшему численному решению СЛАУ очень высокого порядка. И в то же время этот класс задач хорошо поддается распараллеливанию, а архитектура *графического процессора* (GPU) хорошо оптимизирована для параллельной обработки данных. Для пластин со сложной геометрией триангуляция области может осуществляться с помощью любого алгоритма [19], однако для задач электродинамики требуется, чтобы треугольная сетка удовлетворяла ряду свойств, что влечет за собой уточнение работы алгоритма и значительные временные затраты. Для некоторых обладающих особенностями поверхностей, таких как гребенчатые пластины, алгоритм триангуляции можно ускорить. В настоящей работе представлен алгоритм быстрой триангуляция плоских экранов с произвольной границей с применением технологии CUDA. Кроме того, весь последующий цикл решения задачи дифракции методом моментов, а именно сборка матрицы СЛАУ, также осуществляется на GPU, что значительно ускоряет работу всего алгоритма по сравнению с последовательной версией.

Постановка задачи дифракции

Рассмотрим постановку задачи дифракции электромагнитной волны на идеально проводящем тонком экране произвольной формы [20]. Пусть $\Omega \subset R^2$ – ограниченная область с кусочно-гладкой границей Г, состоящей из конечного числа дуг класса C^∞, стыкующихся под ненулевыми углами. Задача дифракции внешнего электромагнитного поля E^0, H^0 на идеально проводящей пластине Ω, расположенной в свободном пространстве с волновым числом $k^2 = \omega^2\varepsilon\mu$, состоит в определении рассеянного электромагнитного поля:

$$E, H \in C^2\left(R^3 \setminus \bar{\Omega}\right) \bigcap_{\delta>0} C\left(\bar{R}^3_+ \setminus \Gamma_\delta\right) \bigcap_{\delta>0} C\left(\bar{R}^3_- \setminus \Gamma_\delta\right), \quad (1)$$

удовлетворяющего однородным уравнениям Максвелла

$$Rot\, H = -ikE, \quad Rot\, E = ikH, \quad x \in R^3 \setminus \bar{\Omega}, \quad (2)$$

граничным условиям для касательных составляющих электрического поля на поверхности пластины

$$E_\tau|_\Omega = -E_\tau^0|_\Omega, \quad (3)$$

условиям конечности энергии в любом ограниченном объеме пространства

$$E, H \in L^2_{loc}(R^3) \quad (4)$$

и условиям на бесконечности

$$\frac{\partial}{\partial r}\begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} - ik\begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} = o(r^{-1}),$$

$$\begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} = O(r^{-1}),\ r:|x|\to\infty. \quad (5)$$

Для полного поля $H^{tot} = H^0 + H$. Будем предполагать, что все источники падающего поля находятся вне пластины $\bar{\Omega}$, так что для некоторого $\delta > 0$

$$E^0 \in C^\infty(\Omega_\delta),\ \Omega_\delta = \{x:|x-y| < \delta,\ y \in \Omega\}, \quad (6)$$

отсюда следует, что

$$E^0_\tau\big|_\Omega \in C^\infty(\bar{\Omega}). \quad (7)$$

Часто в качестве падающего поля рассматривают либо плоскую волну, либо электрический или магнитный диполь, расположенный вне пластины $\bar{\Omega}$. В этих случаях условия (6) и (7) выполнены. Поле E^0, H^0 является решением системы уравнений Максвелла в свободном пространстве без пластины. Один из подходов к решению задачи (1)–(7) заключается в том, что исходная задача представляется в виде интегро-дифференциального уравнения на пластине [20]. Этот способ принято называть методом поверхностных токов.

Пусть S – открытая или замкнутая поверхность идеально проводящего тела с единичной нормалью n. Через E^i обозначим электрическое поле, создаваемое источником в отсутствие тела (антенны). Оно индуцирует на S поверхностный ток J. Если S – открытая поверхность, то мы рассматриваем J как сумму поверхностных токов на противоположных сторонах S, следовательно, нормальная компонента J должна исчезать на границах S. Рассеянное поле E^S при этом может быть вычислено по формуле

$$E' = -i\omega A - \nabla\Phi, \quad (8)$$

где A и Φ – векторный и скалярный потенциалы соответственно. Известно, что потенциалы связаны с возбуждающим током функцией Грина [14]. В свободном пространстве справедливы следующие формулы:

$$A(r) = \mu \int_S J(r')G(r, r')dS', \quad (9)$$

$$\Phi(r) = \frac{1}{\varepsilon} \int_S \sigma G(r, r')dS', \quad (10)$$

где функция Грина определяется формулой

$$\nabla_s J = -i\omega\sigma. \quad (11)$$

Граничное условие для электрического поля в случае идеально проводящей поверхности имеет вид

$$n\left(E^i + E^s\right) = 0, \quad (12)$$

откуда, использовав (8), получим интегро-дифференциальное уравнение относительно *J*:

$$-E^i_\tau = \left(-i\omega A - \nabla\Phi\right)_\tau, \; r \in S. \quad (13)$$

Вместе с (9)–(11) уравнение (13) представляет собой так называемое интегральное уравнение для электрического поля. Иногда в литературе уравнение (13) также называют уравнением в терминах смешанных потенциалов (MPIE). Тем не менее, всюду далее будем придерживаться термина EFIE, подразумевая под ним уравнение (13) с учетом (9)–(11).

Решение задачи дифракции методом моментов

Широкое применение для расчета поверхностных токов, возникающих на плоских металлических или диэлектрических поверхностях при излучении в свободное пространство, получил метод моментов [14]. Примером области для моделирования этим методом может служить микрополосковая антенна, которая имеет планарную структуру, состоящую из нескольких слоев, расположенных друг над другом [21]. Фактически же метод представляет собой способ решения уравнений Максвелла, записанных в интегральной форме (EFIE). Для решения задачи (13) методом моментов исходную область разбивают на элементарные подобласти, а искомую функцию (поверхностный ток *J*) представляют в виде разложения по конечному числу базисных функций с неизвестными коэффициентами. Каждая базисная функция, заданная в элементарной подобласти, как правило, имеет простой вид: равна нулю вне указанной области и непрерывна на ее границе. Далее обе части исходного уравнения умножают на пробные функции и сводят задачу к решению СЛАУ относительно неизвестных коэффициентов. Основное практическое преимущество метода моментов состоит в том, что необходимо дискретизировать только металлические элементы моделируемого объекта, а не пространство вокруг. Таким образом получается плоская сетка достаточно скромных размеров, которая меньше и проще, чем аналогичная объемная сетка, необходимая для моделирования методами FEM и FDTD.

Базисные и пробные функции. Базисные и пробные функции могут быть выбраны произвольно, однако на практике их подбирают так, чтобы относительно небольшое количество базисных функций гарантировало хорошую аппроксимацию, а их свойства в достаточной степени моделировали поведение искомой функции. Для решения поставленной задачи выбраны RWG-функции, которые впервые были введены в [22]. Их удобно использовать для поиска приближенного решения EFIE, когда исходная область разбита на треугольные площадки, что, в свою очередь, обеспечивает достаточно хорошую аппроксимацию области даже сложной формы. Будем использовать стандартные термины, такие как «грань» – для обозначения поверхности элементарной треугольной площадки, «ребро» («граничное ребро») – для обозначения одной из ее сторон и «вершина» – для обозначения вершины треугольной области.

Прежде всего отметим, что каждая базисная RWG-функция ассоциирована с одним внутренним ребром и обращается в нуль всюду на *S*, кроме пары треугольников, смежных с данным ребром. На рисунке 1 изображены два таких треугольника – T_n^+ и T_n^-, смежных с *n*-м реб-

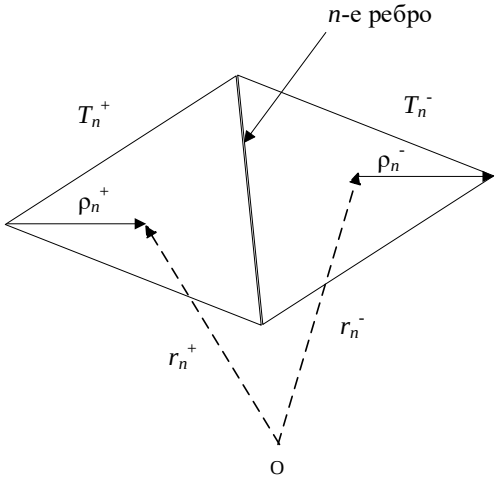


Рис. 1. Пара треугольников с внутренним ребром

Fig. 1. A pair of triangles with an internal edge

ром. Точки, принадлежащие треугольнику T_n^+, могут быть описаны как в глобальных координатах радиус-вектором r_n^+, так и в локальных с помощью радиус-вектора ρ_n^+, заданного относительно свободной вершины треугольника. Аналогичное замечание справедливо и для треугольника T_n^- с той лишь разницей, что вектор ρ_n^- направлен из точки, принадлежащей треугольнику T_n^-, в свободную вершину. Выбор «положительных» и «отрицательных» треугольников произволен с учетом того, что за весь цикл расчета поверхностного тока он не будет изменяться.

Базисная функция, ассоциированная с *n*-м внутренним ребром, имеет вид

$$f_n(r) = \begin{cases} \dfrac{l_n}{2A_n^+}\rho_n^+, & r \in T_n^+, \\ \dfrac{l_n}{2A_n^-}\rho_n^-, & r \in T_n^-, \\ 0 \text{ в остальных случаях}, \end{cases} \quad (14)$$

где l_n – длина *n*-го ребра; A_n^+ и A_n^- – площади треугольников T_n^+ и T_n^- соответственно. Свойства RWG-функций подробно описаны в [22].

Следуя методу моментов, представим поверхностный ток всюду на *S* в виде приближенной формулы

$$J \approx \sum_{n=1}^{N} \alpha_n f_n(r), \quad (15)$$

где *N* – количество внутренних ребер.

Следующим шагом в методе моментов является процедура тестирования или умножения исходного уравнения на пробные функции. Одним из наиболее эффективных является метод Галеркина, когда в качестве пробных функций выбираются те же базисные функции, что обеспечивает соблюдение граничных условий во всей области решения, а не только в отдельно взятых точках. Поэтому в качестве пробных функций также возьмем RWG-функции. Определим скалярное произведение как $\langle f, g\rangle = \int_S f g\, dS$ и умножим уравнение (13) на пробные RWG-функции. Получим

$$\left\langle E^i, f_m \right\rangle = i\omega \left\langle A, f_m \right\rangle + \left\langle \nabla\Phi, f_m \right\rangle. \quad (16)$$

Использовав методы вычисления поверхностного интеграла и свойства f_m на границах *S*, последнее слагаемое в (16) перепишем в виде

$$\left\langle \nabla\Phi, f_m \right\rangle = -\int_S \Phi \nabla_s f_m dS. \quad (17)$$

Из определения (14) следует, что

$$\nabla_s f_n = \begin{cases} \dfrac{l_n}{A_n^+}, & r \in T_n^+, \\ -\dfrac{l_n}{A_n^-}, & r \in T_n^-, \\ 0 \text{ в остальных случаях}, \end{cases}$$

и интеграл в (17) может быть аппроксимирован следующим образом:

$$\int_S \Phi \nabla_s f_m dS = l_m \left(\frac{1}{A_m^+} \int_{T_m^+} \Phi dS - \frac{1}{A_m^-} \int_{T_m^-} \Phi dS \right) \cong \quad (18)$$
$$\cong l_m \left[\Phi\left(r_m^{c+}\right) - \Phi\left(r_m^{c-}\right) \right].$$

В (18) среднее значение Φ на каждом треугольнике заменили значением Φ в центре масс треугольников. Использовав аналогичные рассуждения, можно аппроксимировать слагаемые в (16), содержащие векторный потенциал и падающее поле. Покажем это на примере слагаемого $\left\langle E^i, f_m \right\rangle$:

$$\left\langle E^i, f_m \right\rangle = \int_S E^i f_m dS =$$
$$= \frac{l_m}{2} \left(\frac{1}{A_m^+} \int_{T_m^+} E^i \rho_m^+ dS + \frac{1}{A_m^-} \int_{T_m^-} E^i \rho_m^- dS \right) \cong \quad (19)$$
$$\cong \frac{l_m}{2} \left(E^i\left(r_m^{c+}\right)\rho_m^{c+} + E^i\left(r_m^{c-}\right)\rho_m^{c-} \right).$$

Таким образом, умножив обе части EFIE на пробные RWG-функции, с учетом (17)–(19) получим уравнение

$$i\omega l_m \left[A\left(r_m^{c+}\right)\frac{\rho_m^{c+}}{2} + A\left(r_m^{c-}\right)\frac{\rho_m^{c-}}{2} \right] +$$
$$+ l_m \left[\Phi\left(r_m^{c+}\right) - \Phi\left(r_m^{c-}\right) \right] = \quad (20)$$
$$= l_m \left[E^i\left(r_m^{c+}\right)\frac{\rho_m^{c+}}{2} + E^i\left(r_m^{c-}\right)\frac{\rho_m^{c-}}{2} \right],$$

которое справедливо для каждого внутреннего ребра с номером $m = \overline{1, N}$.

Формирование СЛАУ. После подстановки разложения поверхностного тока по базисным функциям (15) в уравнение (20) получим СЛАУ размера *N*×*N*:

$$Z\, I = V, \quad (21)$$

где $Z = [Z_{mn}]$ – матрица моментов; $I = [\alpha_n]$ – столбец неизвестных коэффициентов; $V = [V_m]$ – столбец известной правой части.

Элементы матрицы Z и столбца V определяются по следующим формулам:

$$Z_{mn} = l_m \left[i\omega \left(A_{mn}^{+} \frac{\rho_m^{c+}}{2} + A_{mn}^{-} \frac{\rho_m^{c-}}{2} \right) + \Phi_{mn}^{-} - \Phi_{mn}^{+} \right], \quad (22)$$

$$V_m = l_m \left(E_m^{+} \frac{\rho_m^{c+}}{2} + E_m^{-} \frac{\rho_m^{c-}}{2} \right), \quad (23)$$

где $A_{mn}^{\pm} = \frac{\mu}{4\pi} \int_S f_n(r') \frac{e^{-ik\left|r_m^{c\pm} - r'\right|}}{\left|r_m^{c\pm} - r'\right|} dS',$

$$\Phi_{mn}^{\pm} = -\frac{1}{4\pi \in i\omega} \int_S \nabla_s' f_n(r') \frac{e^{-ik\left|r_m^{c\pm} - r'\right|}}{\left|r_m^{c\pm} - r'\right|} dS',$$

$$E_m^{\pm} = E^i(r_m^{c\pm}).$$

После вычисления элементов матрицы моментов и столбца правой части решим полученную СЛАУ (21) относительно неизвестных коэффициентов и восстановим искомую функцию J. Отметим, что матрица Z в данном случае является плотной комплексной матрицей в отличие, например, от разряженных матриц, возникающих в методе конечных элементов.

Алгоритм решения на GPU

Параллельные алгоритмы решения задачи дифракции на прямоугольных и гребенчатых пластинах предложены в [23]. Рассмотрим алгоритм решения для экранов произвольных форм, граница которых задана как набор последовательных сегментов.

Численное решение поставленной задачи условно можно разделить на три логических этапа. На первом этапе построим треугольную сетку, покрывающую поверхность исходной области. На ее основе сформируем массив RWG-элементов (пар треугольников с общим внутренним ребром) и вычислим дополнительные геометрические характеристики. На втором этапе вычислим элементы матрицы моментов и столбца правой части СЛАУ по формулам (22) и (23). Наконец, на третьем этапе решим СЛАУ, а функцию J восстановим по уже известным коэффициентам разложения согласно формуле (20). Остановимся подробнее на первых двух этапах.

Триангуляция. Как уже отмечено, на свойства треугольной сетки, покрывающей исходную область дифракции, накладывается ряд ограничений, а именно, длина сторон треугольников должна быть сопоставима с длиной падающей волны, поэтому следует избегать слишком вытянутых треугольников, а при формировании RWG-элементов каждый треугольник T^+ должен быть соединен с треугольниками T^- посредством внутренних смежных ребер и, наоборот, каждый треугольник T^- должен быть окружен треугольниками T^+. Опишем быстрый алгоритм триангуляции области дифракции посредством технологии CUDA.

Пусть граница исходной области P задана набором точек с координатами (x_i, y_i), последовательно соединенных отрезками. Далее границу области дифракции будем называть контуром. На первом этапе для исходной области на CPU сформируем ограничивающий прямоугольник – bound box (рис. 2). Далее данные о контуре области и ограничивающей рамке скопируем в глобальную память графического устройства GPU и выполним на нем последующие вычисления. Ограничивающую рамку разобъем на квадраты со сторонами, соответствующими заданному шагу (рис. 3). Шаг зависит от длины волны и желаемой точности аппроксимации исходной фигуры. Очевидно, чем меньше шаг, тем точнее данная область аппроксимируется треугольной сеткой.

Определим граничные квадраты, то есть квадраты, содержащие граничные точки области (рис. 4). Для этого каждый из квадратов ассоциируем с одной CUDA-нитью (thread). При запуске ядра, отвечающего за определение граничных квадратов, каждая нить перебирает отрезки, образующие контур фигуры. Так происходит до тех пор, пока не будет найден отрезок, точки которого входят в текущий квадрат, или пока не будут проверены все отрезки контура. Поиск внутренних квадратов осуществляется аналогичным образом. Эти квадраты в совокупности с граничными составляют фигуру P, примерно равную исходной области (рис. 5). После этого каждый из квадратов, принадлежащих P, делим по диагонали на два треугольника. Полученные таким образом прямоугольные равнобедренные треугольники образуют итоговую треугольную сетку для области P (рис. 6).

На основе полученной треугольной сетки на GPU сформируем массив RWG-элементов и вычислим сопутствующие геометрические характеристики, необходимые для вычисления интегралов в (22), (23) и формирования матрицы моментов.

Матрица моментов. Следующим этапом является вычисление элементов матрицы моментов и правой части СЛАУ по формулам (22)

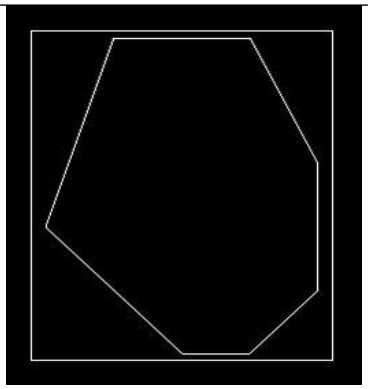


Рис. 2. Исходная область P и bound box

Fig. 2. An initial area P and bound box

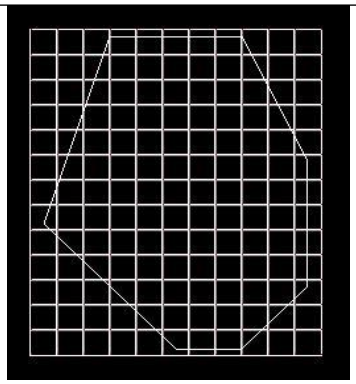


Рис. 3. Покрытие bound box квадратами со стороной, соответствующей шагу разбиения

Fig. 3. Covering bound box with squares with a side corresponding to the partition step

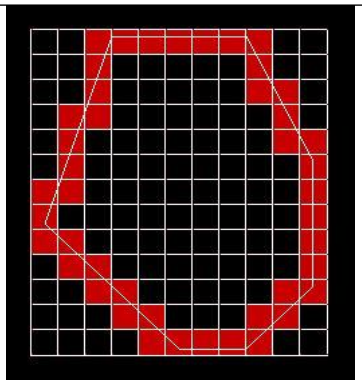


Рис. 4. Определение граничных квадратов, покрывающих контур области P

Fig. 4. Determining the boundary squares covering P area contour

и (23). Именно этот этап алгоритма наиболее трудоемкий и затратный по времени. Рассмотрим алгоритм вычисления произвольного элемента матрицы моментов. Для этого выберем элемент z_{ij}, построенный на паре RWG-элементов с номерами i и j. В данном случае интегрирование ведется по паре треугольников T_j^+ и T_j^-, а подынтегральная функция содержит множитель $1/|r - r_c^{\pm}|$, где r – точка, принадлежащая треугольникам T_j^+ и T_j^-, а $r_c^{\pm}$ – центр масс треугольников T_i^+ и T_i^- соответственно. В случае, когда $i \neq j$, можно использовать следующий метод приближенного интегрирования.

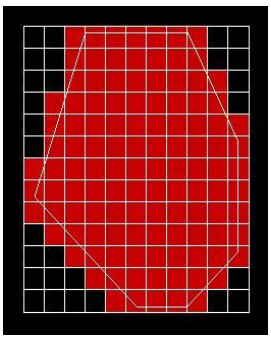


Рис. 5. Покрытие исходной области P квадратами со сторой, равной шагу сетки

Fig. 5. Covering the original P area with squares with a side equal to the grid spacing

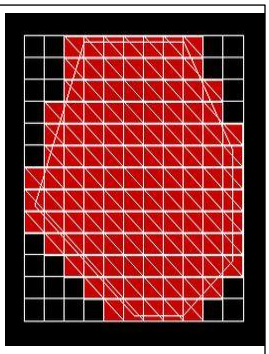


Рис. 6. Итоговая триангуляция области P

Fig. 6. The final triangulation of P area

Каждый из треугольников T_j разделим на маленькие треугольники, как показано на рисунке 7а. Для этого каждую сторону треугольника разобьем на n равных частей и проведем линии, соединяющие соответствующие узлы разбиения. Внутри каждого маленького треугольника выберем точку пересечения медиан (то есть центр масс треугольника, см. рис. 7б) и проведем интегрирование, просуммировав значения подынтегральной функции в каждой такой точке, умноженные на площадь треугольника.

Когда RWG-элементы пересекаются по одному из треугольников или полностью совпадают (например, при вычислении элемента z_{ii}), возникает ситуация, приводящая к делению на нуль. Чтобы этого избежать, в квадратурной формуле можно использовать не центры масс, а так называемые «смещенные» центры масс. Их можно рассчитать как середину средней линии, параллельной диагональному ребру треугольника (см. рис. 7в). Тогда деление на нуль не возникнет. Для построения всей матрицы моментов требуется произвести перебор по всем RWG-элементам. Напомним, что размер исходной матрицы зависит от размера треугольной сетки и равен $N \times N$, где N – количество RWG-элементов. Согласно (27) и (28), каждый элемент матрицы и правая часть могут быть вычислены независимо, поэтому каждая CUDA-нить исполняемого ядра, отвечающая за сборку матрицы моментов, вычисляет соответствующий элемент параллельно с другими ни-

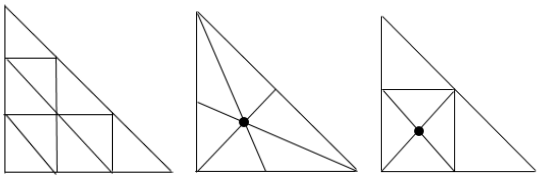


Рис. 7. Алгоритм приближенного интегрирования: а) разбиение треугольников T_j на треугольники, одинаковые по площади и форме; б) вычисление центра масс треугольника; в) вычисление смещенного центра масс треугольника

Fig. 7. An approximate integration algorithm: а) dividing T_j triangles into triangles of equal area and shape; б) calculating the triangle mass center; в) calculating the displaced triangle mass center

тями. На этом этап формирования матрицы СЛАУ можно считать завершенным. Полученная СЛАУ может быть решена методом Гаусса или одним из итерационных методов.

Численные результаты

Для расчета токов на экране заданной формы был написан программный модуль на языке программирования C++, содержащий визуализатор триангуляции, реализованный на SFML. Код для исполнения на графическом процессоре написан на языке C/CUDA, предоставляемом NVidia с поддержкой CUDA API для компиляции кода, исполняемого на GPU. При запуске основного вычислительного ядра, отвечающего за расчет элементов матрицы моментов, были использованы двумерная сетка блоков и двумерные блоки нитей. Такой подход удобен тем, что матрица моментов представляется в памяти в виде двумерного массива данных. Для запуска программы был использован ноутбук с процессором Intel Core i5-8265U (1,8 ГГц), оперативной памятью 8 ГБ и графическим устройством GeForce MX250, операционная система – Fedora Linux 35.

Рассмотрен случай нормального падения электромагнитной волны с длиной, равной λ. Представленные ниже расчеты выполнены для плоских экранов различной формы: квадратной пластины со стороной, равной λ, и правильного восьмиугольника, вписанного в окружность радиуса λ.

На рисунке 8 представлен график распределения абсолютных значений составляющей

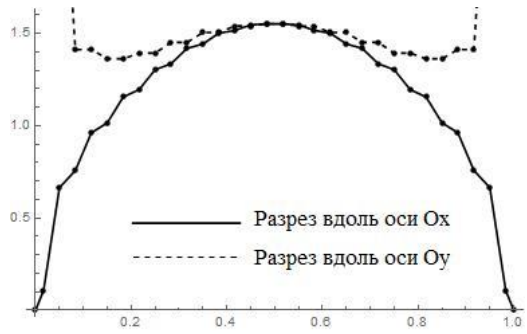


Рис. 8. Распределение тока на поверхности квадратной пластины вдоль линий, параллельных осям OX и OY

Fig. 8. Current distribution on the surface of a square plate along the lines parallel to OX and OY axes

тока $|J_x|$ на поверхности квадратной пластины со стороной, равной длине волны, вдоль линий, параллельных осям OX и OY. Сетка, покрывающая квадратную пластину, состоит из 450 треугольников, что соответствует 645 RWG-элементам. График распределения $|J_x|$ построен вдоль линий, заданных прямыми $y = 0{,}5\lambda$ и $x = 0{,}5\lambda$.

На рисунке 9 представлены графики распределения абсолютных значений составляющей тока $|J_x|$ на поверхности правильного восьмиугольника, вписанного в окружность с радиу-

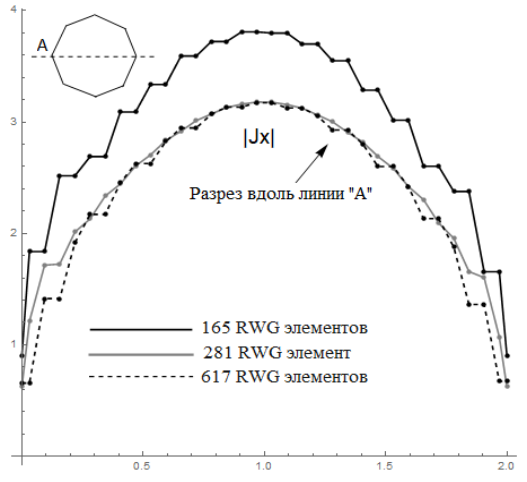


Рис. 9. Распределение тока на поверхности правильного восьмиугольника вдоль линии А с разным уровнем дискретизации исходной области

Fig. 9. Current distribution on the surface of a regular octagon along A line with different sampling levels of the original area

сом, равным длине волны, вдоль линии A, параллельной оси OX с различным уровнем дискретизации области: 165, 281 и 617 RWG-элементов соответственно. Чем ниже частота дискретизации, тем более грубую аппроксимацию площади мы получим (то есть увеличивается площадь исходного экрана). Все три распределения построены по точкам, лежащим внутри исходной области

На рисунке 10 отражены данные о времени, необходимом для формирования матрицы моментов на процессорах CPU и GPU в зависимости от количества RWG-элементов. Напомним, что число RWG-элементов напрямую зависит от размера исходной области и желаемого уровня дискретизации. Максимальное 20-кратное ускорение достигается при большом количестве RWG-элементов.

Рис. 10. Время работы алгоритма на CPU и GPU

Fig. 10. The algorithm running time on CPU and GPU

Заключение

Предложен алгоритм решения задачи дифракции электромагнитных волн на плоском металлическом экране произвольной формы. Задача сведена к решению интегрального уравнения электрического поля (EFIE) методом моментов. В качестве базисных и пробных функций использованы одни и те же RWG-функции, что соответствует идее метода Галеркина. Подробно обсуждены два основных этапа численного алгоритма – триангуляция исходной области с последующим формированием массива RWG-элементов и вычисление элементов матрицы моментов. Для параллельной реализации алгоритма использована технология CUDA.

Предложен и реализован простой и быстрый алгоритм триангуляции на GPU для экранов различной формы. Самый трудоемкий этап – заполнение матрицы моментов – также реализован на графическом процессоре. Получено 20-кратное ускорение работы алгоритма на видеокарте. Приведены численные результаты для квадратной и восьмиугольной металлических пластин с различной степенью дискретизации. Полученные графики показали хорошее соответствие с результатами предыдущих работ.

Таким образом, предложенный параллельный алгоритм может быть использован для ускорения проектирования антенн различной формы [24], а также для решения задач дифракции плоских электромагнитных волн на экранах с произвольными границами.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Nagasaka T., Kobayashi K. Wiener–Hopf analysis of the plane wave diffraction by a thin material strip. IEICE Transactions on Electronics, 2017, vol. E100C, no. 1, pp. 11–19. DOI: 10.1587/transele.E100.C.11.

2. Luz E., Granot E., Malomed B.A. Analytical boundary-based method for diffraction calculations. J. of Optics, 2019, vol. 22, no. 2, art. 025601. DOI: 10.1088/2040-8986/ab60c1.

3. Nethercote M.A., Assier R.C., Abrahams I.D. Analytical methods for perfect wedge diffraction: A review. Wave Motion, 2020, vol. 93, art. 102479. DOI: 10.1016/j.wavemoti.2019.102479.

4. Tumakov D.N., Tukhvatova A.R. Diffraction of an electromagnetic wave by gaps between plates. Lobachevskii J. of Mathematics, 2012, vol. 33, no. 4, pp. 364–373. DOI: 10.1134/S1995080212040051.

5. Tumakov D.N. Iterative method for solving the problem of scattering of an electromagnetic wave by a partially shielded conducting sphere. Applied Mathematical Sciences, 2014, vol. 8, no. 118, pp. 5887–5898. DOI: 10.12988/AMS.2014.48657.

6. Selezov I.T., Kryvonos Y.G., Gandzha I.S. Some analytical and numerical methods in the theory of wave propagation and diffraction. In: Wave Propagation and Diffraction. Foundations of Engineering Mechanics. Springer Publ., Singapore, 2018, pp. 1–24. DOI: 10.1007/978-981-10-4923-1_1.

7. Shibata K., Kobayashi M. Difference between the method of moments and the finite element method for estimation of complex permittivity in liquids using a coaxial probe. Proc. Int. Symposium EMC, 2019, pp. 100–105. DOI: 10.1109/EMCEurope.2019.8871604.

8. Taflove A., Hagness S. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Artech House Publ., Norwood, 2000, 1038 p.

9. Молостов И.П., Щербинин В.В. Применение технологии NVIDIA CUDA для численного моделирования распространения электромагнитных импульсов // Изв. АлтГУ. 2015. Т. 85. № 1. С. 39–43. DOI: 10.14258/izvasu(2015)1.1-06.

10. Zhang Y., Mei X., Lin H. OpenMP-CUDA accelerated moment method for homogeneous dielectric objects. Proc. IEEE APSURSI, 2014, pp. 1634–1635. DOI: 10.1109/APS.2014.6905143.

11. Li J., Zhang Z., Zheng K., Wu C., Gao S. GPU accelerated non-illuminated graphical electromagnetic computing method with high accuracy. Optik, 2017, vol. 142, pp. 523–528. DOI: 10.1016/J.IJLEO.2017.05.104.

12. Peng S., Nie Z.P. Acceleration of the method of moments calculations by using graphics processing units. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, vol. 56, no. 7, pp. 2130–2133. DOI: 10.1109/TAP.2008.924768.

13. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley & Sons Publ., NY, 2016, 1095 p.

14. Gibson W.C. The Method of Moments in Electromagnetics. Chapman and Hall/CRC Publ., NY, 2007, 288 p. DOI: 10.1201/9781420061468.

15. Harrington R.F. Field Computation by Moment Methods. Wiley-IEEE Press, 1993, 240 p. DOI: 10.1109/9780470544631.

16. Никольский В.В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. М.: Наука, 1967. 460 с.

17. Sadiku M.N. Elements of Electromagnetics. Oxford University Press, NY, 2001, 896 p.

18. Mittra R., Klein C.A. Stability and convergence of moment method solutions. In: Topics in Applied Physics, pp. 129–163. DOI: 10.1007/3540070729_26.

19. De Loera J.A., Rambau J., Santos F. Triangulations: Structures for Algorithms and Applications. Springer Publ., Berlin, 2010, 534 p.

20. Смирнов Ю.Г., Медведик М.Ю., Максимова М.А. Решение задачи дифракции электромагнитной волны на экранах сложной формы // Изв. высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2012. № 4. С. 59–72.

21. Tumakov D., Markina A., Badriev I. Fast method for designing a well-matched symmetrical four-tooth-shaped microstrip antenna for Wi-Fi applications. J. of Physics: Conf. Ser., 2019, vol. 1158, 042029. DOI: 10.1088/1742-6596/1158/4/042029.

22. Rao M.S., Wilton R.D., Glisson A.W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, vol. 30, no. 3, pp. 409–418. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142818.

23. Giniyatova D., Tumakov D., Markina A. Solving problem of electromagnetic wave diffraction by a metal plate using CUDA. Proc. IEEE EWDTS, 2020, pp. 324–329. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224674.

24. Markina A., Tumakov D. Designing the four-tooth-shaped microstrip antenna for Wi-Fi applications. Proc. Int. Conf. SUMMA, 2019, pp. 25–30. DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947603.

Software & Systems Received 25.07.22
DOI: 10.15827/0236-235X.139.305-315 2022, vol. 35, no. 3, pp. 305–315

Solving the problem of electromagnetic wave diffraction on arbitrary shape screens using CUDA

D.Kh. Giniyatova [1], *Senior Lecturer, normaliti@gmail.com*
A.G. Markina [1], *Junior Researcher, m8angelina@gmail.com*

[1] *Kazan Federal University, Institute of Computational Mathematics and Information Technologies, Kazan, 420008, Russian Federation*

Abstract. The paper considers the algorithm for solving the problem of electromagnetic (EM) wave diffraction on flat arbitrary shape screens using the CUDA parallel programming technology.

The problem is formulated as an integro-differential equation and solved by the method of moments (Galerkin method). The authors have chosen RWG functions as basis and testing functions. They have developed

a simple and fast algorithm for triangulating a domain with an arbitrary boundary to construct the corresponding RWG elements on GPU. Numerical results were presented for the diffraction problem on canonical and complex shape screens. The obtained solution is in good agreement with the results of the previous studies.

The paper also presents a comparative analysis of the execution time of serial and parallel algorithms. It is shown that the use of CUDA technology significantly speeds up the solving of the problem of EM wave diffraction on flat metal arbitrary shape screens.

Keywords: diffraction problem, CUDA technology, method of moments, RWG functions, parallel algorithms.

Acknowledgements. *This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").*

References

1. Nagasaka T., Kobayashi K. Wiener–Hopf analysis of the plane wave diffraction by a thin material strip. *IEICE Transactions on Electronics*, 2017, vol. E100C, no. 1, pp. 11–19. DOI: 10.1587/transele.E100.C.11.
2. Luz E., Granot E., Malomed B.A. Analytical boundary-based method for diffraction calculations. *J. of Optics*, 2019, vol. 22, no. 2, art. 025601. DOI: 10.1088/2040-8986/ab60c1.
3. Nethercote M.A., Assier R.C., Abrahams I.D. Analytical methods for perfect wedge diffraction: A review. *Wave Motion*, 2020, vol. 93, art. 102479. DOI: 10.1016/j.wavemoti.2019.102479.
4. Tumakov D.N., Tukhvatova A.R. Diffraction of an electromagnetic wave by gaps between plates. *Lobachevskii J. of Mathematics*, 2012, vol. 33, no. 4, pp. 364–373. DOI: 10.1134/S1995080212040051.
5. Tumakov D.N. Iterative method for solving the problem of scattering of an electromagnetic wave by a partially shielded conducting sphere. *Applied Mathematical Sciences*, 2014, vol. 8, no. 118, pp. 5887–5898. DOI: 10.12988/AMS.2014.48657.
6. Selezov I.T., Kryvonos Y.G., Gandzha I.S. Some analytical and numerical methods in the theory of wave propagation and diffraction. In: *Wave Propagation and Diffraction. Foundations of Engineering Mechanics*. Springer Publ., Singapore, 2018, pp. 1–24. DOI: 10.1007/978-981-10-4923-1_1.
7. Shibata K., Kobayashi M. Difference between the method of moments and the finite element method for estimation of complex permittivity in liquids using a coaxial probe. *Proc. Int. Symposium EMC*, 2019, pp. 100–105. DOI: 10.1109/EMCEurope.2019.8871604.
8. Taflove A., Hagness S. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Artech House Publ., Norwood, 2000, 1038 p.
9. Molostov I.P., Scherbinin V.V. Application of NVIDIA CUDA technology for numerical simulation of electromagnetic pulses propagation. *Izv. AltGU*, 2015, vol. 85, no. 1, pp. 39–43. DOI: 10.14258/izvasu(2015) 1.1-06 (in Russ.).
10. Zhang Y., Mei X., Lin H. OpenMP-CUDA accelerated moment method for homogeneous dielectric objects. *Proc. IEEE APSURSI*, 2014, pp. 1634–1635. DOI: 10.1109/APS.2014.6905143.
11. Li J., Zhang Z., Zheng K., Wu C., Gao S. GPU accelerated non-illuminated graphical electromagnetic computing method with high accuracy. *Optik*, 2017, vol. 142, pp. 523–528. DOI: 10.1016/J.IJLEO.2017. 05.104.
12. Peng S., Nie Z.P. Acceleration of the method of moments calculations by using graphics processing units. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, vol. 56, no. 7, pp. 2130–2133. DOI: 10.1109/ TAP.2008.924768.
13. Balanis C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons Publ., NY, 2016, 1095 p.
14. Gibson W.C. *The Method of Moments in Electromagnetics*. Chapman and Hall/CRC Publ., NY, 2007, 288 p. DOI: 10.1201/9781420061468.
15. Harrington R.F. *Field Computation by Moment Methods*. Wiley-IEEE Press, 1993, 240 p. DOI: 10.1109/9780470544631.
16. Nikolskiy V.V. *Variational Methods for Internal Problems of Electrodynamics*. Moscow, 1967, 460 p. (in Russ.).
17. Sadiku M.N. *Elements of Electromagnetics*. Oxford University Press, NY, 2001, 896 p.
18. Mittra R., Klein C.A. Stability and convergence of moment method solutions. In: *Topics in Applied Physics*, pp. 129–163. DOI: 10.1007/3540070729_26.
19. De Loera J.A., Rambau J., Santos F. *Triangulations: Structures for Algorithms and Applications*. Springer Publ., Berlin, 2010, 534 p.

20. Smirnov Yu.G., Medvedik M.Yu., Maksimov M.A. The solution of the problem of electromagnetic wave diffraction on screens of complex shape. *University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*, 2012, vol. 4, pp. 59–72 (in Russ.).

21. Tumakov D., Markina A., Badriev I. Fast method for designing a well-matched symmetrical four-tooth-shaped microstrip antenna for Wi-Fi applications. *J. of Physics: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1158, 042029. DOI: 10.1088/1742-6596/1158/4/042029.

22. Rao M.S., Wilton R.D., Glisson A.W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, vol. 30, no. 3, pp. 409–418. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142818.

23. Giniyatova D., Tumakov D., Markina A. Solving problem of electromagnetic wave diffraction by a metal plate using CUDA. *Proc. IEEE EWDTS*, 2020, pp. 324–329. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224674.

24. Markina A., Tumakov D. Designing the four-tooth-shaped microstrip antenna for Wi-Fi applications. *Proc. Int. Conf. SUMMA*, 2019, pp. 25–30. DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947603.

Для цитирования

Гиниятова Д.Х., Маркина А.Г. Решение задачи дифракции электромагнитной волны на экранах произвольной формы с использованием технологии CUDA // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 305–315. DOI: 10.15827/0236-235X.139.305-315.

For citation

Giniyatova D.Kh., Markina A.G. Solving the problem of electromagnetic wave diffraction on arbitrary shape screens using CUDA. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 305–315 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.305-315.

УДК 517.958
DOI: 10.15827/0236-235X.139.316-328
Дата подачи статьи: 01.08.22, после доработки: 08.08.22
2022. Т. 35. № 3. С. 316–328

Истинные и фиктивные собственные значения системы граничных интегральных уравнений Мюллера

И.В. Кетов [1], *магистрант, ivlketov@gmail.com*
А.О. Октябрьская [2], *аспирант, alina.oktyabrskaya.21@gmail.com*
А.О. Спиридонов [3], *к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, aospiridonov@gmail.com*
Е.М. Карчевский [3], *д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта, главный научный сотрудник, ekarchev70@gmail.com*

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*
[2] *Государственный университет штата Луизиана, г. Батон-Руж, LA 70803, США*
[3] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, НИЛ «Высокопроизводительные вычисления, медицинская кибернетика и машинное зрение» (Институт вычислительной математики и информационных технологий), г. Казань, 420008, Россия*

Теоретически и численно исследован спектр нелинейной задачи на собственные значения системы граничных интегральных уравнений Мюллера. В общем случае собственные значения этой задачи распадаются на два множества – множество истинных собственных значений, соответствующих исходной задаче на собственные значения оператора Гельмгольца, и множество фиктивных собственных значений, которые соответствуют так называемой вывернутой наизнанку задаче. Поэтому важно определить условия, при которых исходная задача на собственные значения оператора Гельмгольца на плоскости и соответствующая задача для интегрального оператора будут спектрально эквивалентны.

Исходная задача на собственные значения оператора Гельмгольца сведена к нелинейной задаче на собственные значения системы граничных интегральных уравнений Мюллера. Решения исходной задачи и задачи, вывернутой наизнанку, найдены методом разделения переменных. Решение системы граничных интегральных уравнений Мюллера построено методом Галеркина.

Сформулирована и доказана теорема эквивалентности для исходной задачи на собственные значения оператора Гельмгольца и системы граничных интегральных уравнений Мюллера. Численно проверено, что спектр нелинейной задачи на собственные значения системы граничных интегральных уравнений Мюллера, помимо истинных собственных значений, содержит фиктивные. Определен диапазон, который состоит только из фиктивных собственных значений, и показано, что эти фиктивные собственные значения явно отделены от истинных собственных значений.

Доказанная теорема эквивалентности дает теоретическое обоснование применимости метода граничных интегральных уравнений Мюллера. Разработанные компьютерные программы могут быть непосредственно использованы при моделировании микродисковых лазеров.

Ключевые слова: *задача на собственные значения, система граничных интегральных уравнений Мюллера, микродисковый лазер, активная область, спектральная эквивалентность*.

Микроволновые лазеры на основе двумерных материалов чрезвычайно интересны благодаря своим малым размерам и низким порогам [1]. Численное моделирование таких микролазеров основано на решении задачи на собственные значения оператора Гельмгольца на плоскости. В классическом подходе частоты рассматриваются как комплекснозначные собственные значения (Complex-Frequency Eigenvalue Problem, CFEP). Однако этот подход имеет ряд недостатков и не учитывает некоторые важные особенности модели (рассматриваются только пассивные микрорезонаторы). Наряду с CFEP известна формулировка, первоначально предложенная в [2], в которой предполагается, что собственные числа являются вещественными, а микрорезонатор считается активным (Lasing Eigenvalue Problem, LEP). В настоящей работе с целью использования одной теоретической основы для обеих моделей LEP и CFEP рассмотрена модель, называемая обобщенной задачей на собственные значения

относительно комплексной частоты (Generalized Complex-Frequency Eigenvalue Problem, GCFEP) [3].

Для решения GCFEP двумерная задача для уравнения Гельмгольца сведена к нелинейной задаче на собственные значения системы граничных интегральных уравнений Мюллера [4]. В общем случае собственные значения этой задачи распадаются на два множества – множество истинных собственных значений, соответствующих GCFEP, и множество фиктивных собственных значений, соответствующих так называемой вывернутой наизнанку задаче [5]. Система граничных интегральных уравнений Мюллера имеет фиктивные собственные значения, поскольку показатель преломления в активной области в формулировке GCFEP – комплексное число. Если электромагнитные характеристики в каждой области являются вещественными, то задача, вывернутая наизнанку, имеет только тривиальное решение, и система Мюллера не имеет фиктивных собственных значений [5]. Первоначально Мюллер предложил использовать систему в этом конкретном случае. Тогда система уравнений Мюллера не имеет ни одного вещественного собственного значения. Все собственные значения комплекснозначные [6]. Более того, эта система является системой Фредгольма [7]. Следовательно, она хорошо подходит для решения задачи рассеяния с вещественнозначной частотой в пассивном электромагнитном поле.

Фиктивные собственные значения рассмотрены в [8] при решении внешней задачи Неймана для уравнения Гельмгольца. В [6] предложены различные модификации интегральных уравнений, которые позволяют избежать случайного вычисления фиктивных собственных значений.

В настоящей работе рассмотрен спектр нелинейной задачи на собственные значения системы граничных интегральных уравнений Мюллера, порожденной GCFEP. Получено условие, при котором исходная GCFEP и система граничных интегральных уравнений Мюллера эквивалентны. Численно подтверждено, что задача на собственные значения системы Мюллера содержит фиктивные решения. При этом наборы истинных и фиктивных собственных значений явно отделяются друг от друга.

Обобщенная задача на собственные значения относительно комплексной частоты

Предположим, что граница Г является дважды непрерывно дифференцируемой кривой, и введем внешний нормальный единичный вектор n к этой границе (рис. 1). Обозначим через U пространство всех комплекснозначных функций, непрерывных на $\overline{\Omega_i}$, $\overline{\Omega_e}$ и дважды непрерывно дифференцируемых на Ω_i, Ω_e. Пусть $\mathbb{L}$ – поверхность Римана функции $\ln k$. Для любого заданного значения параметра $\gamma \in \mathbb{R}$ ненулевую функцию $u \in U$ будем называть собственной функцией GCFEP, соответствующей собственному значению $k \in \mathbb{L}$, если выполняются

– уравнения Гельмгольца

$$\Delta u + k_i^2 u = 0,\ x \in \Omega_i, \quad (1)$$

$$\Delta u + k_e^2 u = 0,\ x \in \Omega_e, \quad (2)$$

– граничные условия

$$u^- = u^+, \quad \eta_i \frac{\partial u^-}{\partial n} = \eta_e \frac{\partial u^+}{\partial n}, \quad x \in \Gamma, \quad (3)$$

– условие излучения Рейхардта [3, 9]

$$u = \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_l H_l^{(1)}(k_e r)\exp(il\varphi),\ r \ge R_0. \quad (4)$$

Здесь $k_j = k\nu_j$, $u = H_3$, $\eta_j = \nu_j^{-2}$ в случае H-поляризации и $u = E_3$, $\eta_j = 1$ в случае E-поляризации, $j = i, e$; $H_l^{(1)}(z)$ – функция Ханкеля первого рода порядка l; r и φ – полярные координаты точки x; $u^-(u^+)$ – предельное значение функции изнутри (извне) контура Г.

Следуя [10], предположим, что предельные значения нормальной производной на границе существуют в том смысле, что пределы

$$\frac{\partial u^{\pm}}{\partial n}(x) = \lim_{h \to +0} \left(n(x), \operatorname{grad} u(x \pm hn(x)) \right),\ x \in \Gamma, \quad (5)$$

существуют равномерно на Г. Заметим, что для любого решения u уравнения (1) в Ω_e ряд (4)

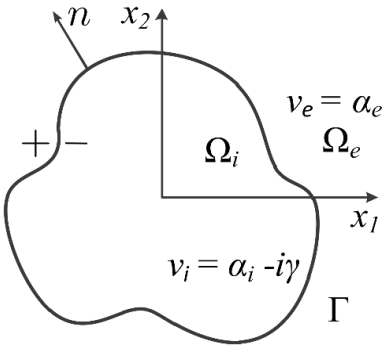


Рис. 1. Геометрия равномерного активного двумерного диэлектрического резонатора произвольной формы исходной GCFEP

Fig. 1. The geometry of a uniformly active 2D dielectric resonator of an arbitrary shape of the original GCFEP

сходится равномерно и абсолютно в любой замкнутой области $a \le r \le b$, где a и b – произвольные числа, такие что $R_0 < a < b < \infty$; и этот ряд бесконечно дифференцируем по частям [3].

Обобщенная задача на собственные значения относительно комплексной частоты, вывернутая наизнанку

Предположим, что показатель преломления в ограниченной области Ω_i есть $v_e = \alpha_e$, а показатель преломления в неограниченной области Ω_e есть $v_i = \alpha_i - i\gamma$ (рис. 2). Для любого заданного значения параметра $\gamma \in \mathbb{R}$ ненулевую функцию $v \in U$ будем называть собственной функцией GCFEP, вывернутой наизнанку в случае E-поляризации, соответствующей собственному значению $k \in \mathbb{L}$, если выполняются соотношения

$$\Delta v + k_e^2 v = 0,\ x \in \Omega_i, \tag{6}$$

$$\Delta v + k_i^2 v = 0,\ x \in \Omega_e, \tag{7}$$

$$v^- = v^+,\ \frac{\partial v^-}{\partial n} = \frac{\partial v^+}{\partial n},\ x \in \Gamma, \tag{8}$$

$$v = \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_l H_l^{(1)}(k_i r)\exp(il\varphi),\ r \ge R_0. \tag{9}$$

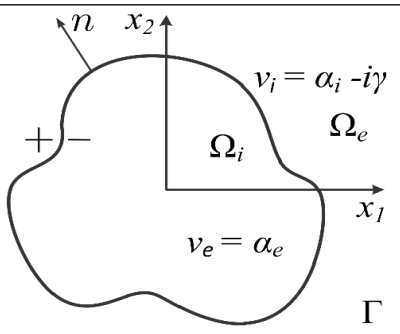


Рис. 2. Геометрия равномерного активного двумерного диэлектрического резонатора произвольной формы GCFEP, вывернутой наизнанку

Fig. 2. The geometry of a uniformly active 2D dielectric resonator of an arbitrary shape of the GCFEP turned inside out

Система граничных интегральных уравнений Мюллера

В [11] доказано, что если u является собственной функцией задачи (1)–(4), соответствующей собственному значению $k \in \mathbb{L}$ при произвольном значении параметра $\gamma \in \mathbb{R}$, то справедливы следующие интегральные представления [10]:

$$\int_\Gamma \left(u^-(y)\frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(y)} - \frac{\partial u^-}{\partial n}(y)\Phi_i(x,y) \right) dl(y) = \begin{cases} -u(x), & x \in \Omega_i, \\ 0, & x \in \Omega_e, \end{cases} \tag{10}$$

$$\int_\Gamma \left(u^+(y)\frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(y)} - \frac{\partial u^+}{\partial n}(y)\Phi_e(x,y) \right) dl(y) = \begin{cases} 0, & x \in \Omega_i, \\ u(x), & x \in \Omega_e, \end{cases} \tag{11}$$

где $\Phi_m(x,y) = (i/4)H_0^{(1)}(k_m |x-y|)$, $m = i, e$. Перейдем к пределу в (10) и используем известное свойство потенциалов двойного слоя и непрерывность потенциалов простого слоя, получим

$$u^-(x) = -\int_\Gamma \frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(y)} u^-(y)dl(y) + \frac{1}{2}u^-(x) + \int_\Gamma \Phi_i(x,y)\frac{\partial u^-}{\partial n}(y)dl(y),\quad x \in \Gamma. \tag{12}$$

Аналогичным образом из (11) получим, что

$$u^+(x) = \int_\Gamma \frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(y)} u^+(y)dl(y) + \frac{1}{2}u^+(x) - \int_\Gamma \Phi_e(x,y)\frac{\partial u^+}{\partial n}(y)dl(y),\ x \in \Gamma. \tag{13}$$

Использовав условия на границе (3), определим функции

$$\varphi = u^+ = u^-,\ \psi = \frac{\eta_e + \eta_i}{2\eta_i}\frac{\partial u^+}{\partial n} = \frac{\eta_e + \eta_i}{2\eta_e}\frac{\partial u^-}{\partial n},\ x \in \Gamma. \tag{14}$$

Почленно сложим (12), (13) и, использовав (14), получим

$$\varphi(x) + \int_\Gamma \left(\frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(y)} - \frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(y)} \right)\varphi(y)dl(y) + \int_\Gamma \left(\frac{2\eta_i}{\eta_e + \eta_i}\Phi_e(x,y) - \frac{2\eta_e}{\eta_e + \eta_i}\Phi_i(x,y) \right)\psi(y)dl(y) = 0, \tag{15}$$

$x \in \Gamma$.

Вычислив нормальные производные в (10) и (11), перейдя к пределу $x \to \Gamma$, использовав определения (14) и хорошо известные свойства потенциалов [10], получим

$$\psi(x) + \int_\Gamma \left(\frac{\partial^2 \Phi_i(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)} - \frac{\partial^2 \Phi_e(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)} \right)\varphi(y)dl(y) + \int_\Gamma \left(\frac{2\eta_i}{\eta_e + \eta_i}\frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(x)} - \frac{2\eta_e}{\eta_e + \eta_i}\frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(x)} \right)\psi(y)dl(y) = 0, \tag{16}$$

$x \in \Gamma$.

Набор интегральных уравнений (15), (16) называется системой граничных интегральных

уравнений Мюллера (Muller BIEs) [4]. Запишем систему в более удобной форме:

$$\varphi(x)+\int_\Gamma K_{1,1}(x,y)\varphi(y)dl(y)+$$

$$+\int_\Gamma K_{1,2}(x,y)\psi(y)dl(y)=0,\ x\in\Gamma,$$

$$\psi(x)+\int_\Gamma K_{2,1}(x,y)\varphi(y)dl(y)+$$

$$+\int_\Gamma K_{2,2}(x,y)\psi(y)dl(y)=0,\ x\in\Gamma,$$

где ядра интегральных уравнений определяются как

$$K_{1,1}(x,y)=\frac{\partial\Phi_i(x,y)}{\partial n(y)}-\frac{\partial\Phi_e(x,y)}{\partial n(y)},\ x,y\in\Gamma, \quad (17)$$

$$K_{1,2}(x,y)=\frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\Phi_e(x,y)-\frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\Phi_i(x,y), \quad (18)$$

$x, y \in \Gamma$,

$$K_{2,1}(x,y)=\frac{\partial^2\Phi_i(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)}-\frac{\partial^2\Phi_e(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)},\ x,y\in\Gamma, \quad (19)$$

$$K_{2,2}(x,y)=\frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\frac{\partial\Phi_e(x,y)}{\partial n(x)}-\frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\frac{\partial\Phi_i(x,y)}{\partial n(x)}, \quad (20)$$

$x, y \in \Gamma$.

В [12] доказано, что ядро (17) непрерывно, (18) непрерывно при $\eta_i = \eta_j$ и имеет слабую особенность при $\eta_i \neq \eta_j$, ядро (19) имеет слабую особенность, ядро (20) непрерывно.

Эквивалентность

Теорема. Пусть дано значение параметра $\gamma \in \mathbb{R}$. Справедливы следующие утверждения.

1. Если $u \in U$ – собственная функция задачи (1)–(4), соответствующая собственному значению $k \in \mathbb{L}$, тогда определенные в (14) функции φ и ψ принадлежат банахову пространству $C(\Gamma)$ непрерывных на Γ функций и являются нетривиальным решением (φ, ψ) системы (15), (16) с тем же значением k.

2. Пусть для данного значения $k \in \mathbb{L}$ система граничных интегральных уравнений Мюллера (15), (16) имеет нетривиальное решение $(\varphi, \psi) \in C(\Gamma) \times C(\Gamma)$ и GCFEP, вывернутая наизнанку, (6)–(9), имеет только тривиальное решение, тогда функция u, определенная как

$$u(x)=-\int_\Gamma\left(\varphi(y)\frac{\partial\Phi_i(x,y)}{\partial n(y)}-\frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\psi(y)\Phi_i(x,y)\right)dl(y),$$

$x \in \Omega_i$, (21)

$$u(x)=\int_\Gamma\left(\varphi(y)\frac{\partial\Phi_e(x,y)}{\partial n(y)}-\frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\psi(y)\Phi_e(x,y)\right)dl(y),$$

$x \in \Omega_e$, (22)

является собственной функцией исходной GCFEP (1)–(4).

Доказательство. Докажем первое утверждение теоремы. Каждая собственная функция (1)–(4) непрерывна на $\overline{\Omega_i}$ и $\overline{\Omega_e}$, следовательно, u^+ и u^- принадлежат $C(\Gamma)$. Значит, функции $\partial u^+/\partial n$ и $\partial u^-/\partial n$, определенные в (5), принадлежат $C(\Gamma)$ как равномерные пределы непрерывных функций. Очевидно, что определенный в (14) вектор (φ, ψ) – решение (15), (16) по построению этой системы уравнений. Предположим, что $\varphi = \psi = 0$, тогда, использовав (10), (11) и (14), получим $u = 0$, $x \in \mathbb{R}^2$, что противоречит предположению, что u – собственная функция задачи (1)–(4).

Докажем второе утверждение теоремы. Пусть вектор $(\varphi, \psi) \in C(\Gamma) \times C(\Gamma)$ является решением (15), (16), соответствующим значению параметра $\gamma \in \mathbb{R}$ и собственному значению $k \in \mathbb{L}$. Определим функцию

$$v(x)=-\int_\Gamma\left(\varphi(y)\frac{\partial\Phi_e(x,y)}{\partial n(y)}-\frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\psi(y)\Phi_e(x,y)\right)dl(y),$$

$x \in \Omega_i$, (23)

$$v(x)=-\int_\Gamma\left(\varphi(y)\frac{\partial\Phi_i(x,y)}{\partial n(y)}-\frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\psi(y)\Phi_i(x,y)\right)dl(y),$$

$x \in \Omega_e$. (24)

Докажем, что функция v удовлетворяет всем условиям (6)–(9) GCFEP, вывернутой наизнанку. Во-первых, отметим, что функция v дважды непрерывно дифференцируема на Ω_i, Ω_e и удовлетворяет (6), (7) как линейная комбинация потенциалов простого и двойного слоев с непрерывными плотностями [10]. Во-вторых, эта линейная комбинация непрерывна на $\overline{\Omega_i}$ и $\overline{\Omega_e}$. Пределы (5) существуют равномерно на Γ. Использовав теорему сложения Графа [13], видим, что функция Φ_i удовлетворяет (9). Тогда из (24) следует, что функция v удовлетворяет условию излучения Рейхардта (9).

Граничные условия (8) также выполняются. Проверим первое условие. Перейдем к пределу в (23), (24) при $x \to \Gamma$ и используем свойства потенциалов двойного слоя и непрерывность потенциалов простого слоя [10]. Получим

$$v^-(x)=-\int_\Gamma\frac{\partial\Phi_e(x,y)}{\partial n(y)}\varphi(y)dl(y)+\frac{1}{2}\varphi(x)+$$

$$+\int_\Gamma\frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\Phi_e(x,y)\psi(y)dl(y),\quad x\in\Gamma, \quad (25)$$

$$v^+(x) = -\int_\Gamma \frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(y)}\varphi(y)dl(y) - \frac{1}{2}\varphi(x) + \\ + \int_\Gamma \frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\Phi_i(x,y)\psi(y)dl(y), \quad x \in \Gamma. \tag{26}$$

Следовательно,

$$v^-(x) - v^+(x) = \varphi(x) + \\ + \int_\Gamma \left(\frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(y)} - \frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(y)} \right)\varphi(y)dl(y) + \\ + \int_\Gamma \left(\frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\Phi_e(x,y) - \frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\Phi_i(x,y) \right)\psi(y)dl(y), \\ x \in \Gamma. \tag{27}$$

Поскольку (φ, ψ) – решение (15), получим $v^- - v^+ = 0$, $x \in \Gamma$.

Проверим второе условие в (8). Вычислим нормальные производные в (23) и (24), перейдем к пределу при $x \to \Gamma$ и используем хорошо известные свойства потенциалов [10]. Получим

$$\frac{\partial v^-}{\partial n}(x) - \frac{\partial v^+}{\partial n}(x) = \psi(x) + \\ + \int_\Gamma \left(\frac{\partial^2 \Phi_i(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)} - \frac{\partial^2 \Phi_e(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)} \right)\varphi(y)dl(y) + \\ + \int_\Gamma \left(\frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(x)} - \frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(x)} \right)\psi(y)dl(y), \\ x \in \Gamma. \tag{28}$$

Поскольку (φ, ψ) – решение (16), получим $\partial v^-/\partial n - \partial v^+/\partial n = 0$, $x \in \Gamma$. Таким образом, функция v удовлетворяет всем условиям (6)–(9) GCFEP, вывернутой наизнанку.

Определим функцию

$$u(x) = -\int_\Gamma \left(\varphi(y)\frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(y)} - \frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\psi(y)\Phi_i(x,y) \right)dl(y), \\ x \in \Omega_i,$$

$$u(x) = \int_\Gamma \left(\varphi(y)\frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(y)} - \frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\psi(y)\Phi_e(x,y) \right)dl(y), \\ x \in \Omega_e.$$

Использовав свойства потенциалов двойного и простого слоев, вычислим предельные значения функции u и ее нормальных производных. Объединив их с (25)–(28), получим

$$u^+(x) + v^-(x) = \int_\Gamma \frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(y)}\varphi(y)dl(y) + \frac{1}{2}\varphi(x) - \\ - \int_\Gamma \frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\Phi_e(x,y)\psi(y)dl(y) - \\ - \int_\Gamma \frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(y)}\varphi(y)dl(y) + \frac{1}{2}\varphi(x) + \\ + \int_\Gamma \frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\Phi_e(x,y)\psi(y)dl(y), \\ x \in \Gamma,$$

$$u^-(x) - v^+(x) = -\int_\Gamma \frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(y)}\varphi(y)dl(y) + \\ + \frac{1}{2}\varphi(x) + \int_\Gamma \frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\Phi_i(x,y)\psi(y)dl(y) - \\ - \left(-\int_\Gamma \frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(y)}\varphi(y)dl(y) - \frac{1}{2}\varphi(x) + \right. \\ \left. + \int_\Gamma \frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\Phi_i(x,y)\psi(y)dl(y) \right), \\ x \in \Gamma,$$

$$\frac{\partial u^+}{\partial n}(x) + \frac{\partial v^-}{\partial n}(x) = \frac{\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\psi(x) + \frac{\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\psi(x) + \\ + \int_\Gamma \left(\frac{\partial^2 \Phi_e(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)} - \frac{\partial^2 \Phi_e(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)} \right)\varphi(y)\,dl(y) + \\ + \int_\Gamma \left(\frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(x)} - \frac{2\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\frac{\partial \Phi_e(x,y)}{\partial n(x)} \right)\psi(y)dl(y), \\ x \in \Gamma,$$

$$\frac{\partial u^-}{\partial n}(x) - \frac{\partial v^+}{\partial n}(x) = \frac{\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\psi(x) + \frac{\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\psi(x) + \\ + \int_\Gamma \left(\frac{\partial^2 \Phi_i(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)} - \frac{\partial^2 \Phi_i(x,y)}{\partial n(x)\partial n(y)} \right)\varphi(y)dl(y) + \\ + \int_\Gamma \left(\frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(x)} - \frac{2\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\frac{\partial \Phi_i(x,y)}{\partial n(x)} \right)\psi(y)dl(y), \\ x \in \Gamma.$$

Таким образом,

$$u^+ + v^- = \varphi,\ u^- - v^+ = \varphi,\ x \in \Gamma, \tag{29}$$

$$\frac{\partial u^+}{\partial n} + \frac{\partial v^-}{\partial n} = 2\frac{\eta_i}{\eta_e+\eta_i}\psi,\ \frac{\partial u^-}{\partial n} - \frac{\partial v^+}{\partial n} = 2\frac{\eta_e}{\eta_e+\eta_i}\psi, \\ x \in \Gamma. \tag{30}$$

Согласно предположению теоремы, имеем

$$v(z) = 0,\ x \in \mathbb{R}^2. \tag{31}$$

Следовательно, использовав (29)–(31), получим

$$\varphi = u^+ = u^-,\ \psi = \frac{\eta_e+\eta_i}{2\eta_i}\frac{\partial u^+}{\partial n} = \frac{\eta_e+\eta_i}{2\eta_e}\frac{\partial u^-}{\partial n}, \\ x \in \Gamma, \tag{32}$$

что соответствует определению (14).

Из (32) следует, что граничные условия (3) выполняются для u. Рассуждая аналогичным образом, получим, что для функции u выполняются все другие условия исходной GCFEP (1)–(4). Таким образом, функция u, определенная в (21), (22), является собственной функ-

цией исходной GCFEP (1)–(4). Предположим, что $u = 0$. Использовав (32), получим $\varphi = 0$ и $\psi = 0$, $x \in \Gamma$, что противоречит утверждению теоремы о том, что (φ, ψ) – нетривиальное решение системы Мюллера. Наконец, заметим, что, подставив (32) в (21), (22), получим интегральные представления (10), (11).

Вычислительные эксперименты

Проведем серию вычислительных экспериментов, направленных на иллюстрацию утверждений теоремы эквивалентности. Сначала опишем геометрию микрорезонатора. Предположим, что микрорезонатор имеет форму круга единичного радиуса. Внутренняя область микрорезонатора Ω_i представляет собой активную область, а внешняя область Ω_e – окружающую среду. Показатель преломления в активной области $\nu_i = \alpha_i - i\gamma$, где действительная часть показателя преломления $\alpha_i = 2.63$. Показатель преломления окружающей среды $\nu_e = 1$.

Определим собственные значения k, соответствующие значениям параметра γ для H- и E-поляризаций. Решения исходной GCFEP (1)–(4) и вывернутой наизнанку GCFEP (6)–(9) будем искать методом разделения переменных. Решения системы граничных интегральных уравнений Мюллера (15), (16) найдем, использовав метод Галеркина.

Проиллюстрируем первое утверждение теоремы для моды с номером 8 как для H-поляризации, так и для E-поляризации. Рисунок 3 соответствует случаю E-поляризации, вдоль вертикальной оси расположены значения параметра γ, вдоль горизонтальной – значения k. Сплошные линии соответствуют нулям действительной части определителя, полученного путем применения метода разделения переменных к исходной GCFEP, пунктирные – нулям мнимой части того же определителя. Таким образом, в точках пересечения пунктирной и сплошной линий расположены решения исходной GCFEP, потому что значение определителя в этих точках равно нулю.

На рисунке 3 различимы 10 точек пересечения, каждая из них может быть использована в качестве начального приближения при поиске соответствующего точного решения. Произвольно выберем две точки и найдем соответствующие этим точкам точные решения. В качестве первой точки выберем (8.12, 0.02089), в качестве второй – (9.34, 0.302). Выбранные точки отметим на рисунке 3 черными квадратами.

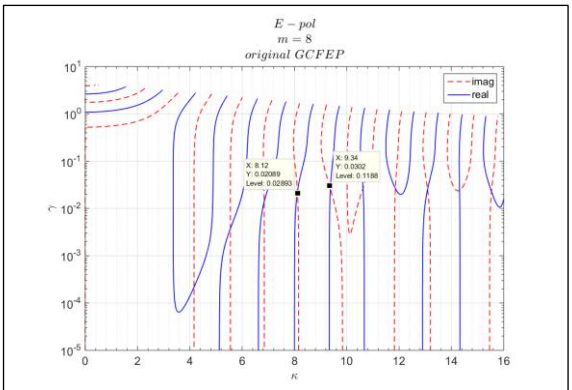


Рис. 3. Решения исходной GCFEP в случае E-поляризации

Fig. 3. The original GCFEP solutions in the case of E-polarization

Согласно первому утверждению теоремы, решения системы Мюллера должны включать в себя решения исходной GCFEP. Чтобы проверить это, найдем решения системы Мюллера. Для начала построим рисунок 4, подобный рисунку 3.

На этом рисунке в точках, где пересекаются пунктирная и сплошная линии, находятся решения системы Мюллера, причем в тех же местах, что и решения исходной GCFEP. Каждое решение исходной GCFEP назовем истинным. Теперь отметим решения, которые не входят в число решений исходной GCFEP (назовем их фиктивными). Фиктивные решения находятся в окрестностях точек (1.16, 4.677), (1.84, 2.455), (2.62, 1.096). Это говорит о том, что исходная GCFEP и система Мюллера не эквивалентны. Среди решений системы Мюллера есть такие,

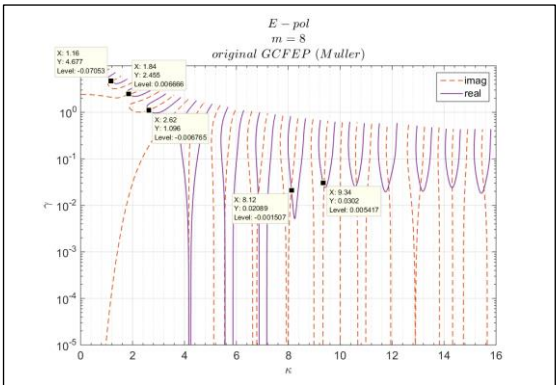


Рис. 4. Решения системы граничных интегральных уравнений Мюллера в случае E-поляризации

Fig. 4. The Muller BIEs solutions in the case of E-polarization

которые не являются решениями исходной GCFEP.

Найдем точные решения исходной GCFEP и решения системы Мюллера. В качестве начальных приближений используем ранее выбранные точки. Результаты приведены в таблице 1.

Как видим, решения исходной GCFEP и решения системы Мюллера совпадают, по крайней мере, до 4-го знака после запятой. Таким образом, два произвольно выбранных решения GCFEP являются решениями системы Мюллера.

Проведем аналогичные исследования для случая H-поляризации. В качестве начальных приближений выберем две точки. Пусть первая точка – (5.87, 0.007762), вторая – (7.16, 0.04786). Использовав начальные приближения, найдем точные решения. Результаты приведены в таблице 1. Они показывают, что решения исходной GCFEP и системы Мюллера совпадают, по крайней мере, до 3-го знака после запятой. Как и для случая E-поляризации, получаем, что два произвольно выбранных решения GCFEP являются решениями системы Мюллера.

Проиллюстрируем второе утверждение теоремы. Для этого найдем решение вывернутой наизнанку GCFEP (6)–(9). На рисунке 5 в точках, где пересекаются пунктирная и сплошная линии, находятся решения GCFEP, вывернутой наизнанку. Видны только три точки пересечения: (1.16, 4.677), (1.84, 2.455), (2.62, 1.096). В этих же местах находятся решения системы Мюллера как для H-, так и для E-поляризации. Таким образом, каждое решение GCFEP, вывернутой наизнанку, является решением системы Мюллера. Чтобы убедиться в этом, найдем точные решения обеих задач. В качестве начальных приближений используем координаты точек пересечения пунктирной и сплошной линий, изображенных на рисунке 5.

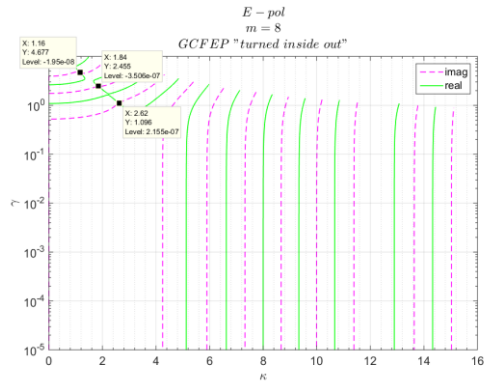


Рис. 5. Решения GCFEP, вывернутой наизнанку

Fig. 5. The solutions of GCFEP turned inside out

Сравним точные решения GCFEP, вывернутой наизнанку, с точными решениями системы Мюллера. Результаты такого сравнения приведены в таблице 2.

Таблица 1

Точные решения исходной GCFEP и системы Мюллера

Table 1

The exact solutions of the original GCFEP and the Muller BIEs

Задача	Начальное приближение	k	γ	Значение определителя
Исходная GCFEP, E-поляризация	8.12, 0.02089	8.1194089465875638	0.0224740872688829	1.7×10^{-15}
Система Мюллера, E-поляризация	8.12, 0.02089	8.1194062447293618	0.0224738768837311	5.2×10^{-15}
Исходная GCFEP, E-поляризация	9.34, 0.0302	9.3425293581270346	0.0264637505102697	3.6×10^{-15}
Система Мюллера, E-поляризация	9.34, 0.0302	9.3425152098587638	0.0264595127455151	1.1×10^{-14}
Исходная GCFEP, H-поляризация	5.87, 0.007762	5.8798745905857190	0.0069967758940770	1.8×10^{-15}
Система Мюллера, H-поляризация	5.87, 0.007762	5.8795117899549991	0.0069374881952692	4.0×10^{-16}
Исходная GCFEP, H-поляризация	7.16, 0.04786	7.1626442791343132	0.0476243428759894	4.0×10^{-16}
Система Мюллера, H-поляризация	7.16, 0.04786	7.1626011310995139	0.0476186535024012	2.9×10^{-15}

Таблица 2

Точные решения GCFEP, вывернутой наизнанку, и системы Мюллера

Table 2

The exact solutions of the GCFEP turned inside out and exact solutions of Muller BIEs

Задача	Начальное приближение	k	γ	Значение определителя
GCFEP, вывернутая наизнанку	1.16, 4.677	1.1569501948043683	4.6760002888689280	7.9×10^{-15}
Система Мюллера, H-поляризация	1.16, 4.677	1.1569502266217788	4.6760001657423400	1.3×10^{-14}
Система Мюллера, E-поляризация	1.16, 4.677	1.1569444143502281	4.6760236738919820	0
GCFEP, вывернутая наизнанку	1.84, 2.455	1.8427414582410231	2.4515291617233812	1.21×10^{-14}
Система Мюллера, H-поляризация	1.84, 2.455	1.8427431406167356	2.4515274205384459	2.17×10^{-14}
Система Мюллера, E-поляризация	1.84, 2.455	1.8426196204740266	2.4516907665531620	0
GCFEP, вывернутая наизнанку	2.62, 1.096	2.6178164481005401	1.0987921595071672	3.2×10^{-15}
Система Мюллера, H-поляризация	2.62, 1.096	2.6178174441660311	1.0987919841366036	5.6×10^{-15}
Система Мюллера, E-поляризация	2.62, 1.096	2.6177779131383061	1.0988079092001692	0

Таблица 2 показывает, что решения GCFEP, вывернутой наизнанку, и решения системы Мюллера совпадают, по крайней мере, до 3-го знака после запятой. Каждое решение GCFEP, вывернутой наизнанку, является решением системы Мюллера. Таким образом, решения системы Мюллера состоят из решений исходной GCFEP и GCFEP, вывернутой наизнанку.

На рисунке 5 в области при $k > 4$, где GCFEP, вывернутая наизнанку, имеет только тривиальное решение, каждое решение системы Мюллера является решением исходной GCFEP. Таким образом, можно сказать, что результаты вычислительных экспериментов соответствуют утверждениям теоремы эквивалентности, а множества истинных и фиктивных собственных значений явно разделяются.

Описание комплекса компьютерных программ

Программный комплекс разработан в системе MATLAB и предназначен для вычисления собственных значений и собственных функций задачи о собственных модах двумерного диэлектрического микрорезонатора с особыми областями, коэффициента направленности излучения D, угла β направления наиболее интенсивного пучка излучения. Программный комплекс состоит из функций:

```
0. main_MSV_generate_initial
1. main_calc
a) main_cos_calc
b) main_sin_calc
   1) InitEnvironmentParameters
   2) InitGeometryParameters
   3) InitInputData
   4) InitModeParameters
   5) solveGalerkinMethod
        solveNeumaierMethod
   6) calcAdditionalData_180
```

Рассмотрим применение комплекса к задаче о собственных модах круглого диэлектрического микрорезонатора с круглым отверстием. Алгоритм вычисления собственных значений и собственных функций задачи выглядит следующим образом. Функция main_H_MSV_generate_initial вызывается до начала вычислений и предназначена для подготовки начальных приближений к собственным значениям. Начальные приближения вычисляются методом разделения переменных для круглого активного микрорезонатора без отверстия. Далее в зависимости от типа искомых мод вызывается одна из функций: main_H_cos_calc, main_H_sin_calc.

Функции main_H_cos_calc, main_H_sin_calc предназначены для вычисления собственных значений и собственных функций, коэффициента направленности излучения и угла наиболее интенсивного пучка излучения.

Входные параметры функций main_H_cos_calc и main_H_sin_calc:

```
   inputData.typeEnvironment – название задачи;
   inputData.resultDir – путь к папке сохранения результатов вычислений;
   inputData.typePolarization – тип поляризации;
   inputData.typeMode – тип искомых мод;
   inputData.maxIter – ограничение на число итераций в методе Ньюмаера [14];
   mList – номера мод, решения которых подлежат определению;
   nList – номера искомых решений;
   dList – набор расстояний между центром резонатора и центром отверстия.
```

Выходные параметры:

```
   resultData – структура, содержащая собственные значения (k, γ), собственный вектор w, коэффициент направленности D, угол β, соответствующие входным параметрам inputData.
```

Следующий фрагмент функции main_H_cos_calc представляет этап инициализации входных параметров задачи:

```
   inputData.typeEnvironment = 'eccentricRing';
   inputData.resultDir = strcat(strcat(cd, '/../../'), '/results/eccentricRing/');
   inputData.typePolarization = 'H';
   inputData.typeMode = 'cos';
   inputData.maxIter = 100;
   mList = [11]; nList = [1:3]; dList = [0:0.005:0.8];
```

Функция InitEnvironmentParameters инициализирует физические параметры микрорезонатора и параметры окружающей его среды. Значения параметров сохраняются в структуру inputData.

Входные параметры функции InitEnvironmentParameters:

```
   inputData.typeEnvironment – название задачи.
```

Выходные параметры:

```
   inputData.numContours – количество контуров микрорезонатора;
   inputData.contours{m}.env.internal.alpha – показатель преломления во внутренней области микрорезонатора;
   inputData.contours{m}.env.internal.type – тип среды во внутренней области микрорезонатора;
   inputData.contours{m}.env.external.alpha – показатель преломления во внешней области микрорезонатора;
   inputData.contours{m}.env.external.type – тип среды во внешней области микрорезонатора.
```

Следующий фрагмент InitEnvironmentParameters соответствует этапу инициализации параметров микрорезонатора с отверстием:

```
case 'eccentricRing'
   inputData.numContours = 2;
   inputData.contours{1}.env.internal.alpha = 1;
   inputData.contours{1}.env.internal.type = 'passive';
   inputData.contours{1}.env.external.alpha = 2.63;
   inputData.contours{1}.env.external.type = 'active';
   inputData.contours{2}.env.internal.alpha = 2.63;
   inputData.contours{2}.env.internal.type = 'active';
   inputData.contours{2}.env.external.alpha = 1;
   inputData.contours{2}.env.external.type = 'passive';
end
```

Функция InitGeometryParameters инициализирует геометрические параметры микрорезонатора – радиус микрорезонатора *a*, радиус отверстия *r*, угол относительно центра резонатора, под которым расположен центр отверстия, расстояние *d* между центром резонатора и центром отверстия.

Входные параметры функции InitGeometryParameters:

```
   inputData.typeEnvironment – название задачи.
```

Выходные параметры:

```
   inputData.contours{m}.geom.r – радиус отверстия;
   inputData.contours{m}.geom.theta – угол между центром резонатора и центром отверстия;
   inputData.contours{m}.geom.d – расстояние между центром резонатора и центром отверстия.
```

Следующий фрагмент InitGeometryParameters соответствует этапу инициализации геометрических параметров микрорезонатора с отверстием:

```
case 'eccentricRing'
   inputData.contours{1}.geom.r = 0.03;
   inputData.contours{1}.geom.theta = pi;
   inputData.contours{1}.geom.d = 0;
   inputData.contours{2}.geom.r = 1;
   inputData.contours{2}.geom.theta = 0;
   inputData.contours{2}.geom.d = 0;
end
```

Когда в серии вложенных циклов зафиксированы номер моды *m*, номер решения *n* и степень тригонометрического полинома *N*, вызывается функция InitInputData. Она загружает в

структуру inputData начальное приближение к собственным значениям (k, γ). Начальным приближением для собственного вектора является нулевой вектор.

Входные параметры функции InitInputData:

inputData.m – номер моды;
inputData.n – номер решения;
inputData.typePolarization – тип поляризация;
inputData.typeMode – тип моды.

Выходные параметры:

inputData.k – начальное приближение к k;
inputData.gamma – начальное приближение к γ.

Следующий фрагмент InitInputData соответствует H-поляризации и четному типу мод:

```
switch inputData.typePolarization
case 'H'
   inputData.polDir =
[inputData.resultDir 'H_pol/' ];
end
mDir = [inputData.polDir 'm_'
num2str(inputData.m) '/'];
inputData.nDir = [mDir 'n_'
num2str(inputData.n) '/'];
inputData.k = 0; inputData.gamma = 0;
if(strcmp( inputData.typeMode, 'cos'))
   if exist([inputData.nDir
'/Initial_data_cos.mat'],'file')== 2
      data = load([inputData.nDir
'/Initial_data_cos.mat']);
      inputData.k = data.k;
inputData.gamma = data.gamma;
   end
end
```

Далее фиксируется значение параметра d из dList и вызывается функция InitModeParameters, которая определяет правило вычисления матрицы задачи согласно типу искомых мод.

Входные параметры функции InitModeParameters:

inputData.typeMode – тип мод.

Выходные параметры:

inputData.functions.A – указатель на функцию вычисления матрицы задачи.

Следующий фрагмент InitModeParameters соответствует четному типу мод:

```
switch inputData.typeMode
   case 'cos'
      inputData.functions.A =
@matrixA_cos;
end
```

Когда определены все входные параметры, вызывается функция solveGalerkinMethod, которая является программной реализацией метода Галеркина. Для решения нелинейной алгебраической задачи на собственные значения, полученной в результате применения метода Галеркина, вызывается функция solveNeumaierMethod. Эта функция является программной реализацией метода Ньюмаера (вариант метода обратных итераций с невязкой).

Входные параметры функции solveNeumaierMethod:

func_A – указатель на функцию, вычисляющую матрицу A;
start_k – начальное приближение для k;
start_gamma – начальное приближение для γ;
start_w – начальное приближение для собственного вектора w;
contours – массив структур, содержащий промежуточные вычисления для контуров резонатора;
additionalData – структура, содержащая дополнительные данные, необходимые во время вычислений.

Выходные параметры:

k – решение k;
gamma – решение γ;
w – собственный вектор w;
count_iter – число итераций метода Ньюмаера

Результаты вычислений сохраняются в структуру resultData, которая также содержит входные параметры задачи.

Функция calcAdditionalData_180 предназначена для вычисления коэффициента направленности D и угла β.

Входные параметры calcAdditionalData_180:

resultData – структура, содержащая входные параметры и решение задачи.

Выходные параметры:

resultData.D – значение коэффициента направленности излучения;
resultData.beta – значение угла направления наиболее интенсивного пучка излучения.

Заключение

Сформулирована и доказана теорема эквивалентности для исходной GCFEP и системы граничных интегральных уравнений Мюллера. Численно проиллюстрированы утверждения теоремы, а также то, что спектр нелинейной задачи на собственные значения системы граничных интегральных уравнений Мюллера, порождаемой GCFEP, содержит фиктивные собственные значения. Показано, что множества истинных и фиктивных собственных значений явно разделяются.

Проведены расчеты, выполнено сравнение найденных собственных значений исходной GCFEP, GCFEP, вывернутой наизнанку, и системы Мюллера. Определен диапазон фиктивных собственных значений и показано, что эти значения явно отделены от истинных собственных значений.

Для развития результатов следует выполнить поиск таких интегральных формулировок, которые, с одной стороны, будут основаны на операторах Фредгольма, с другой – вообще не будут иметь фиктивных собственных значений или же их фиктивные собственные значения будут еще лучше отделены от истинных.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Du W., Li C., Sun J., Xu H., Yu P., Ren A., Wu J., Wang Z. Nanolasers based on 2D materials. Laser & Photonics Reviews, 2020, vol. 14, no. 12, art. 2000271. DOI: 10.1002/lpor.202000271.
2. Smotrova E.I., Nosich A.I. Mathematical study of the two-dimensional lasing problem for the whispering-gallery modes in a circular dielectric microcavity. Optical and Quantum Electronics, 2004, vol. 36, no. 1-3, pp. 213–221. DOI: 10.1023/B:OQEL.0000015641.19947.9c.
3. Spiridonov A.O., Oktyabrskaya A.O., Karchevskii E.M., Nosich A.I. Mathematical and numerical analysis of the generalized complex-frequency eigenvalue problem for two-dimensional optical microcavities. SIAM J. on Applied Mathematics, 2020, vol. 80, no. 4, pp. 1977–1998. DOI: 10.1137/19M1261882.
4. Smotrova E.I., Tsvirkun V., Gozhyk I., Lafargue C., Ulysse C., Lebental M., Nosich A.I. Spectra, thresholds, and modal fields of a kite-shaped microcavity laser. JOSA B, 2013, vol. 30, no. 6, pp. 1732–1742. DOI: 10.1364/JOSAB.30.001732.
5. Oktyabrskaya A.O., Spiridonov A.O., Karchevskii E.M. Muller boundary integral equations for solving generalized complex-frequency eigenvalue problem. Lobachevskii J. of Mathematics, 2020, vol. 41, no. 7, pp. 1377–1384. DOI: 10.1134/S1995080220070343.
6. Misawa R., Nino K., Nishimura N. Boundary integral equations for calculating complex eigenvalues of transmission problems. SIAM J. on Applied Mathematics, 2017, vol. 77, no. 2, pp. 770–788. DOI: 10.1137/16M1087436.
7. Muller C. Foundations of the Mathematical Theory of Electromagnetic Waves. Springer Publ., Berlin, 1969, 353 p. DOI: 10.1007/978-3-662-11773-6.
8. Steinbach O., Unger G. Combined boundary integral equations for acoustic scattering resonance problems. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2015, vol. 40, no. 5, pp. 1516–1530. DOI: 10.1002/mma.4075.
9. Reichardt H. Ausstrahlungsbedingungen fur die wellengleihung. Proc. Abhandlungen aus dem Mathematischen Seminar der Universit at Hamburg, 1960, vol. 24, pp. 41–53. DOI: 10.1007/BF02942018.
10. Colton D., Kress R. Integral Equation Methods in Scattering Theory. SIAM Publ., Philadelphia, 2013, 271 p. DOI: 10.1137/1.9781611973167.
11. Spiridonov A.O., Karchevskii E.M., Nosich A.I. Mathematical and numerical modeling of on-threshold modes of 2-D microcavity lasers with piercing holes. Axioms, 2019, vol. 8, pp. 1–16. DOI: 10.3390/axioms 8030101.
12. Spiridonov A.O., Karchevskii E.M., Nosich A.I. Rigorous formulation of the lasing eigenvalue problem as a spectral problem for a Fredholm operator function. Lobachevskii J. of Mathematics, 2018, vol. 39, no. 8, pp. 1148–1157. DOI: 10.1134/S1995080218080127.
13. Abramowitz M. Handbook of Mathematical Functions, 1964: With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. London, Forgotten Books Publ., 2018, 1080 p.
14. Neumaier A. Residual inverse iteration for the nonlinear eigenvalue problem. SIAM J. on Numerical Analysis, 1985, vol. 22, no. 5, pp. 914–923. DOI: 10.1137/0722055.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.316-328

Received 01.08.22, Revised 08.08.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 316–328

True and fictitious eigenvalues of the set of Muller boundary integral equations

I.V. Ketov [1], *Graduate Student, ivlketov@gmail.com*
A.O. Oktyabrskaya [2], *Postgraduate Student, alina.oktyabrskaya.21@gmail.com*
A.O. Spiridonov [3], *Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, aospiridonov@gmail.com*
E.M. Karchevskii [3], *Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of Applied Mathematics and Artificial Intelligence Department, Principal Researcher of Research Laboratory of High Performance Computing, Medical Cybernetics and Machine Vision, ekarchev70@gmail.com*

[1] *Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russian Federation*
[2] *Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA*
[3] *Kazan Federal University, Research Laboratory for High Performance Computing, Medical Cybernetics, and Machine Vision (Institute of Computational Mathematics and Information Technologies), Kazan, 420008, Russian Federation*

Abstract. The authors have investigated the spectrum of a nonlinear eigenvalue problem for a system of boundary integral equations theoretically and numerically. In general, eigenvalues of this problem split into two sets. The first set is the set of the true eigenvalues corresponding to the original eigenvalue problem of the Helmholtz operator. The second set is the set of fictitious eigenvalues that correspond to the so-called "turned inside-out" problem. Therefore, it is important to determine the conditions under which the original eigenvalue problem for the Helmholtz operator on a plane and the corresponding problem for the integral operator are spectrally equivalent.

The original eigenvalue problem for the Helmholtz operator is reduced to a nonlinear eigenvalue problem for the system of Muller boundary integral equations. The solutions of the original problem and the "turned inside-out" problem are found by the method of separation of variables. The solution of the system of Muller boundary integral equations is based on the Galerkin method.

The paper formulates and proves the equivalence theorem for the original eigenvalue problem for the Helmholtz operator and the system of Muller boundary integral equations. It shows that the spectrum of the nonlinear eigenvalue problem of the system of Muller boundary integral equations contains fictitious eigenvalues in addition to the true eigenvalues. There is a defined area on the complex plane that consists only of fictitious eigenvalues; and it is shown that these fictitious eigenvalues are explicitly separated from true eigenvalues.

The equivalence theorem provides a theoretical justification for the applicability of the Muller boundary integral equation method. The developed computer programs can be directly used in the modeling microdisk lasers.

Keywords: eigenvalue problem, Muller boundary integral equations, microdisk laser, active microcavity, spectral equivalence.

Acknowledgements. *This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").*

References

1. Du W., Li C., Sun J., Xu H., Yu P., Ren A., Wu J., Wang Z. Nanolasers based on 2D materials. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, vol. 14, no. 12, art. 2000271. DOI: 10.1002/lpor.202000271.
2. Smotrova E.I., Nosich A.I. Mathematical study of the two-dimensional lasing problem for the whispering-gallery modes in a circular dielectric microcavity. *Optical and Quantum Electronics*, 2004, vol. 36, no. 1-3, pp. 213–221. DOI: 10.1023/B:OQEL.0000015641.19947.9c.
3. Spiridonov A.O., Oktyabrskaya A.O., Karchevskii E.M., Nosich A.I. Mathematical and numerical analysis of the generalized complex-frequency eigenvalue problem for two-dimensional optical microcavities. *SIAM J. on Applied Mathematics*, 2020, vol. 80, no. 4, pp. 1977–1998. DOI: 10.1137/19M1261882.
4. Smotrova E.I., Tsvirkun V., Gozhyk I., Lafargue C., Ulysse C., Lebental M., Nosich A.I. Spectra, thresholds, and modal fields of a kite-shaped microcavity laser. *JOSA B*, 2013, vol. 30, no. 6, pp. 1732–1742. DOI: 10.1364/JOSAB.30.001732.
5. Oktyabrskaya A.O., Spiridonov A.O., Karchevskii E.M. Muller boundary integral equations for solving generalized complex-frequency eigenvalue problem. *Lobachevskii J. of Mathematics*, 2020, vol. 41, no. 7, pp. 1377–1384. DOI: 10.1134/S1995080220070343.
6. Misawa R., Nino K., Nishimura N. Boundary integral equations for calculating complex eigenvalues of transmission problems. *SIAM J. on Applied Mathematics*, 2017, vol. 77, no. 2, pp. 770–788. DOI: 10.1137/16M1087436.
7. Muller C. *Foundations of the Mathematical Theory of Electromagnetic Waves*. Springer Publ., Berlin, 1969, 353 p. DOI: 10.1007/978-3-662-11773-6.
8. Steinbach O., Unger G. Combined boundary integral equations for acoustic scattering resonance problems. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2015, vol. 40, no. 5, pp. 1516–1530. DOI: 10.1002/mma.4075.
9. Reichardt H. Ausstrahlungsbedingungen fur die wellengleihung. *Proc. Abhandlungen aus dem Mathematischen Seminar der Universit at Hamburg*, 1960, vol. 24, pp. 41–53. DOI: 10.1007/BF02942018.

10. Colton D., Kress R. *Integral Equation Methods in Scattering Theory*. SIAM Publ., Philadelphia, 2013, 271 p. DOI: 10.1137/1.9781611973167.

11. Spiridonov A.O., Karchevskii E.M., Nosich A.I. Mathematical and numerical modeling of on-threshold modes of 2-D microcavity lasers with piercing holes. *Axioms*, 2019, vol. 8, pp. 1–16. DOI: 10.3390/axioms8030101.

12. Spiridonov A.O., Karchevskii E.M., Nosich A.I. Rigorous formulation of the lasing eigenvalue problem as a spectral problem for a Fredholm operator function. *Lobachevskii J. of Mathematics*, 2018, vol. 39, no. 8, pp. 1148–1157. DOI: 10.1134/S1995080218080127.

13. Abramowitz M. *Handbook of Mathematical Functions, 1964: With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. London, Forgotten Books Publ., 2018, 1080 p.

14. Neumaier A. Residual inverse iteration for the nonlinear eigenvalue problem. *SIAM J. on Numerical Analysis*, 1985, vol. 22, no. 5, pp. 914–923. DOI: 10.1137/0722055.

Для цитирования

Кетов И.В., Октябрьская А.О., Спиридонов А.О., Карчевский Е.М. Истинные и фиктивные собственные значения системы граничных интегральных уравнений Мюллера // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 316–328. DOI: 10.15827/0236-235X.139.316-328.

For citation

Ketov I.V., Oktyabrskaya A.O., Spiridonov A.O., Karchevskii E.M. True and fictitious eigenvalues of the set of Muller boundary integral equations. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 316–328 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.316-328.

УДК 004.92:004.032.26
DOI: 10.15827/0236-235X.139.329-339
Дата подачи статьи: 27.07.22, после доработки: 05.08.22
2022. Т. 35. № 3. С. 329–339

Структуризация сущностей естественного текста с использованием нейронных сетей для генерации трехмерных сцен

Б.А. Козар [1], *инженер, bogdan.kozar.itis@gmail.com*
В.В. Кугуракова [1], *к.т.н., доцент, vlada.kugurakova@gmail.com*
Г.Ф. Сахибгареева [1], *ассистент, gulnara.sahibgareeva42@gmail.com*

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

Предметом настоящего исследования является автоматизация с помощью нейронных сетей процесса сборки трехмерной сцены, которая может быть использована как для генерации по текстовому описанию трехмерных сцен или локаций в компьютерных играх, так и для подготовки секвенций трехмерных синтетических данных. Эта тематика актуальна для разработки трехмерной графики, в том числе для интерактивных проектов – игр, тренажеров, AR/VR-приложений.

В результате анализа и сравнения результатов, полученных в ряде известных выполненных проектов, выделены те технологии и программные библиотеки, которые позволяют эффективно достичь поставленной цели – предоставить быструю сборку трехмерных сцен, наполненных объектами, согласно текстовому описанию. Благодаря синтезу лучших решений удалось создать оптимальную концепцию, которая позволяет добиться быстрого и качественного результата при верно сформулированных правилах по выстраиванию геометрических отношений между объектами сцены. Сформированы перечень требований к проектируемому инструменту и его архитектура. Входными данными для применения этого инструмента является текст на естественном языке, выходными – сцена с объектами, соответствующими использованному описанию.

Основным достигнутым результатом стал готовый программный инструмент для Unreal Engine, разработанный на основе нейронной сети nlp-ue4 и набора библиотек tensorflow, nltk, pandas, gensim, h5py. Готовность инструмента оценена как прототипное решение, которое можно интегрировать в этап черновой сборки интерактивных проектов с трехмерной графикой.

Для объективной оценки эффективности созданного инструмента проведены эксперименты, которые доказали, что его применение даже в текущей версии значительно сокращает время разработки, а также не требует наличия у пользователя навыков программирования или создания трехмерной графики.

Обсуждены также перспективы развития исследований.

Ключевые слова: *компьютерная графика, трехмерное моделирование, визуализация, процедурная генерация, дизайн уровней, автоматизация, NLP, нейронные сети, Unreal Engine, компьютерные игры.*

Ручная сборка игровых проектов трудоемка и занимает много времени, а очевидный риск того, что результат труда не станет итоговым, в свою очередь, порождает исправления и переделки вплоть до реконструкции этой сборки с самого начала. Как следствие, в разы увеличивается вероятность того, что проект может выйти за рамки установленного бюджета. В таком случае на помощь приходят нейронные сети, которые позволяют получать результаты в различных областях, например, при решении конкретных задач по визуализации объектов на основе входных изображений или текста [1–3], и дают возможность сократить время на поиск (или генерацию) определенных моделей, упомянутых в тексте.

Геймдизайн включает в себя не только создание сценария с вариантами развития игры, описание игровых механик, персонажей, но и детальную разработку сцен, где происходит действие игры, и тогда генерация бесконечного множества вариаций таких локаций, основанных на одном и том же текстовом описании, становится серьезной основой для работы геймдизайнера. Подобное увеличение выборки вариантов локаций также увеличивает возможность нахождения наиболее уникального и лучшего результата, что сокращает время не только на визуальное представление, но и на сборку подобной сцены вручную, поскольку все трехмерные модели уже будут находиться на своих местах на игровой сцене. Существую-

щие подходы в области генерации трехмерных сцен [4] сегодня никак практически не используются и созданы только ради искусства. Предложенный алгоритм позволяет легко интегрировать генерацию сцен в собственные проекты, например, для визуализации при сценарном прототипировании [5].

Обзор связанных работ

Идея создания визуального контента не нова и уже имеет множество воплощений. Рассмотрим самые яркие из них.

Метод Joint Embeddings (совместных вкраплений) в инструменте ShapeNet (https://shapenet.org/) позволяет добиваться генерации цветных реалистичных воксельных моделей с разнообразными текстурами и деталями (рис. 1).

Рис. 1. Генерация воксельной графики по текстовому описанию

Fig. 1. Voxel graphics generation by text description

Нейросеть Dream Fields (https://www.dreamfields.com/) с использованием модели CLIP (https://openai.com/blog/clip/) от Google AI способна генерировать уникальные трехмерные объекты с различной стилизацией (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/34.jpg). Другое название нейросети Dream Fields – DALL-E (https://rudalle.ru/) для трехмерной графики, и в 2022 году результат ее эффектных генераций произвел фурор среди специалистов.

Благодаря CLIP можно усложнить геометрию существующих низкополигональных моделей по текстовому запросу (рис. 2), как это реализовано в Text2Mesh [6].

Важными аспектами трехмерной графики являются освещение и тени. Если трехмерная модель получена на основе ряда фотографий (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/35.jpg), например, с применением NeRF [7], то использование некоторых методов позволяет решить и задачу автоматического изменения освещения, как, например, это реализовано в NeROIC [3].

Более сложной является задача генерации трехмерного объекта по ограниченному набору его изображений. Например, существует решение [8], способное генерировать модель всего лишь по двумерной проекции, то есть по изображению, которое иллюстрирует силуэт объекта (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/36.jpg).

Рис. 2. Стилизация низкополигональной модели человека под Железного человека

Fig. 2. A low-poly human model styled on Iron Man

Еще сложнее восстановить данные об объекте только по одной фотографии. Так, например, в методе BARC (Breed-Augmented Regression using Classification – регрессии с классификацией на основе дополнительных данных о классифицируемых объектах) [9] реализована функция определения породы и позы собаки по одному изображению (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/37.jpg).

С задачей создания примитивных объектов с учетом их описания и связей между ними справляется алгоритм Part2Word, тоже использующий метод Joint embeddings. Его особенность заключается в том, что все используемые модели состоят из сборочных частей (рис. 3) и при входном значении текста алгоритм собирает данную модель на основе описания, что делает каждый запрос уникальным [10].

Помимо модульной генерации отдельных частей фурнитуры в одну полноценную модель, существует готовое решение генерации трехмерной модели с разной перспективой на основе фотографий, представленных как входные данные. Такой алгоритм выстраивает сферические сверточные сети и использует их как инструмент представления трехмерных фигур [11].

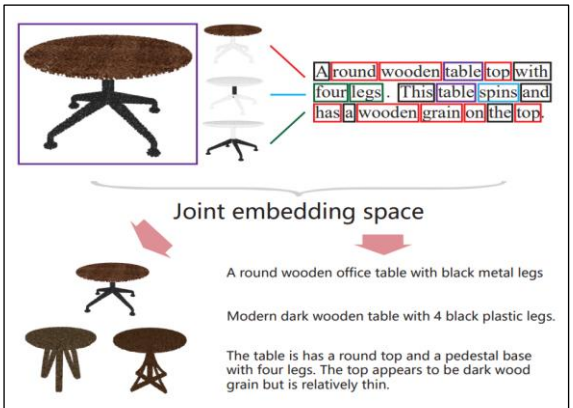


Рис. 3. Обработка текста с помощью алгоритма Part2Word

Fig. 3. Text processing using the Part2Word algorithm

Технология, подобная описанной, используется для приложений с 3D-графикой, где данные и модели могут присутствовать в произвольной ориентации. Такое изображение кодируется с учетом свойств 3D-формы наблюдаемого объекта, что в результате оказывается эквивалентным его трехмерному вращению (рис. 4).

Одним из важных факторов в генерации трехмерной модели является представление формы как деформации и комбинации обучаемых элементарных трехмерных структур, которые являются примитивами, полученными в результате обучения набору форм (рис. 5). Так реализована DeepVoxels [12] – инвариантная к точке обзора, постоянная и однородная 3D-сетка вокселей. Подобное представление примитивов приводит к улучшению и созданию более точных трехмерных форм [13].

Для изучения элементарных структур существуют два подхода: обучение деформации патчей и точечному переводу.

Оба подхода могут быть распространены на абстрактные структуры более высоких измерений для улучшения результатов. Главными задачами, стоящими при использовании данного метода, являются реконструкция объектов с помощью ShapeNet, а также оценка соответствий между сканами, сделанными вручную. В этом случае алгоритм использует набор облаков точек, по которому происходит обучение основам примитивов и более сложных моделей для последующей генерации в уже самостоятельный объект. Таким способом сначала происходит обучение набора облаков точек на конкретном примере, после чего подобные элементарные структуры используются для реконструкции объектов подобного или близкого по классификации типа из первоначальных данных (рис. 6).

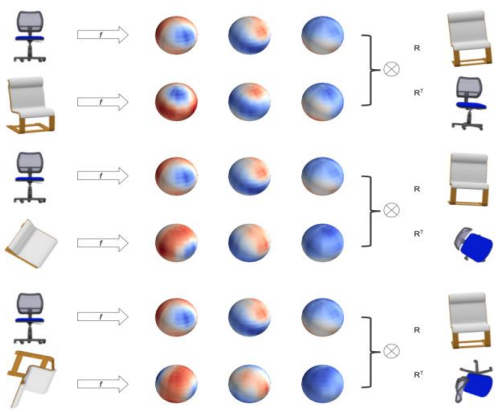


Рис. 4. Визуализация трехмерного вращения относительно позы

Fig. 4. Visualization of 3D rotation relative to a pose

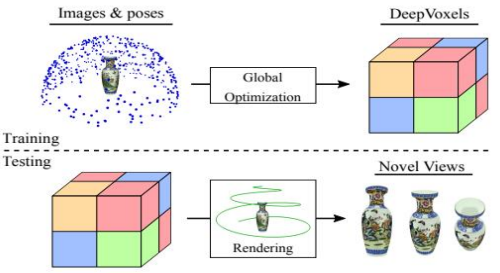


Рис. 5. Обучение DeepVoxels (сверху), синтез нового объекта (снизу)

Fig. 5. DeepVoxels training (top), new object synthesis (bottom)

Существует растущая область исследования, ориентированная на применение методов глубокого обучения к приложениям трехмерной геометрии и компьютерной графики. В компьютерном зрении структура данных очень проста: изображения состоят из плотных пикселей, которые представлены в виде массивов. В трехмерном пространстве подобный массив визуализируют с помощью вокселей, облаков точек, сеток, наборов многоракурсных изображений и т.д. Каждое из этих входных представлений также имеет свой собственный набор недостатков. Например, воксели имеют очень низкое разрешение, несмотря на высокую стоимость их вычисления. Облака точек не дают точное определение поверхностей или их нормалей, тем самым топология объекта не может быть однозначно получена из подобных

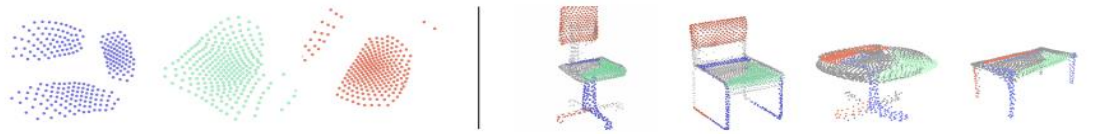


Рис. 6. Элементарные структуры стула (слева), 3D-реконструкции (справа)

Fig. 6. Elementary structures of a chair (left), a 3D reconstruction (right)

данных. Нейронная генеративная модель для сеток [14] PolyGen, которая оценивает совместно грани и вершины модели для непосредственного создания сеток, позволяет решить озвученные проблемы в подходах к реконструкции объектов. При этом используется уникальный подход к созданию модели – трехмерный объект представляется как строго упорядоченная последовательность вершин и граней, а не изображение в определенном ракурсе. Такой строгий порядок позволяет применять этот подход к моделированию последовательностей для создания трехмерных сеток.

Названное решение соединяет комплексные подходы в один и преобразует результат в трехмерную модель. Используя изображение объекта, воксели и сетку, можно создать вершины будущей модели, после чего все тем же способом определить грани и поверхности. На финальную модель накладываются все данные, и в результате с небольшой погрешностью получается сгенерированный объект (рис. 7).

Рис. 7. Генерация моделей с помощью PolyGen

Fig. 7. Generating models with PolyGen

Итак, большое количество успешных впечатляющих подходов, в том числе на основе обучения нейронных сетей, для реконструкции трехмерных моделей по ограниченной информации порождает новые идеи создания похожих алгоритмов для генерации компьютерной графики, например, для интерактивных проектов: компьютерных, включая серьезные, игр, тренажеров и симуляторов, AR/VR-приложений.

Генерация трехмерной сцены по текстовому запросу

Чтобы автоматически получать вариации трехмерных сцен на основании их текстового описания, авторы данного исследования предлагают использовать промежуточную структуризацию сущностей и их связей. Прежде чем приступить к самой генерации, нужно построить модели сущностей и связанных с ними ситуаций, которые могут быть обработаны с помощью нейронных сетей.

Весь алгоритм выделения этих сущностей и связей состоит из решения по отдельности совокупности довольно сложных подзадач (рис. 8):

– обнаружение в тексте каких-либо упоминаний о физических объектах;

– точная идентификация этих физических объектов;

– сопоставление физических объектов с записанным датасетом трехмерных моделей на основе названия объекта;

– оценка атрибутов каждого объекта (размер, пространственные ограничения, размещение объектов, цвет, текстура и др.) в соответствующих относительных положениях/ориентациях друг к другу (под, над, на, рядом, возле, около, недалеко и т.п.);

– генерация вариантов описываемого текстом размещения объектов на трехмерной сцене.

Входной текст, описывающий сцену, подается на обработку, результатом которой явля-

ется абстрактное представление шаблона сцены (рис. 9), фиксирующее объекты и отношения между ними.

Шаблон используется для создания конкретной сцены, визуализирующей входное описание, путем извлечения и размещения нужных моделей. Для такой генерации трехмерной сцены по текстовому запросу предлагается использовать комплекс перечисленных далее инструментов.

GoogleNews-vector-negative (https://code.google.com/archive/p/word2vec/) – датасет, содержащий 300-мерные векторы для трех миллионов слов и фраз, эти фразы были получены с использованием метода распределения входных данных и определения композиционности в них.

nlp-ue4 – нейронная сеть, способная работать совместно с игровым движком Unreal Engine и использовать формат для визуального программирования. Эта сеть упакована в виде плагина для удобного использования ее в сторонних классах Blueprint. Предшественницей этой нейронной сети была бесплатная и находящаяся в открытом доступе технология Microsoft LUIS (https://www.luis.ai/) для обработки текстов на естественном языке, которая взята за основу для реализации алгоритмов nlp-ue4. Важной особенностью nlp-ue4 является наличие функций по выделению сущностей (объектов) в предложениях и определению связей между ними.

TensorFlow Graphics (https://www.tensorflow.org/graphics) – инструмент, предназначенный для работы с 3D ML, имеется также расширение функционала в виде TensorBoard (https://www.tensorflow.org/tensorboard), который добавляет непосредственно отображение

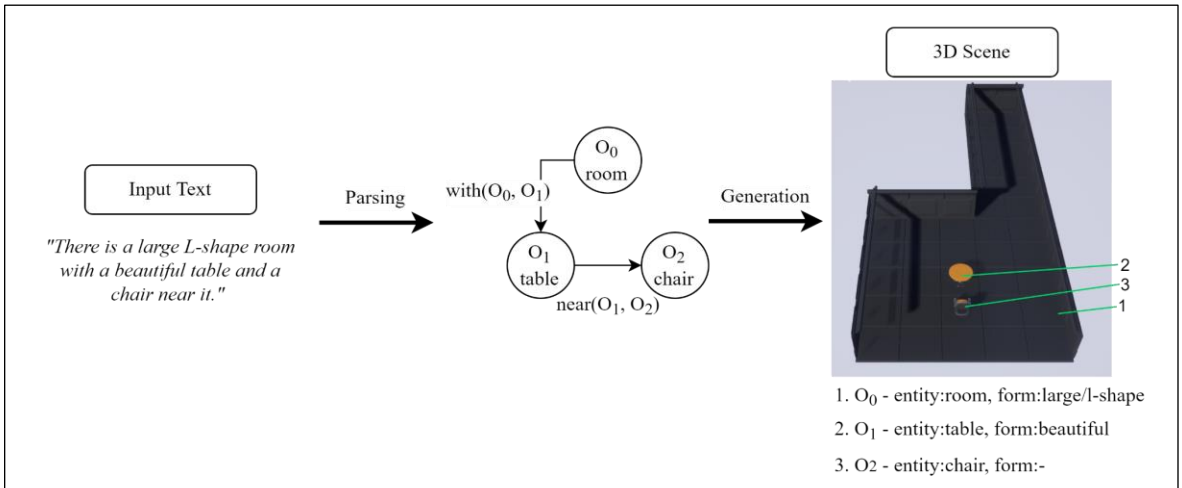


Рис. 8. Иллюстрация архитектуры алгоритма

Fig. 8. An algorithm architecture illustration

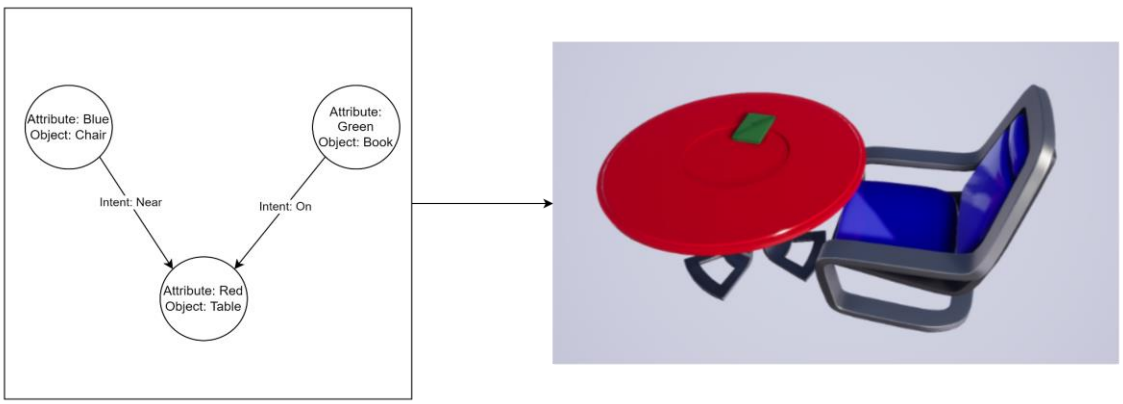


Рис. 9. Шаблон сцены

Fig. 9. A stage template

трехмерных моделей для визуализации данных.

NLTK (https://www.nltk.org/) – эффективная платформа для задач обработки текстов на естественном языке. Представляет собой простые интерфейсы для более чем 50 корпусов и лексических ресурсов, таких как WordNet (https://wordnet.princeton.edu/). Также в NLTK присутствуют наборы библиотек обработки текста для классификации, токенизации, выделения корней, тегов, синтаксического и семантического анализа, оболочки для промышленных библиотек NLP и прочие функции для обширной работы с текстом. Эта библиотека содержит в себе множество полезных и необходимых функций для обработки входных данных.

Pandas (https://pandas.pydata.org/) – быстрый, гибкий, мощный и простой в использовании инструмент для анализа и обработки данных. Библиотека является высокоуровневой, поскольку за ее основу взята низкоуровневая библиотека NumPy (https://numpy.org/), написанная на языке C, что делает Pandas более производительной, чем аналогичные инструменты. На сегодняшний день эта библиотека является наиболее гибкой, быстро развивающейся и продвинутой в области обработки текста на естественном языке.

Gensim (https://github.com/RaRe-Technologies/gensim) – библиотека обработки текстовых данных на естественном языке (подобна предыдущим), которая, помимо всего прочего, способна работать с векторными моделями данных из текста, а также создавать тематические модели на основе входных данных описания. Подобные операции называют тематическим моделированием – метод извлечения определенных тем в обрабатываемом тексте. В рассматриваемом случае извлечение тем необходимо для структурирования и описания основных тем и вычленения на этой основе определенных объектов с последующей классификацией и созданием связей между ними.

H5PY (https://docs.h5py.org/en/stable/) – интерфейс для двоичного формата HDF5, необходимый для записи и извлечения модели, полученной в результате обучения. HDF5 позволяет хранить огромные объемы числовых данных и легко манипулировать ими, используя Pandas. Тысячи наборов данных могут храниться в одном файле, классифицироваться и маркироваться с помощью имеющегося функционала инструмента.

Перечисленные технологии покрывают ту часть работы, которая касается обучения и обработки данных. Оставшиеся функции, непосредственно связанные с конечной интерпретацией данных и дальнейшей генерацией и наполнением трехмерной сцены, реализуют алгоритм, разработанный без использования дополнительных технологий и библиотек.

На рисунке 10 показано взаимодействие отдельных инструментов. Представленное комплексное решение исправляет множество недоработок, модернизируя структуризацию получаемого в ходе обработки текста результата в формате связей между найденными сущностями.

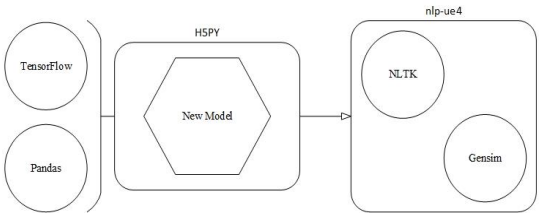


Рис. 10. Схема работы инструментов

Fig. 10. The scheme of the tools

Для построения массива данных об объектах необходимо ввести отдельные структуры:

– описание объекта $E_j = <N, a_1, \ldots, a_m{}^j>$, в котором находятся название N и массив атрибутов a_i, где m^j – количество выявленных атрибутов сущности E_j;

– связи между объектами $R_{i,j} = <p_{ij}, E_i, E_j>$, где p_{ij} – параметр, отвечающий за расположение объекта E_i по отношению к центральному объекту E_j (уже находящемуся на сцене, по отношению к которому уточняется расположение объекта E_i).

В результате получается разреженная матрица R, где содержатся все связи между объектами, участвующие в действиях друг с другом: $R = \{R_{i,j}, i, j \in (0, K]\}$, K – количество выявленных сущностей сцены.

Сущности E_t и E_q, содержащие в качестве центра одинаковый объект E_j с $p_{tj} = p_{qj}$, размещаются вместе – на одной поверхности центрального объекта (рис. 11).

Весь процесс проверки свободного места осуществляется с помощью обхода ячеек целочисленного массива данных. Подобный метод включает в себя сохранение клеток, уже занятых сущностями, и распределение на следующие подходящие варианты.

Выбор точки появления определенной сущности вычисляется по радиусу случайных значений, которые варьируются от $[X - \frac{Scale}{4};$

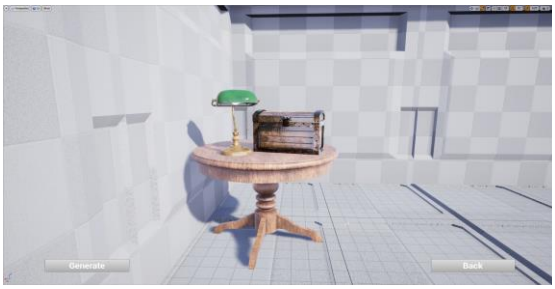


Рис. 11. Сгенерированные связи между объектами на столе

Fig. 11. Generated links between the objects on the table

$Y - \frac{Scale}{4}]$ до $[X + \frac{Scale}{4}; Y + \frac{Scale}{4}]$, где X, Y – координаты центра выбранной подматрицы; *Scale* – параметр, отвечающий за размер одной клетки. Таким образом, расстановка объектов происходит в центральной части подматрицы со случайной погрешностью в заданном интервале. При вычислении расположения сущности относительно уже находящейся в клетке объекта сначала выбирается случайная сторона из четырех областей в клетке, затем выбранная область делится еще на три части и снова случайным образом выбирается одна из них (рис. 12).

После завершения процесса распределения местоположения объектов, задействованных в описании текста, происходит визуализация готовой сцены с последующей возможностью перераспределения всех сущностей в другом порядке, включая форму рассматриваемой комнаты. Последовательность процессов внутри инструмента такова:

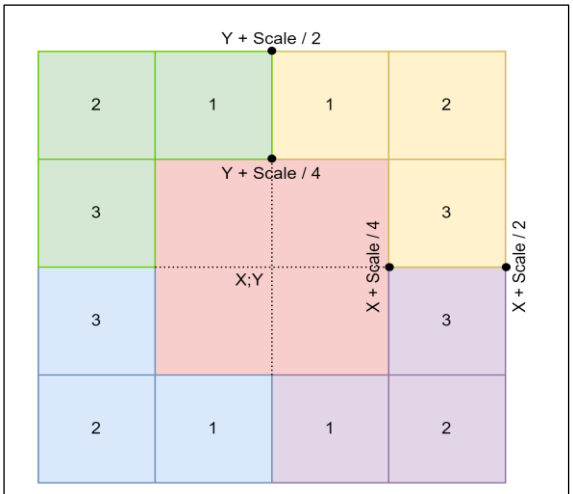


Рис. 12. Алгоритм нахождения точки появления объекта в клетке

Fig. 12. An algorithm for finding the point of object appearance in a cell

– первичное обучение модели на основе табличных данных;

– ввод текстовых данных описания сцены;

– обработка полученного сообщения нейронной сетью на основе обученной модели;

– вывод результата в формате сущностей и связей между ними;

– обработка и структуризация объектов;

– сбор атрибутов для каждой полученной сущности;

– визуализация трехмерной сцены.

В результате из исходного текстового описания сцены получается массив, состоящий из структур данных, где каждый элемент содержит связь между объектами (Intent) и структуру сущности (Entity), состоящую из названия объекта и массива атрибутов.

Для генерации сцены используется этот массив с обходом каждого элемента в строке. При упоминании, например, стола с атрибутом small рядом со стеной алгоритм выставит маленький стол рядом со стеной. Подобным образом происходит и размещение объектов около друг друга, друг на друге или в другой конфигурации. Для этого добавляется дополнительный параметр во внешней таблице, где хранятся модели сущностей и их размеры, в виде высоты объекта и погрешности для выставления более мелких предметов на нем (рис. 9).

Обсуждение результатов

На данный момент алгоритм способен принимать текст любого объема, но существует ограничение на максимальное количество сущностей и связей между ними, указанных в одном предложении (не более 10).

Алгоритм способен генерировать сцену в размере от 4 до 30 клеток в зависимости от описания сцены и ограничивается параметрами закрытого помещения.

Алгоритм способен генерировать по запросу около пяти вариаций сцен в секунду.

Для иллюстрации работы инструмента проведены эксперименты, в результате которых были сгенерированы сцены по текстовому описанию. В ходе экспериментов были введены описания локации, включающие в себя объекты, находящиеся в ней, и связи между ними. Также был запущен процесс генерации 10 трех-

мерных сцен. Параллельно с этим воспроизводились создание такой же комнаты вручную и расстановка всех объектов, в том числе фиксировались границы этой локации в виде стен и пола.

Эксперимент А. *There is a small room. A table stands near the wall. A small chair near this table.* (Это маленькая комната. Стол находится рядом со стеной. Маленький стул стоит рядом со столом.)

Результатом стала трехмерная сцена, выбранная из сгенерированных 10 сцен (субъективно лучшая, в целом все полученные сцены хороши) (рис. 13а).

В процессе обработки приведенного текста получены следующие сущности, их атрибуты и связи:

Room (small) – Table–NEAR–Wall
Table – Chair–NEAR–Table
Chair (small) – нет.

Общее затраченное время на создание 10 вариаций сцен – 2 секунды. Общее затраченное время на сборку сцены вручную – 6 минут.

Эксперимент Б. *A small room. A shelf somewhere. A large book on a shelf. A table near the wall. A chair stands near the table. A lamp lies on the table and a small book lies on a table. A large chest stands near the wall.* (Маленькая комната. Полка находится где-то. Большая книга на полке. Стол стоит рядом со стеной. Стул находится рядом с этим столом. Лампа и маленькая книга лежат на столе. Большой сундук находится рядом со стеной.)

Результат: трехмерная сцена (рис. 13б) – генерация одной из 10 сцен.

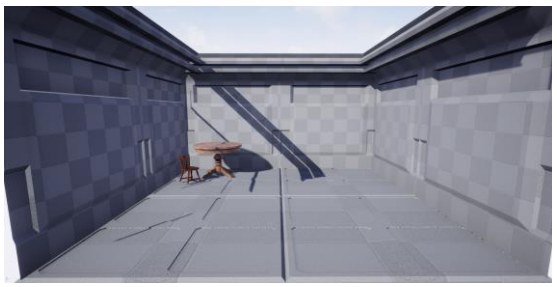
В процессе обработки текста получены следующие сущности, их атрибуты и связи:

Room (small) – Shelf–RANDOM–Room
Shelf – Book (L) –ON–Shelf
Book (large) – Table–NEAR–Wall
Table – Chair–NEAR–Table
Chair – Lamp–ON–Table
Lamp – Book (S) –ON–Table
Book (small) – Chest–NEAR–Wall
Chest – нет.

Общее затраченное время на создание 10 вариаций сцен – 2 секунды. Общее затраченное время на сборку сцены вручную – 30 минут.

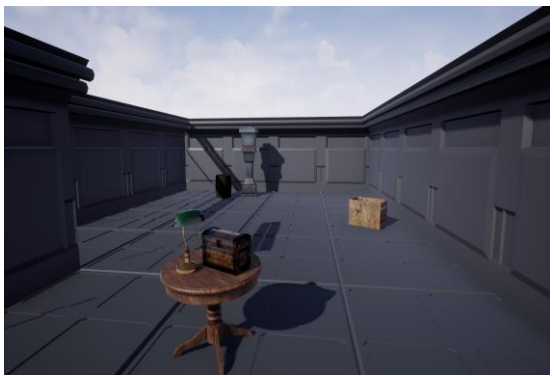
Эксперимент В. *There is a large l-shape room. A table stands somewhere. A small chest lies on the table and a large lamp on the table. Somewhere, a plank stands alone. A pillar stands near one of the wall and a barrel near the pillar.* (Это большая L-образная комната. Стол находится где-то. Маленький сундук лежит на столе вместе с большой лампой. Где-то находится одинокая доска. Столб находится рядом со стеной, и бочка стоит рядом со столбом.)

Полученный результат: трехмерная сцена (рис. 13в) – генерация одной из 10 сцен.



а)

б)



в)

Рис. 13. Пример генерации одной из 10 сцен: а) эксперимент А, б) эксперимент Б, в) эксперимент В

Fig. 13. An example of generating one of 10 scenes: a) A experiment, б) Б experiment, в) B experiment

В процессе обработки текста получены следующие сущности, их атрибуты и связи:

Room (large/l-shape) – Table–RANDOM–Room
Table – Chest–ON–Table
Chest (small) – Lamp–ON–Table

Lamp (large)	–	Plank–RANDOM–Room
Plank	–	Pillar–NEAR–Wall
Pillar	–	Barrel–NEAR–Plank
Barrel	–	нет.

Общее затраченное время на создание 10 вариаций сцен – 2 секунды. Общее затраченное время на сборку сцены вручную – 30 минут.

Заключение

Использование разработанного инструмента для получения трехмерных сцен на основе исходного текстового описания значительно сокращает время разработки в отличие от ручной сборки данных. Инструмент предоставляет огромное множество вариантов сборки сцен, что упрощает работу при необходимости создания альтернативных вариантов сцен на основе одного и того же текстового описания.

Важно отметить, что для работы алгоритма не требуются высокие мощности компьютера, поскольку он использует уже обученную модель на заранее введенных данных. При работе с инструментом от пользователей не требуются глубокие технические знания в области трехмерного моделирования и программирования.

Инструмент может быть кардинально улучшен увеличением максимального количества сущностей в одном предложении, а расширение сущностей и атрибутов во внутреннем датасете может значительно увеличить функциональность и гибкость инструмента в решении пользовательских задач.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Chen K., Choy Ch., Savva M., Chang A., Funkhouser Th., Savarese S. Text2Shape: Generating shapes from natural language by learning joint embeddings. In: Computer Vision – ACCV, 2018, pp. 100–116. DOI: 10.1007/978-3-030-20893-6_7.

2. Oscar M., Roi B., Richard L., Sagie B., Rana H. Text2Mesh: Text-driven neural stylization for meshes. IEEE Computer Society. Proc. CVPR, 2021, pp. 13492–13502.

3. Zhengfei K., Kyle O., Menglei Ch., Zeng H., Panos A., Sergey T. NeROIC: Neural rendering of objects from online image collections. ArXiv, 2022, vol. abs/2201.02533, pp. 1–17. URL: https://www.semanticscholar.org/reader/1372924688f627eacbc1e8c97d33399c1d648309 (дата обращения: 10.07.2022).

4. Chang A., Monroe W., Savva M., Potts C., Manning C.D. Text to 3D Scene generation with rich lexical grounding. Proc. LIII Annual Meeting ACL, 2015, vol. 1, pp. 53–62. DOI: 10.3115/v1/P15-1006.

5. Кугуракова В.В., Сахибгареева Г.Ф., Нгуен А.З., Астафьев А.М. Пространственная ориентация объектов на основе обработки текстов на естественном языке для генерации раскадровок // Электронные библиотеки. 2020. Т. 23. № 6. С. 1213–1238. DOI: 10.26907/1562-5419-2020-23-6-1213-1238.

6. Michel O., Bar-On R., Liu R., Benaim S., Hanocka R. Text2Mesh: Text-Driven Neural Stylization for Meshes. ArXiv, 2021, vol. abs/2112.03221, pp. 1–15. URL: https://www.semanticscholar.org/reader/d15b27edf3630728cdb40f49946365d9011641cf (дата обращения: 10.07.2022).

7. Mildenhall B., Srinivasan P.P., Tancik M., Barron J.T., Ramamoorthi R., Ng R. NeRF: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. In: Computer Vision – ECCV, 2020, vol. 12346 LNCS, pp. 405–421. DOI: 10.1007/978-3-030-58452-8_24.

8. Gadelha M., Maji S., Wang R. 3D Shape induction from 2D views of multiple objects. Proc. Int. Conf. 3DV, 2017, pp. 402–411. DOI: 10.1109/3DV.2017.00053.

9. Rueegg N., Zuffi S., Schindler K., Black M.J. BARC: Learning to regress 3D dog shape from images by exploiting breed information. ArXiv, 2022, pp. 1–9. DOI: 10.48550/arXiv.2203.15536. URL: https://barc.is.tue.mpg.de/media/upload/00931_notchecked_c.pdf (дата обращения: 10.07.2022).

10. Tang C., Yang X., Wu B., Han Z., Chang Y. Part2Word: Learning joint embedding of point clouds and text by matching parts to words. ArXiv, 2021, pp. 1–9. URL: https://www.semanticscholar.org/reader/726c93dad32d5010b5ffbb9ecbba7a97b714881e (дата обращения: 10.07.2022).

11. Esteves C., Sud A., Luo Z., Daniilidis K., Makadia A. Cross-domain 3D equivariant image embeddings. ICML, 2018, pp. 1–15.

12. Sitzmann V., Thies J., Heide F., Niebner M., Wetzstein G., Zollhofer M. DeepVoxels: Learning persistent 3D feature embeddings. Proc. IEEE/CVF CVPR, 2019, pp. 2432–2441. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00254.

13. Deprelle T., Groueix T., Fisher M., Kim V.G., Russell B.C., Aubry M. Learning elementary structures for 3D shape generation and matching. In: Advances in Neural Information Processing Systems, 2019, pp. 7433–7443.

14. McGough M. Generating 3D models with PolyGen and PyTorch. Towards Data Science, 2020. URL: https://towardsdatascience.com/generating-3d-models-with-polygen-and-pytorch-4895f3f61a2e (дата обращения: 10.07.2022).

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.329-339

Received 27.07.22, Revised 05.08.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 329–339

Structuring natural text entities using neural networks for generating 3D-scenes

B.A. Kozar [1], *Engineer, bogdan.kozar.itis@gmail.com*
V.V. Kugurakova [1], *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, vlada.kugurakova@gmail.com*
G.F. Sakhibgareeva [1], *Assistant, gulnara.sahibgareeva42@gmail.com*

[1] *Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russian Federation*

Abstract. The subject of this study is the automation using neural networks of the process of assembling three-dimensional scene, which can be used both to generate three-dimensional scenes or locations in computer games from a textual description, and to prepare sequences of three-dimensional synthetic data. This topic is relevant for developing three-dimensional graphics including interactive projects – games, simulators, AR/VR applications.

After analyzing and comparing the results obtained in a number of well-known completed projects, the authors determine technologies and software libraries, which allow effectively achieving the desired goal - to provide fast assembly of three-dimensional scenes filled with objects according to the text description. Thanks to synthesis of the best solutions, it was possible to create an optimal concept that allows achieving quick and qualitative result with the right rules of building geometrical relations between scene objects. There is a formed list of requirements to the designed tool and its architecture. Input data for using this tool is a text in natural language; output data is a scene with objects corresponding to the description used.

The main result achieved is a finished software tool for Unreal Engine developed on the basis of the nlp-ue4 neural network and the set of tensorflow, nltk, pandas, gensim, h5py libraries. The readiness of the tool is evaluated as a prototype solution, which can be integrated into the drafting stage of interactive projects with three-dimensional graphics.

To evaluate the created tool effectiveness objectively, the authors have conducted the experiments that proved that its use even in the current version significantly reduces development time and does not require a user to have skills in programming or creating three-dimensional graphics.

There is also a discussion about the research development prospects.

Keywords: computer graphics, 3D modeling, visualization, procedural generation, level design, automation, NLP, neural networks, Unreal Engine, computer games.

Acknowledgements. *This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").*

References

1. Chen K., Choy Ch., Savva M., Chang A., Funkhouser Th., Savarese S. Text2Shape: Generating shapes from natural language by learning joint embeddings. In: *Computer Vision – ACCV*, 2018, pp. 100–116. DOI: 10.1007/978-3-030-20893-6_7.

2. Oscar M., Roi B., Richard L., Sagie B., Rana H. Text2Mesh: Text-driven neural stylization for meshes. *IEEE Computer Society. Proc. CVPR*, 2021, pp. 13492–13502.

3. Zhengfei K., Kyle O., Menglei Ch., Zeng H., Panos A., Sergey T. NeROIC: Neural rendering of objects from online image collections. *ArXiv*, 2022, vol. abs/2201.02533, pp. 1–17. Available at: https://www.semanticscholar.org/reader/1372924688f627eacbc1e8c97d33399c1d648309 (accessed July 10, 2022).

4. Chang A., Monroe W., Savva M., Potts C., Manning C.D. Text to 3D Scene generation with rich lexical grounding. *Proc. LIII Annual Meeting ACL*, 2015, vol. 1, pp. 53–62. DOI: 10.3115/v1/P15-1006.

5. Kugurakova V.V., Sakhibgareeva G.F., Nguen A.Z., Astafiev A.M. Spatial orientation of objects based on processing of a natural language text for storyboard generation. *Russian Digital Libraries J.*, 2020, vol. 23, no. 6, pp. 1213–1238. DOI: 10.26907/1562-5419-2020-23-6-1213-1238.

6. Michel O., Bar-On R., Liu R., Benaim S., Hanocka R. Text2Mesh: Text-Driven Neural Stylization for Meshes. *ArXiv*, 2021, vol. abs/2112.03221, pp. 1–15. Available at: https://www.semanticscholar.org/reader/d15b27edf3630728cdb40f49946365d9011641cf (accessed July 10, 2022).

7. Mildenhall B., Srinivasan P.P., Tancik M., Barron J.T., Ramamoorthi R., Ng R. NeRF: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. In: *Computer Vision – ECCV*, 2020, vol. 12346 LNCS, pp. 405–421. DOI: 10.1007/978-3-030-58452-8_24.

8. Gadelha M., Maji S., Wang R. 3D Shape induction from 2D views of multiple objects. *Proc. Int. Conf. 3DV*, 2017, pp. 402–411. DOI: 10.1109/3DV.2017.00053.

9. Rueegg N., Zuffi S., Schindler K., Black M.J. BARC: Learning to regress 3D dog shape from images by exploiting breed information. *ArXiv*, 2022, pp. 1–9. DOI: 10.48550/arXiv.2203.15536. Available at: https://barc.is.tue.mpg.de/media/upload/00931_notchecked_c.pdf (accessed July 10, 2022).

10. Tang C., Yang X., Wu B., Han Z., Chang Y. Part2Word: learning joint embedding of point clouds and text by matching parts to words. *ArXiv*, 2021, pp. 1–9. Available at: https://www.semanticscholar.org/reader/726c93dad32d5010b5ffbb9ecbba7a97b714881e (accessed July 10, 2022).

11. Esteves C., Sud A., Luo Z., Daniilidis K., Makadia A. Cross-domain 3D equivariant image embeddings. *ICML*, 2018, pp. 1–15.

12. Sitzmann V., Thies J., Heide F., Niebner M., Wetzstein G., Zollhofer M. DeepVoxels: Learning persistent 3D feature embeddings. *Proc. IEEE/CVF CVPR*, 2019, pp. 2432–2441. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00254.

13. Deprelle T., Groueix T., Fisher M., Kim V.G., Russell B.C., Aubry M. Learning elementary structures for 3D shape generation and matching. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2019, pp. 7433–7443.

14. McGough M. Generating 3D models with PolyGen and PyTorch. *Towards Data Science*, 2020. Available at: https://towardsdatascience.com/generating-3d-models-with-polygen-and-pytorch-4895f3f61a2e (accessed July 07, 2022).

Для цитирования

Козар Б.А., Кугуракова В.В., Сахибгареева Г.Ф. Структуризация сущностей естественного текста с использованием нейронных сетей для генерации трехмерных сцен // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 329–339. DOI: 10.15827/0236-235X.139.329-339.

For citation

Kozar B.A., Kugurakova V.V., Sakhibgareeva G.F. Structuring natural text entities using neural networks for generating 3D-scenes. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 329–339 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.329-339.

УДК 519.683.8
DOI: 10.15827/0236-235X.139.340-347
Дата подачи статьи: 25.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 340–347

Фильтрационная модель и параллельные вычисления характеристик кровотока в системе кровообращения при наличии закупоривающего кольцевого тромба

В.М. Конюхов [1], *д.ф.-м.н., профессор, vladimir.konyukhov@kpfu.ru*
М.Г. Храмченков [1], *д.ф.-м.н., профессор, mkhramch@gmail.com*
И.В. Конюхов [2], *к.ф.-м.н., доцент, i.konyukhov@innopolis.ru*

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*
[2] *Университет Иннополис, г. Иннополис, 420500, Россия*

На основе общих уравнений фильтрации выполнено математическое описание течения крови в системе кровообращения при наличии тромба пористой структуры, сформировавшегося на стенке кровеносного сосуда, с учетом движения флюида внутри тромба и его разрушения под действием гидродинамических сил. В модели учтено, что изменение внутренних нагрузок, возникающих в материале тромба, приводит к формированию неоднородного распределения проницаемости, которая является функцией пространственных координат и времени. В предположении симметричности тороидальной формы тромба рассмотрена плоская двумерная задача в поперечном разрезе сосуда и тромба.

Для решения поставленной задачи использованы конечно-разностные методы и разработаны итерационные алгоритмы с применением технологий параллельных вычислений. Распараллеливание расчетов проведено также при визуализации гидродинамических характеристик потоков. Численная и алгоритмическая модели реализованы в программном комплексе, который позволяет проводить вычислительные эксперименты с одновременной визуализацией их результатов. Проведен анализ влияния формы и структуры кольцевого тромба, образовавшегося у стенки кровеносного сосуда, на основные гидродинамические характеристики, определяющие вероятность отрыва тромба от стенки.

Показано, что наиболее опасными являются тромбы с острым углом наклона между внешней границей тромба и стенкой сосуда. Это обусловлено двумя факторами: возникающим вращательным моментом сил, стремящихся оторвать передний край тромба от стенки сосуда, и локальным градиентом давления у основания сгустка, значительно превышающим градиент давления в сосуде вне тромба. При этом проницаемость тромба влияет на общий перепад давления и максимальный градиент давления, но практически не изменяет направление потока жидкости в кровеносном сосуде.

Ключевые слова: *фильтрационная модель, численные алгоритмы, параллельные вычисления, система кровообращения, закупоривающий кольцевой тромб*.

Восстановление поврежденных кровеносных сосудов человека и остановка кровотечения определяются сложным процессом свертывания крови, в ходе которого в жидкой крови образуются твердые фибриновые сгустки. Травмированные участки стенок сосудов покрываются такими сгустками и тромбоцитами, постепенно закупоривающими места повреждения. Свертывание крови является многокаскадной реакцией, которая реализуется по двум различным программам сгущения крови, объединяющимся в общий процесс образования тромбов. На каждом этапе в реакции участвуют специфические белки и их сложные соединения (энзимы). Одна из таких программ, внутренняя, запускается, когда кровь начинает контактировать с тканью любого участка внутри кровеносного сосуда, называемой внешней поверхностью – за исключением ткани эндотелия. На таких внешних поверхностях в крови автоматически начинается процесс свертывания как ответ на повреждение сосуда. Другая программа, внешняя, включается при серьезных травмах сосудов для обеспечения быстрого тромбообразования. Обе программы дополняют друг друга, и конечным результатом их выполнения является фибриновый тромб, который формируется независимо от того, какая из этих программ была активизирована изначально.

Многокаскадная реакция свертывания реализуется как серия последовательных реакций, в которой продукт предшествующего шага активизирует следующий. Чтобы реакции протекали правильно, необходимо наличие соответствующих сгущающих кровь факторов, то есть участие активных и неактивных белков с конкретными структурами и функциональностями. Белки служат активизаторами и предшественниками прочих молекул, необходимых для образования и роста тромба – тромбозиса. Конечным этапом тромбозиса является преоб-

разование растворимого фактора – фибриногена – в нерастворимый фибриновый тромб. У позвоночных животных, а также у людей преобразование фибриногена проходит три упорядоченных этапа: 1) расщепление белков на необходимые аминокислоты, активируемое ферментом тромбином (протеолизис) для ускорения протекания реакций, 2) самосборка вновь сформированных фибрин-мономеров, 3) формирование перекрестных связей собранного фибрина для упрочения тромба, структура которого представляет собой множество переплетенных фибриновых нитей. Сгусток фибрина является структурной основой тромба, состоящего из фибрина и встроенных в него тромбоцитов и клеток крови. Фибриновые нити химически связаны в местах их пересечения особым упрочивающим ферментом, что обеспечивает способность тромба противостоять току крови и предотвращать кровоизлияние из раны [1]. Свойства, позволяющие тромбам эффективно закупоривать раны, являются механическими и включают такие характеристики, как упругость и вязкость [2]. Структура и механические свойства тромбов, которые могут быть очень разнообразными, важны для поведения фибрина при заживлении ран сосудов и предотвращении кровопотери.

Фибринолитическая система наряду с фибрином включает в себя тканевый активатор, превращающий белок плазминоген в активный энзим – плазмин, участвующий в расщеплении или растворения тромба – лизисе фибрина [3]. Этот процесс всегда сопровождает свертывание крови с целью предотвращения закупорки кровеносных сосудов сгустками фибрина и устранения тромбов после заживления ран. В критических ситуациях, например, при закупорке важных кровеносных сосудов тромбами, оторвавшимися от стенки сосуда, возникает необходимость в растворении тромбов с помощью литических средств с целью предотвращения тяжелых осложнений.

Не останавливаясь на детальном описании очень сложной и разнообразной структуры кровяного тромба, отметим, что механизмы возникновения тромбов из протромбина подробно изложены в [4, 5]. Физическая и биохимическая структуры тромба зависят от многих факторов: концентрации тромбина и фибриногена, ионных сил в растворе и гемодинамических сил [4, 6, 7], а также влияния литических агентов, перенос которых происходит за счет как конвекции, так и диффузии.

Вероятность образования сгустка внутри сосуда, его лизиса и отрыва определяется многочисленными обстоятельствами, такими как реология крови, целостность стенки сосуда, деятельность кровяных телец, фибринолиз, факторы сгущения, а также структурой, механическими свойствами и проницаемостью сгустка. Сгусток крови должен одновременно обладать нужной степенью жесткости и пластичности для остановки потока крови, и усваиваться литическими ферментами, чтобы не образовывать тромб, вызывающий сердечные приступы, инсульты или легочную эмболию. Таким образом, поскольку процессы тромбозиса и лизиса весьма сложны, тесно взаимосвязаны, происходят с участием многочисленных факторов крови, характеризуются проявлением различных химических и физических эффектов, применение методов математического и численного моделирования для решения соответствующих задач биологии и медицины [8–10] имеет большое теоретическое и практическое значение.

Математическое описание

При математическом моделировании движения крови по кровеносным сосудам обычно используют предположение о том, что сосуды представляют собой системы трубок с твердыми или эластичными стенками. Уравнения, описывающие течение крови со скоростью V, как правило, включают в себя уравнение неразрывности

$$divV = 0 \qquad (1)$$

и закон сохранения количества движения в форме уравнений Навье–Стокса.

При таком подходе гидродинамические характеристики потока крови зависят от формы поперечного сечения сосуда, изменение которой обусловлено как появлением тромба и его ростом или деградацией, так и отрывом от стенки сосуда. При этом материал тромба считается непроницаемым, так что, подобные модели позволяют изучать лишь внешнее воздействие потока крови на прочностные характеристики связи «тромб–стенка сосуда». Однако, как показывают эксперименты, тромб имеет сложную пористую структуру, и внутри него происходит фильтрационное движение флюида [11]. Оно приводит к возникновению дополнительных внутренних нагрузок в материале всего тромба из-за значительных перепадов давления и, конечно же, в наиболее опасных местах наименее прочного соединения тромба с сосудом.

В настоящей статье основное внимание уделяется прежде всего расчету фильтрационного движения некоторых компонентов крови внутри тромба и изучению эффекта фильтрационного разрушения тромба, а детальная модель движения крови по сосуду не рассматривается. В рамках такого упрощенного подхода внешний поток крови в свободном от тромба сечении сосуда моделируется как фильтрация в пористой среде с пористостью, равной единице, а внутренний поток – как фильтрация в области, занятой веществом тромба, появляющегося и развивающегося у стенки сосуда, с пористостью m, меньшей единицы. Система уравнений, описывающих данный процесс, помимо уравнения неразрывности (1), включает в себя уравнения многокомпонентного массопереноса

$$\frac{\partial mC_i}{\partial t} + divVC_i + \frac{\partial a_i}{\partial t} = 0,$$
$$V = -\frac{k}{\mu}\nabla p,\ \frac{\partial a_i}{\partial t} = f(C_1, ..., t). \quad (2)$$

Здесь C_i – концентрации компонентов крови; a_i – концентрация соответствующего компонента, обусловленная его адсорбцией; k – коэффициент проницаемости; μ – вязкость крови; p – давление в крови. В предлагаемой модели (1), (2) именно адсорбция определяет процесс образования тромба. Важнейшие компоненты процесса – протромбин, тромбин, фибриноген, фибрин, различные литические агенты и т.д. Как показывают многочисленные экспериментальные наблюдения, этот процесс образования тромба происходит гораздо быстрее по сравнению с процессом его отрыва, поэтому можно считать, что в момент начала отрыва сгусток полностью сформирован.

Если в сосуде образовался тромб, то процесс его разрушения, под которым будем понимать отрыв всего тромба целиком или некоторой его части, обусловлен двумя основными факторами. Во-первых, увеличение скорости внешнего потока крови из-за уменьшения просветности сосуда в окрестности образовавшегося тромба, приводящего к росту гидравлического сопротивления в потоке. Во-вторых, наличие внутреннего фильтрационного течения в пористой среде тромба, из-за которого возникающий перепад давления в каких-то областях сгустка может превысить некоторое критическое значение. Как правило, отрыв вещества начинается после достижения градиентом давления $|\nabla p|$ некоторого значения I_0, характерного для данного вещества. Отметим, что разрушение может затрагивать не все, а только некоторые области тромба. При этом тромб постепенно теряет способность сопротивляться срезающей нагрузке со стороны потока, и со временем происходит его отрыв от стенки сосуда.

Для описания действия внутреннего фактора введем неотрицательную величину N объемной доли вещества тромба, способного к фильтрационному разрушению, и запишем в общем виде уравнение

$$\partial N / \partial t = -\Psi(N, |\nabla p| - I_0(N)), \quad (3)$$

которое определяет скорость разрушения сгустка при $|\nabla p| > I_0$. Отметим, что величина I_0 может зависеть от N. Функция $\Psi(N, |\nabla p| - I_0(N))$ положительна при $N > 0$, $|\nabla p| > I_0$ и равна нулю в других случаях. Можно считать, что величина N явно определяет прочностные свойства пористого материала тромба к моменту начала его разрушения. Функция $\Psi(N, |\nabla p| - I_0(N))$, зависимость $I_0(N)$ и исходное значение N_0 считаются заданными и подлежат определению на основе экспериментальных данных. По-видимому, функция Ψ должна быть возрастающей по аргументу N, а функция $I_0(N)$ – убывающей, что должно отражать более легкое разрушение тромба на начальном этапе, когда вымывается менее прочно удерживаемая часть вещества (в ходе процесса с уменьшением N критический градиент I_0 растет, а скорость разрушения Ψ падает). В первом приближении положим $I_0 = \text{const}$, скорость разрушения – пропорциональной разности $|\nabla p| - I_0$ при $|\nabla p| > I_0$ и, пренебрегая зависимостью скорости разрушения от аргумента N, запишем функцию Ψ в виде $\Psi = \beta(|\nabla p| - I_0)$, $|\nabla p| > I_0$, $N > 0$.

При разрушении вещества тромба с изменением N могут изменяться и его фильтрационные свойства. В этом случае необходимо задать зависимость коэффициента проницаемости k тромба от N и совместно решать систему уравнений (1)–(3). После построения полей давления и фильтрационных градиентов решение уравнения (3) позволит найти распределение $N(x, y, z, t)$.

Численная и алгоритмическая модели

Уравнения (1)–(3) решим конечно-разностными методами, подробное описание которых приведено в работах [12, 13]. Отметим некоторые принципиальные особенности построенной численной модели.

Сеточную область строим так, что значения h_x и h_z шагов ее разбиения вдоль горизонталь-

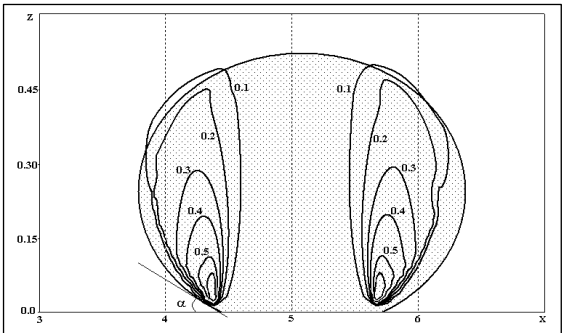
ной и вертикальной осей OX и OZ постоянны, но могут быть и различными. Для улучшения аппроксимации фильтрационных потоков компонентов крови добавим дополнительные узлы за счет смещения исходной сетки на полшага вдоль осей OX и OZ. Уравнения (1)–(3) аппроксимируем в узлах этих сеток полностью консервативной конечно-разностной схемой. Полученную систему алгебраических уравнений относительно давления решим двухшаговым итерационным методом [12, 13] с высокой скоростью сходимости (3–5 итераций) на каждом временном слое. Его скорость не зависит ни от общего числа узлов сетки, ни от коэффициентов уравнений (1)–(3), значения которых могут отличаться на несколько порядков. Ускорение итерационного процесса расчета давления достигается за счет параллельных вычислений элементов матрицы системы линейных алгебраических уравнений большой размерности. Численная модель реализована в программном обеспечении с использованием языка программирования C#, библиотеки параллельных задач (TPL), набора библиотек от NVIDIA CUDA и OPENCL. Разработанная программа позволяет моделировать процессы массопереноса в системе «кровеносный сосуд–тромб» с одновременной визуализацией результатов вычислений, которая производится также с применением распараллеливания операций. Некоторые из результатов расчетов гидродинамических характеристик потоков приведены далее.

Результаты вычислительных экспериментов

В качестве иллюстрации приведем результаты вычислительных экспериментов и их визуализации, полученные при расчете гидродинамических характеристик кровотока в кровеносном сосуде при наличии на его внутренней стенке кольцевого тромба симметричной тороидальной формы, сформировавшегося в результате взаимодействия четырех основных компонентов крови – протромбина, тромбина, фибриногена и фибрина, ответственных за процессы внутри тромба. Проницаемость k_c считается заданной. В силу симметрии в данном случае для изучения основных характеристик течения крови в тромбе достаточно рассмотреть задачу плоскопараллельной двумерной фильтрации в половине продольного сечения сосуда и тромба, показанного на рисунке. Область, занимаемая тромбом, на рисунке заштрихована.

В разрезе граница ножки тромба совпадает с внутренней стенкой сосуда, а внутри него тромб имеет форму окружности. Координатные оси OX и OZ с началом на внутренней границе сосуда направлены соответственно к этой границе и ортогонально к ней. Для удобства представления результатов расчетов геометрические параметры системы «сосуд–тромб» выражены в долях диаметра D сосуда, то есть единица длины соответствует значению D. Проницаемость k_c тромба также выражается в долях проницаемости k_v кровеносного сосуда, которая принимается за единицу. Поскольку наличие тромба заметно влияет на кровоток в системе «кровеносный сосуд–тромб» только вблизи тромба, достаточно рассмотреть участок сосуда с непроницаемой стенкой и длиной около нескольких его диаметров. Начало координат расположено на расстоянии $5D$ от середины тромба. Двумерная задача в таком продольном разрезе решена при заданной массовой скорости Q_i крови на входе в сосуд и фиксированном давлении p_o на его выходе. Поток крови движется вдоль положительного направления оси OX, набегая на тромб.

Рассмотрим сначала результаты параллельных и последовательных вычислений. В таблице 1 приведены времена $T_{\|}$ и $T_{П}$, требуемые для решения тестовой задачи расчета поля давления в системе «сосуд–тромб» на ста временных слоях соответственно при последовательных расчетах и с использованием различных центральных процессоров Intel. Параметр $\kappa_{\|} = T_{П}/T_{\|}$ характеризует эффективность параллельных вычислений по сравнению с последовательными. В таблице 2 представлены скорости $\upsilon_{П}$ и $\upsilon_{\|}$ (кадр/сек.) визуализации двумерных полей давления в полноэкранном FullHD-разрешении при последовательном и параллельном режимах на центральных про-



Изолинии модуля градиента давления ∇p в тромбе и его окрестности при $\alpha < \pi/2$

Isolines of the ∇p pressure gradient modulus in the thrombus and its surroundings at $\alpha < \pi/2$

Таблица 1

Сравнение эффективности решения фильтрационной задачи при последовательном и параллельном режимах вычислений

Table 1

Comparing the efficiency of solving a filtration problem in sequential and parallel computing modes

Intel Core								
i5-3337U, 2,6 GHz, 2 ядра			i7-860 2,8 GHz, 4 ядра			i7-X980 3,6 GHz, 6 ядер		
$T_П$, сек.	$T_\|$, сек.	$\kappa_\|$	$T_П$, сек.	$T_\|$, сек.	$\kappa_\|$	$T_П$, сек.	$T_\|$, сек.	$\kappa_\|$
28,8	23,7	1,21	31,2	25,3	1,23	26,7	20,8	1,28

Таблица 2

Оценка скорости визуализации фильтрационных характеристик при последовательном и параллельном режимах вычислений

Table 2

Estimating the visualization speed of filtration characteristics in sequential and parallel computing modes

Intel Core								
i5-3337U			i7-860			i7-X980		
NVIDIA GeForce								
GT 640M LE, 500 MHz, 384 ядра			GTX 260, 576 MHz, 192 ядра			GTX 580, 772 MHz, 512 ядер		
$\upsilon_П$, к/с	$\upsilon_\|$, к/с	$\upsilon_\|$	$\upsilon_П$, к/с	$\upsilon_\|$, к/с	$\upsilon_\|$	$\upsilon_П$, к/с	$\upsilon_\|$, к/с	$\upsilon_\|$
1,8	3,4	1,9	1,8	4,3	2,4	2	7,2	3,6
	9,2	5,1		7,6	4,2		13,8	6,9

цессорах Intel тех же моделей (значения в верхних ячейках нижней строки таблицы) и на графических процессорах NVIDIA с использованием технологии CUDA (значения нижних ячеек). Параметр $\zeta_\| = \upsilon_П/\upsilon_\|$ отражает ускорение визуализации в параллельных режимах.

Нетрудно заметить, что в зависимости от типа процессора время $T_\|$ параллельного счета при решении уравнений фильтрации (1)–(3) сокращается на 20–30 %, при визуализации результатов – в 2–3,5 раза на центральных процессорах и в 4–7 раз на графических.

Перейдем к изучению влияния формы тромба на гидродинамические характеристики процесса. Как показал анализ вычислительных экспериментов, распределения давления $p(x, z)$ и его градиента $|\nabla p(x, z)|$ в системе «кровеносный сосуд–тромб» существенно зависят от угла α пересечения границы сгустка и стенки сосуда. Обе эти функции чувствительны к высоте тромба, влияющего на просвет сосуда. Высота сгустка также достаточно сильно влияет на величину общего перепада давления $\Delta p = p_i - p_o$ по длине сосуда, но практически не зависит от величины α. В то же время поле скоростей V и градиент $|\nabla p|$ внутри тромба в основном зависят от угла α.

Если $\alpha < \pi/2$, то максимум $\nabla p_{\max}$ градиента давления находится внутри сгустка в окрестности пересечения его границы со стенкой сосуда (см. рисунок). На рисунке показан фрагмент системы «кровеносный сосуд–тромб» в увеличенном масштабе. Вертикальный масштаб примерно в четыре раза больше горизонтального, поэтому на рисунке высота сгустка составляет немногим меньше половины диаметра сосуда. В приведенном примере $k_c = 10^{-3}$. При $\alpha < \pi/2$ в окрестностях передней и задней границ тромба образуются восходящий и нисходящий потоки жидкости соответственно.

Если $\alpha \geq \pi/2$, то максимум градиента давления $|\nabla p|$ находится также внутри сгустка крови, но не на границе сосуда, а в верхней части сгустка. В этом случае вращательный момент сил отсутствует, и предельный градиент разрушения достигается прежде всего на этой части тромба. Отметим, что значение максимума $|\nabla p|$ намного меньше, чем при $\alpha < \pi/2$, значит, вероятность разрушения тромба при $\alpha \geq \pi/2$ существенно ниже.

Величина максимального градиента $\nabla p_{\max}$ зависит не только от формы тромба, но и от его структуры. Этот факт иллюстрируют представленные во второй строке таблицы 3 значения

безразмерного максимального градиента $\gamma = \nabla p_{max}/\nabla p_0$ в зависимости от проницаемости k_c сгустка крови, форма которого показана на рисунке. Здесь $\nabla p_0 = \text{const}$ является максимальным значением градиента давления при отсутствии сгустка крови в сосуде. Легко видеть, что зависимость $\gamma(k_c)$ является нелинейной функцией от проницаемости k_c тромба. Она становится практически постоянной при $k_c \le 10^{-3}$, а ее предельное значение более чем в пятьдесят раз больше, чем ∇p_0. Очевидно, что даже из-за небольших механических нагрузок, которые стимулируют рост градиента ∇p_0, вероятность отрыва сгустка от стенки сосуда значительно возрастает.

Таблица 3

Зависимость безразмерного максимального градиента давления и безразмерного перепада давления в граничной области тромба от его проницаемости

Table 3

The dependence of the dimensionless maximal pressure gradient and the dimensionless pressure drop in the blood clot neighbourhood on its permeability

k_c	1	0.5	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
$\gamma(k_c)$	1	4.5	18.2	47.3	52.6	52.7	52.8	52.9
$\delta p(k_c)$	1	1.076	1.181	1.219	1.222	1.223	1.225	1.226

Общее падение давления Δp также растет с уменьшением проницаемости тромба. В третьей строке таблицы 3 приведены значения безразмерного перепада давления $\delta p = \Delta p_c/\Delta p_0$ в зависимости от проницаемости k_c, где Δp_c и ∇p_0 – перепады давления, соответственно, при наличии и отсутствии тромба в кровеносном сосуде. Однако рост функции $\delta p(k_c)$ не столь значителен по сравнению с функцией $\gamma(k_c)$: при $k_c \le 10^{-3}$ ее максимальное приращение составляет около 22 %.

Заключение

На основе общих уравнений многокомпонентной фильтрации построена математическая модель течения смеси различных компонентов, отвечающих за процессы образования и растворения тромба, в системе «кровеносный сосуд–тромб». Разработаны численная и алгоритмическая модели для расчета и визуализации гидродинамических характеристик массообменных процессов, реализованные в программном комплексе с применением методов параллельных вычислений на центральных процессорах и графических процессорах NVIDIA с использованием технологии CUDA.

Показана возможность ускорения вычислений на примере двумерной задачи фильтрации в кольцевом тромбе симметричной тороидальной формы. Проведен анализ влияния формы и структуры кольцевого тромба, образовавшегося у стенки кровеносного сосуда, на основные гидродинамические характеристики, определяющие вероятность отрыва тромба от стенки.

Показано, что наиболее опасной является ситуация, когда сгустки крови имеют острый угол наклона между границей ткани и стенкой кровеносного сосуда. В этом случае внутри тромба возникают два эффекта, стремящихся оторвать тромб от стенки сосуда: вращательный момент сил на передней границе сгустка, а также действие локального градиента давления у его основания, который значительно превышает градиент давления в сосуде вне тромба. Эти эффекты усиливаются по мере роста проницаемости тромба.

Результаты проведенных исследований могут быть полезны на этапах диагностики состояния тромбов в сосудах и применения соответствующих литических ферментов, предназначенных для постепенного разрушения тромба без его отрыва от стенки сосуда и предотвращения различных тяжелых осложнений.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Kattula S., Byrnes J.R., Wolberg A.S. Fibrinogen and fibrin in hemostasis and thrombosis. Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology, 2017, vol. 37, pp. 13–21. DOI: 10.1161/ATVBAHA.117.308564.

2. Nelb G.W., Gerth C., Ferry J.D., Lorand L. Rheology of fibrin clots. Biophysical Chemistry, 1976, vol. 5, no. 3, pp. 377–387. DOI: 10.1016/0301-4622(76)80050-6.

3. Weisel J.W. Fibrinogen and Fibrin. Advances in Protein Chemistry, 2005, vol. 70, pp. 247–299. DOI: 10.1016/S0065-3233(05)70008-5.

4. Weisel J.W., Nagaswami C. Computer modeling of fibrin polymerization kinetics correlated with electron microscope and turbidity observations: Clot structure and assembly are kinetically controlled. Biophys. J., 1992, vol. 63, pp. 111–128. DOI: 10.1016/S0006-3495(92)81594-1.

5. Hunziker E.B., Straub P.W., Haeberli A. A new concept of fibrin formation based upon the linear growth of interlacing and branching polymers and molecular alignment into interlocking single-stranded segments. J. of Biological Chemistry, 1990, vol. 265, no. 13, pp. 7455–7463. DOI: 10.1016/S0021-9258(19)39135-5.

6. Carr M.E., Shen L.L., Hermans J. Mass-length ratio of fibrin fibers from gel permeation and light scattering. Biopolymers, 1977, vol. 16, no. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1002/BIP.1977.360160102.

7. Еникеева Д.А., Бондарчук Н.Г. Механизмы действия и сравнительная характеристика антикоагулянтов // Экспериментальная и клиническая фармакология. 2021. Т. 84. № 5. С. 32–42. DOI: 10.30906/0869-2092-2021-84-5-32-42.

8. Симаков С.С. Современные методы математического моделирования кровотока с помощью осредненных моделей // Компьютерные исследования и моделирование. 2018. Т. 10. С. 581–604. DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-5-581-604.

9. Gamilov T., Simakov S. Blood flow under mechanical stimulations. Proc. IACSS, 2019, pp. 143–150. DOI: 10.1007/978-3-030-35048-2_17.

10. Gognieva D., Gamilov T., Pryamonosov R., Betelin V., Ternovoy S. et al. One-dimensional mathematical model-based automated assessment of fractional flow reserve in a patient with silent myocardial ischemia. The American J. of Case Reports, 2018, vol. 19, pp. 724–728. DOI: 10.12659/AJCR.908449.

11. Boek E.S., Hall C., Tardy P.M. Deep bed filtration modelling of formation damage due to particulate invasion from drilling fluids. Transport in Porous Media, 2012, vol. 91, no. 2, pp. 479–508. DOI: 10.1007/s11242-011-9856-0.

12. Чекалин А.Н., Конюхов В.М., Костерин А.В. Двухфазная многокомпонентная фильтрация в нефтяных пластах сложной структуры. Казань: Изд-во КФУ, 2009. 179 с.

13. Конюхов В.М., Чекалин А.Н., Храмченков М.Г. Миграция разноплотностных жидкостей в водоносных пластах сложной структуры. Казань: Казанское математическое общество, 2005. 158 с.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.340-347

Received 25.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 340–347

A filtration model and parallel computing of the blood flow characteristics in the circulatory system in presence of an occluding circular clot

V.M. Konyukhov [1]*, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, vladimir.konyukhov@kpfu.ru*
M.G. Khramchenkov [1]*, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, mkhramch@gmail.com*
I.V. Konyukhov [2]*, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, i.konyukhov@innopolis.ru*

[1] *Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russian Federation*
[2] *Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation*

Abstract. The authors have mathematically described the blood flow in the circulatory system based on the general filtration equations at the presence of an occluding circular porous clot located on the vessel wall, taking into account clot destruction under the action of hydrodynamic forces. The change in the internal forces occurring in the clot material leads to forming an inhomogeneous permeability distribution, which is a function of spatial coordinates and time. Under the assumption of a symmetric toroidal shape of the thrombus, the paper considers a flat two-dimensional problem in the cross section of the vessel and a clot.

The authors have developed finite-difference schemes and iterative algorithms using parallel computing technologies to solve corresponding two-dimensional problem in a blood vessel and a blood clot with heterogeneous permeability. They have also carried out parallelization at the visualization of the hydrodynamic characteristics of the flows. The software package with the implemented numerical and algorithmical models enables computational experiments with simultaneous visualization of their results. There is the analysis of the influence of the shape and the structure of a clot formed at the blood vessel wall on the main hydrodynamic characteristics determining the probability of a clot breakage from the wall. It is shown that the most dangerous are the blood clots which boundary forms an acute angle with the vessel wall. This is caused by to two factors: the occurrence of the rotary moment of the forces tending to the break of the blood clot front edge down the vessel wall, as well as by the action of a local pressure gradient at the clot base, which significantly exceeds

the pressure gradient in the vessel outside the blood clot. At the same time, the clot permeability affects the total pressure drop and the maximal pressure gradient magnitude, but it practically does not change the direction of the fluid flow in the blood vessel.

Keywords: filtration model, numerical algorithms, parallel computing, circulatory system, occluding circular clot.

Acknowledgements. *This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").*

References

1. Kattula S., Byrnes J.R., Wolberg A.S. Fibrinogen and fibrin in hemostasis and thrombosis. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 2017, vol. 37, pp. 13–21. DOI: 10.1161/ATVBAHA.117.308564.
2. Nelb G.W., Gerth C., Ferry J.D., Lorand L. Rheology of fibrin clots. *Biophysical Chemistry*, 1976, vol. 5, no. 3, pp. 377–387. DOI: 10.1016/0301-4622(76)80050-6.
3. Weisel J.W. Fibrinogen and Fibrin. *Advances in Protein Chemistry*, 2005, vol. 70, pp. 247–299. DOI: 10.1016/S0065-3233(05)70008-5.
4. Weisel J.W., Nagaswami C. Computer modeling of fibrin polymerization kinetics correlated with electron microscope and turbidity observations: Clot structure and assembly are kinetically controlled. *Biophys. J.*, 1992, vol. 63, pp. 111–128. DOI: 10.1016/S0006-3495(92)81594-1.
5. Hunziker E.B., Straub P.W., Haeberli A. A new concept of fibrin formation based upon the linear growth of interlacing and branching polymers and molecular alignment into interlocking single-stranded segments. *J. of Biological Chemistry*, 1990, vol. 265, no. 13, pp. 7455–7463. DOI: 10.1016/S0021-9258(19)39135-5.
6. Carr M.E., Shen L.L., Hermans J. Mass-length ratio of fibrin fibers from gel permeation and light scattering. *Biopolymers*, 1977, vol. 16, no. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1002/BIP.1977.360160102.
7. Enikeeva D.A., Bondarchuk N.G. Mechanisms of action and comparative characteristics of anticoagulants. *Experimental and Clinical Pharmacology*, 2021, vol. 84, no. 5, pp. 32–42. DOI: 10.30906/0869-2092-2021-84-5-32-42 (on Russ.).
8. Simakov S.S. Modern methods of mathematical modeling of blood flow using reduced order methods. *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 5, pp. 581–604. DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-5-581-604 (in Russ.).
9. Gamilov T., Simakov S. Blood flow under mechanical stimulations. *Proc. IACSS*, 2019, pp. 143–150. DOI: 10.1007/978-3-030-35048-2_17.
10. Gognieva D., Gamilov T., Pryamonosov R., Betelin V., Ternovoy S. et al. One-dimensional mathematical model-based automated assessment of fractional flow reserve in a patient with silent myocardial ischemia. *The American J. of Case Reports*, 2018, vol. 19, pp. 724–728. DOI: 10.12659/AJCR.908449.
11. Boek E.S., Hall C., Tardy P.M. Deep bed filtration modelling of formation damage due to particulate invasion from drilling fluids. *Transport in Porous Media*, 2012, vol. 91, no. 2, pp. 479–508. DOI: 10.1007/s11242-011-9856-0.
12. Chekalin A.N., Konyukhov V.M., Kosterin A.V. *Two-phase Multicomponent Filtration in the Complex Structured Oil Reservoirs*. Kazan, 2009, 179 p. (in Russ.).
13. Konyukhov V.M., Chekalin A.N., Khramchenkov M.G. *Migration of the Different-Density Fluids in Complex Structured Aquifers*. Kazan, 2005, 158 p. (in Russ.).

Для цитирования

Конюхов В.М., Храмченков М.Г., Конюхов И.В. Фильтрационная модель и параллельные вычисления характеристик кровотока в системе кровообращения при наличии закупоривающего кольцевого тромба // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 340–347. DOI: 10.15827/0236-235X.139.340-347.

For citation

Konyukhov V.M., Khramchenkov M.G., Konyukhov I.V. A filtration model and parallel computing of the blood flow characteristics in the circulatory system in case of an occluding circular clot. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 340–347 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.340-347.

УДК 004.946
DOI: 10.15827/0236-235X.139.348-361
Дата подачи статьи: 01.08.22, после доработки: 05.08.22
2022. Т. 35. № 3. С. 348–361

Удаленное управление роботизированным устройством с использованием технологий виртуальной реальности

В.В. Кугуракова [1], *к.т.н., доцент, vlada.kugurakova@gmail.com*
М.Р. Хафизов [1], *ст. преподаватель, младший научный сотрудник, mrimsh@mrimsh.ru*
С.А. Кадыров [1], *студент, kadyrovsamat16@gmail.com*
Е.Ю. Зыков [1], *к.ф.-м.н., доцент, Evgeniy.Zykov@kpfu.ru*

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

Предметом исследования является возможность телеуправления роботизированным устройством с использованием технологии виртуальной реальности (VR). Данная концепция разрабатывается с целями создания более нативного способа удаленного управления устройством, а также более удобной передачи изображения для оператора, что особенно актуально в экстремальных ситуациях.

Дан анализ технологий интеллектуальных систем управления и рассмотрены примеры реализации использования технологий виртуальной реальности в телеробототехнике, благодаря чему выделены общая структура системы удаленного управления и основные проблемы, стоящие в рамках реализации настоящего проекта. На основе проведенного анализа разработана и реализована универсальная программно-аппаратная платформа телеуправления на платформе Unity.

Представлена архитектура приложения и рассмотрены требования, изначально предъявляемые к нему, с целью обойти ограничения беспроводного канала связи в задаче управления роботом в реальном времени при помощи VR-гарнитур. Реализована система управления выбором направления перемещения роботизированной единицы с использованием при этом одного из VR-контроллеров. Подробно рассмотрены реализованные алгоритмы получения качественного стереоскопического зрения в устройствах виртуальной реальности и методика синхронизация удаленного поворота стереопары, а также описана система передачи команд.

Проведены эксперименты по использованию реализованной системы для проверки соответствия ее необходимым требованиям с целью получения надлежащего качества. Измерено время отклика системы и произведена минимизация задержек в канале связи.

Разработанное программное обеспечение для телеуправления роботизированной единицей при помощи гарнитуры виртуальной реальности обеспечивает возможность устойчивого телеуправления удаленной роботизированной техникой.

Ключевые слова: *виртуальная реальность, телеуправление, робототехника, киберболезнь.*

В последнее десятилетие происходит как бурное развитие технологий *виртуальной реальности* (Virtual Reality, VR), так и расширение использования *искусственного интеллекта* (ИИ) для автономных *робототехнических устройств* (РТУ). В то время как активно развиваются VR, автономные РТУ продолжают сталкиваться с рядом проблем. VR используется как способ удаленного управления разнообразными робототехническими устройствами без использования ИИ с разными целями: от помощи людям с ограниченными возможностями до управления сложной техникой в отдаленной местности. При этом возможно одновременное многооператорное телеуправление одним устройством.

Задача, поставленная авторами, – разработать технологию для подключения к РТУ, находящемуся на любом расстоянии, но при наличии доступа к Интернету, а также реализовать механизмы его пилотирования и наблюдения за окружающей обстановкой с использованием VR. Для достижения поставленной цели и создания пилотного решения для удаленного управления РТУ при использовании технологии VR необходимо решить задачи по разработке:

– алгоритмов передачи видеопотока с роботизированного устройства в стереоизображение для проецирования в гарнитурах VR;

– интерфейса управления роботизированным устройством внутри виртуального пространства;

– ПО для управления роботизированной единицей посредством применения технологий VR, дающее возможность удаленного управления устройством и наблюдения за окружающей обстановкой посредством камер, находящихся на самом устройстве и являющихся его частью.

Решение этих задач направлено на создание подходов для дальнейших исследований по использованию VR для удаленного мониторинга и телеуправления большим спектром РТУ.

Средства телеуправления и удаленного мониторинга РТУ

Существуют два типа систем дистанционного управления РТУ: супервизорные и диалоговые (интерактивные). При супервизорном управлении на пульте управления оператора имеются дисплейное видео, другие устройства и приборы отображения обстановки в рабочем пространстве робота. Оператор, наблюдая за обстановкой и действиями робота, принимает решения о подаче тех или иных управляющих команд в зависимости от ситуации. Выдача человеком команд роботу может осуществляться различными способами, например, подачей кодового признака программы на выполнение определенной операции, а затем заменой его на кодовый признак другой программы и т.д. В зависимости от возможностей робота отдельные программы могут соответствовать достаточно простым частям операции, которую должен выполнить робот, или же всей сложной операции в целом. В других случаях супервизорная команда может выражаться в виде целеуказания. Например, на сенсорном экране указывается точка, в которую должен переместиться хват манипулятора робота и взять там заданный предмет. Оба канала дистанционной связи (информационный и управляющий) должны быть снабжены микропроцессорными устройствами для обработки информации с целью ее наилучшего отображения на пульте оператора и для формирования программ и целеуказательных сигналов управления по командам.

Обобщенная структурная схема системы управления движением показана на рисунке 1, схема системы автономного управления – на рисунке 2.

Анализ реализованных проектов роботизированных комплексов ведущих мировых производителей позволяет выделить общую архитектуру ПО, которая состоит из следующих операций:

– получение и обработка данных с датчиков;

– объединение и согласование полученных данных;

– обработка изображений;

– определение характеристик препятствий, дорожных условий и транспортных средств в направлении движения;

– определение характеристик дорожного полотна;

– построение цифровой карты;

– позиционирование РТУ и определение текущего состояния системы;

– принятие решений;

– управление исполнительными устройствами и системами;

– ведение журнала полученных данных для их последующего анализа.

В системах управления роботизированных комплексов (рис. 3) ПО имеет два уровня: нижний, который отвечает за взаимодействие с датчиками и исполнительными устройствами, и верхний, обеспечивающий непосредственно реализацию алгоритма управления машиной [1].

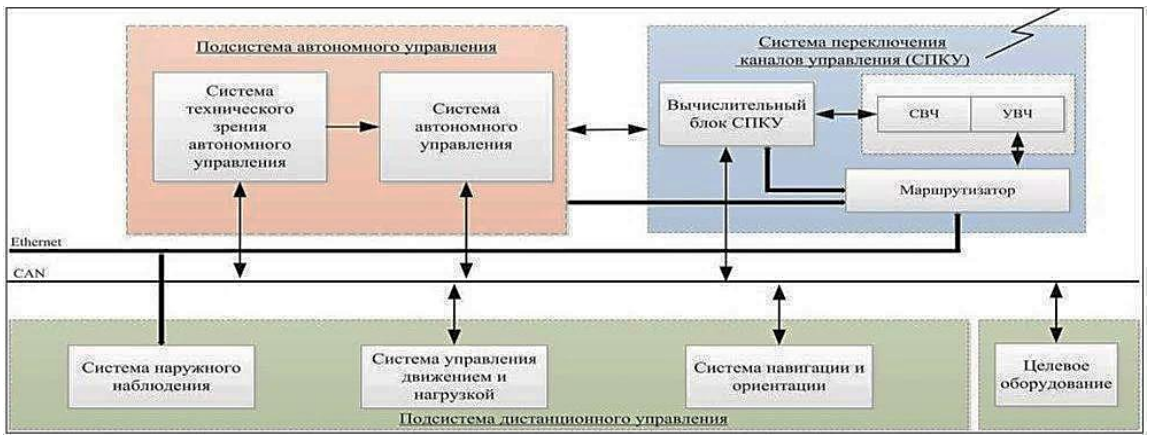


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы управления движением роботизированного устройства

Fig. 1. A generalized block diagram of the motion control system for a robotic device

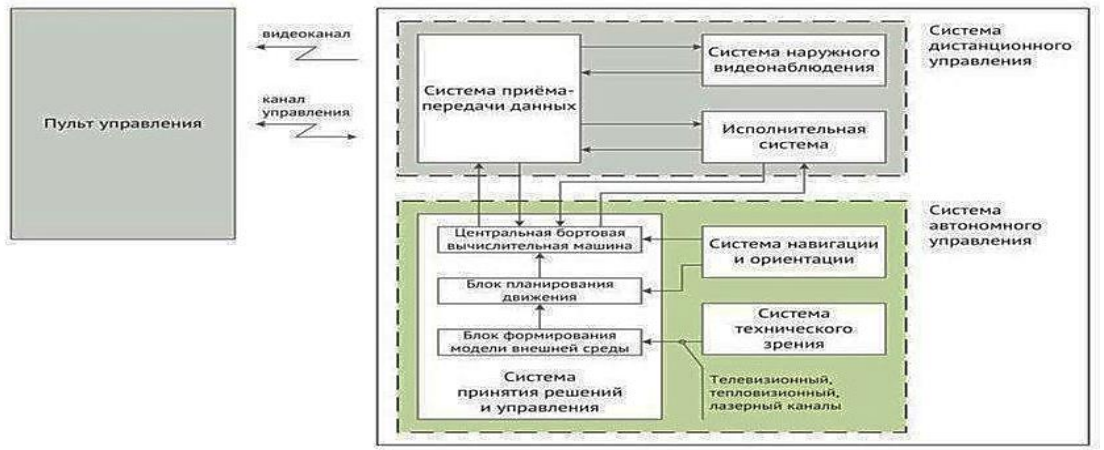


Рис. 2. Обобщенная схема системы автономного управления движением РТУ

Fig. 2. A generalized scheme of the autonomous motion control system for robotic devices

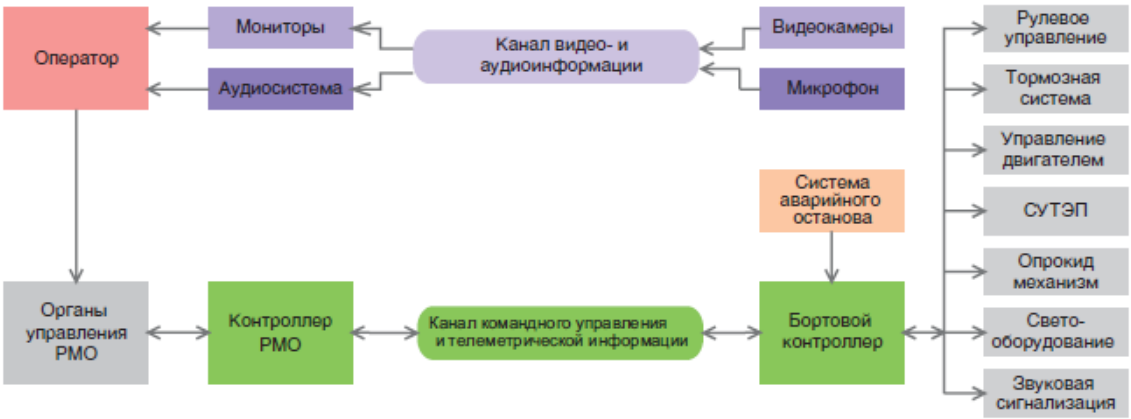


Рис. 3. Обобщенная схема дистанционного управления конкретным РТУ

Fig. 3. A generalized scheme of specific robotic devices remote control

Использование VR для телеуправления. Практика использования технологий VR для мониторинга и дистанционного управления РТУ связана с системами планирования манипулированием с разделяемой автономией, такими как система «человек в контуре» [2]. Для достижения результата нужно использовать расширение этого подхода на общие наборы ограничений в параллельной многооператорной среде [3]. Существует несколько способов отображения состояния робота для пользователя и сопоставления вводимых им данных с роботом, которые можно разделить на две основные категории: эгоцентрические и робоцентрические. В эгоцентрических моделях человек является центром виртуального мира и фактически обитает в том же пространстве, что и робот [2, 4]. В робоцентрической модели виртуальной портальной системы человек и робот разделены виртуальным пространством. Согласно этой модели, человек находится около виртуальной модели робота и управляет им [3].

Авторы [5] отмечают, что VR может быть инструментом, позволяющим серьезно обновить подходы к телеуправлению и предлагающим надежную архитектуру создания разнообразных роботизированных систем. Технологии VR проложили путь в телеробототехнике благодаря своему потенциалу в решении классических задач ранних схем двусторонней связи ведущий–ведомый. Как и любая технология, VR имеет ряд проблем. Например, задержка передачи сигнала может преодолеваться с помощью предиктивных дисплеев [6] или программных методов; каждый из этих подходов имеет множество решений по имплементации.

Рассмотрим некоторые примеры реализации телеуправления. Транспортировка и манипулирование громоздкими объектами или сборка сложных конструкций под водой (рис. 4) требуют совместной работы нескольких единиц автономного подводного транспорта. Проект TWINBOT (TWIN roBOTs) предлагает решение для совместного подводного вмешательства [7].

Другой пример представлен в [8]: оператор видит то, что видит робот-центавр (рис. 5), и управляет его руками, как собственными. Трансформируемая конструкция робота позволяет ему перемещаться по местности и четко выполнять операции. Многостороннее управление дает роботу несколько вариантов работы, поэтому задача может быть либо решена одним человеком, либо разделена между несколькими людьми. Эта совместная функция позволяет оператору прикрыть другого члена бригады в случае отказа какого-либо конкретного элемента управления. Кроме того, робот имеет полуавтономную функциональность и возможность обнаружения множества объектов на базе искусственного интеллекта, что упрощает работу операторов.

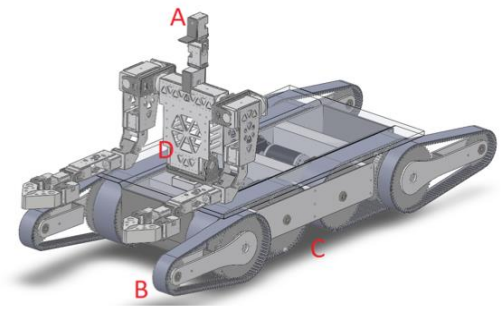
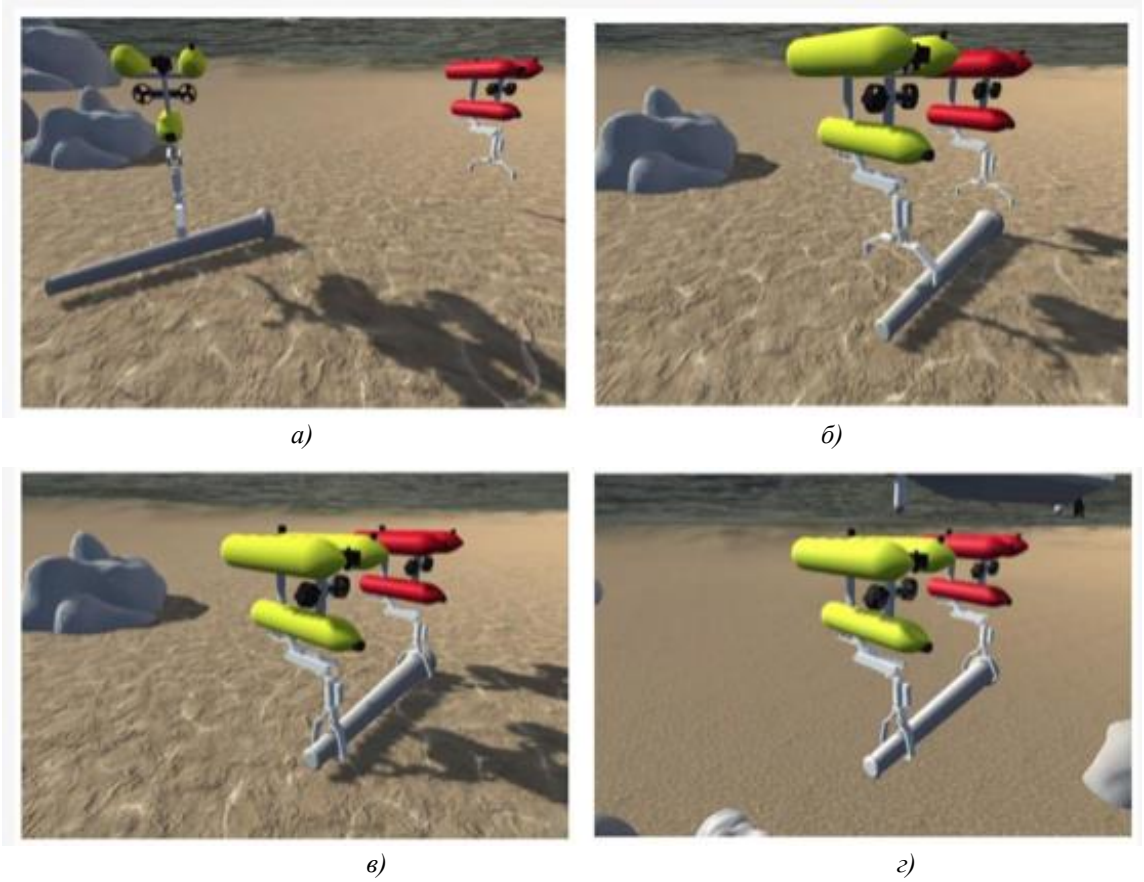


Рис. 5. Механическая конструкция TeleBot-R2

Fig. 5. A mechanical construction of TeleBot-R2



а) *б)*

в) *г)*

Рис. 4. Примеры реализации телеуправления: а) приближение роботов к трубе, б) приближение к точкам захвата, в) одновременное закрытие захватов, г) совместная транспортировка трубы (под водой)

Fig. 4. Examples of remote control implementation: a) robots approaching a pipe, б) approaching the grip points, в) simultaneous closing of the grips, г) joint transportation of a pipe (under water)

Проблемы использования виртуальных гарнитур. Системы телеуправления отображением с VR-гарнитурами (HMD, или VR-шлем) становятся популярным средством обратной визуальной связи для систем дистанционного управления роботами. Однако пользователи часто страдают от временных двунаправленных задержек видеокадров, вызванных задержкой и ограниченной пропускной способностью сетей беспроводной связи.

С увеличением населения и развитием технологий растет количество антропогенных стихийных бедствий, таких как радиоактивные и химические аварии, которые невероятно сложны для ликвидации, в первую очередь, из-за большой опасности и малой доступности для ликвидаторов [9, 10]. Уже достаточно давно для работы с такими сложными объектами используют роботизированные телесистемы, управляемые человеком [11–13]. В этих системах пользователь обычно получает информацию об объектах из двухмерных изображений, передаваемых на мониторы с помощью камер, прикрепленных к радиоуправляемому роботу. Визуальные данные – наиболее интуитивно понятная форма информации при наблюдении за окружающей средой, особенно если они предоставляются в виде трехмерного (стереоскопического) изображения, а не плоской двухмерной картинки. В этом случае пользователь может с достаточно большой точностью определять расстояние до ближайших объектов, а также другие физические параметры, такие как объем, размер, ширина и т.д.

Большинство VR-шлемов имеет встроенные инерциальные измерительные блоки (IMU), которые определяют ориентацию в пространстве головы пользователя. Ориентация головы используется для захвата определенной области зрения пользователя (FOV), что может передаваться на управляющий блок робота для контроля камеры, а в некоторых случаях для контроля движения робота [14]. Однако в ситуации с HMD-телеуправлением существует ряд проблем (рис. 6): временная задержка, ограниченная полоса пропускания сети, большие размеры стереоскопических изображений, приводящие к задержкам и потере пакетов, резкие изменения положения робота, особенно при работе на пересеченной местности.

Изменяющаяся частота кадров, исчезновение некоторых кадров, дерганное изображение могут вызывать киберболезнь [15], причем эта проблема особенно усугубляется в ситуациях, когда положение камеры изменяется в зависимости от положения головы оператора, из-за задержки при повороте камеры.

Проблема задержек в системе дистанционного управления исследовалась на протяжении десятилетий, особенно для обеспечения стабильности соединения и прозрачности действий двусторонних тактильных систем. Было изучено множество алгоритмов управления, таких как алгоритмы пассивного управления на основе волновых переменных, модифицированные алгоритмы для обращения к постоянным и алгоритмы с изменяющимися временными задержками [16–18]. Несмотря на достигнутые успехи, такие методы сложно применять в системах обратной визуальной связи из-за их комплексной природы.

Использование данных облака точек или изображений для построения виртуальных миров (а не изображений с камеры робота) может сократить проблемы с эффектом задержки [19, 20]. Однако такие методы требуют наличия больших вычислительных мощностей или дорогих датчиков.

Эффект задержки можно уменьшить, если спрогнозировать движение головы пользователя. Тогда дистанционно управляемый робот будет опережать движения пользователя. В [21] прогнозирование движения головы пользователя было исследовано для уменьшения задержки в HMD при отображении VR. Однако применять такие прогнозы трудно, поскольку в случае чрезвычайных ситуаций при передаче данных ожидаются большие задержки и потеря пакетов. Существует ряд научно-инженерных исследований, посвященных предиктивным моделям, созданным для «смягчения» задержек в телеоперационных системах. Положение и ориентация манипуляторов роботов предсказывались кинематиче-

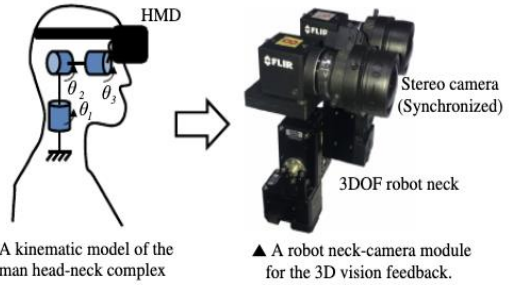


Рис. 6. Пример передачи движения с IMU шлема на камеру робота

Fig. 6. An example of transferring motion from the helmet IMU to robot's camera

скими моделями, которые отображались на дисплее оператора. Это позволяло сократить время решения задач по стратегии «двигаться и ждать» [6] или повышения точности манипуляций [18].

Однако в этих исследованиях не учитывалось движение головы пользователя, поскольку системы вывода информации состояли из обычных мониторов. В [22] предложен способ прогнозирующего отображения, предлагающего изображение в реальном времени на основе анализа направления движения телеуправляемого транспортного средства, но он не был внедрен в реальную систему. В [6] предложены методы работы HMD с телеуправляемым роботом, основанные на предиктивном анализе положения головы оператора для управления камерами робота в пространстве. Кроме того, в этом исследовании описаны возможности борьбы с задержками, способствующие уменьшению признаков киберболезни. Также авторам удалось создать предиктивный дисплей и модульную роботизированную систему, имитирующую кинематическую модель человеческой шеи. Для минимизации состояний киберболезни был разработан специализированный прогнозирующий алгоритм отображения, анализирующий геометрию камеры, а также движения пользователя и робота. Предсказанное изображение для текущей ориентации головы пользователя строилось с учетом различия между текущей ориентацией головы пользователя и отложенной ориентацией камеры. В результате были компенсированы временные задержки в кадрах, пользователь видел цельный видеопоток без прерываний и искажений. Таким образом, этот алгоритм прост в реализации, не требователен к производительности, а также позволяет не пользоваться дорогими дальномерами.

Реализация системы телеуправления

Функциональность роботизированных единиц. Для реализации системы телеуправления авторы использовали несколько роботизированных устройств, оснащенных UNIX-подобной операционной системой на базе ядра Linux. Одно устройство было оснащено двумя IP-камерами для реализации механизма стереозрения (рис. 7), другое – гусеничным механизмом для передвижения в пространстве (рис. 8). Эксперименты осуществлялись и с другими устройствами.

Эксперименты. Было проведено несколько экспериментов: получение качественного стереоизображения через гарнитуру VR; управление «головой» робота, оснащенной парой стереокамер, для получения иммерсивного виртуального окружения; телеуправление передвижением робота с полным эффектом присутствия; телеуправление одним роботом с наблюдением через пару камер другого робота.

Для реализации механизма удаленного управления РТУ были учтены следующие требования:

– получаемый видеопоток должен передаваться максимально быстро и без каких-либо задержек;

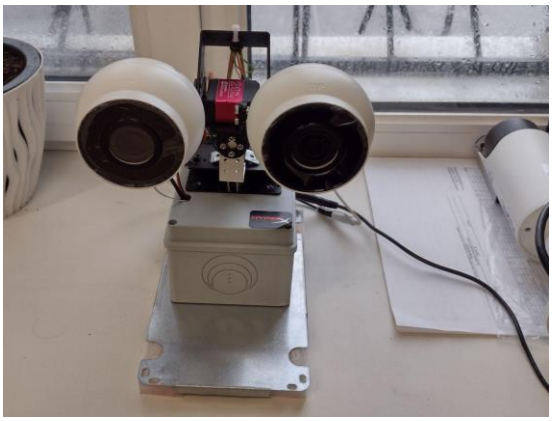


Рис. 7. Роботизированная единица (без колес) со стереопарой

Fig. 7. A robotic unit (no wheels) with a stereo pair

Рис. 8. Роботизированная единица с гусеничным механизмом

Fig. 8. A robotic unit with a caterpillar mechanism

– видеопотоки с обеих камер должны быть упакованы в один поток и разбираться уже на конечном устройстве для предотвращения рассинхронизации изображений, подаваемых на левый и правый глаза;

– изображения, передаваемые в шлем VR, должны конвертироваться в формат стереозрения и корректно отображаться на дисплее;

– управление РТУ должно осуществляться интуитивно понятным и естественным образом;

– в связи с наличием на рынке большого количества VR-устройств разного типа приложение должно обладать кроссплатформенностью.

Чтобы получаемый видеопоток передавался максимально быстро, необходимо использовать самые быстрые протоколы передачи данных. Таковым является протокол для передачи данных по IP-сети UDP, так как в нем реализован минимальный механизм, необходимый для передачи данных, поскольку у него нет накладных расходов на установку и разрыв соединения.

Изображение, транслируемое в шлем, должно распределяться на дисплей так, чтобы создавалось ощущение погружения в VR. Реализовать это можно посредством распределения камер на разные линзы VR-шлема и настройки их соответствующим образом для создания эффекта стереозрения.

Под интуитивно понятным управлением подразумевается управление, которое будет работать реалистично с точки зрения имитации поведения реального человека: для того чтобы посмотреть, что находится слева, необходимо повернуть голову налево, а чтобы посмотреть, что находится справа, необходимо повернуть голову направо, и т.д. Аналогично и для управления передвижением: оно должно быть простым и доступным как для опытного пользователя технологий VR, так и для начинающего. Ввиду соображений практичности и безопасности управление перемещением должно быть реализовано с использованием контроллеров VR. Правильнее будет реализовать данную механику, используя стик на VR-контроллере. (Стики и триггеры – чувствительные элементы контроллера, они базируются в большинстве случаев на потенциометрах и редко – на датчиках Холла. Благодаря им можно регулировать силу нажатия и перемещать камеру в широком диапазоне значений.)

Выбор средств реализации и проектирование архитектуры. Для реализации самого приложения, которое в дальнейшем будет применяться для удаленного управления РТУ, был использован игровой движок Unity – кроссплатформенная среда разработки двух- и трехмерных приложений и игр, обладающая значительной гибкостью и производительностью и позволяющая эффективно работать с графикой, звуком, анимацией и сценариями различной сложности. Приложения, созданные в Unity, подходят для операционных систем Windows, Linux, macOS, iOS, Android и ряда других. Также у Unity есть гибкий инструментарий для работы с виртуальной и дополненной реальностями. Несмотря на то, что Unity ориентирован на трехмерные игры и приложения, он поддерживает работу в том числе и с двухмерной графикой, что позволяет осуществлять конвертацию плоского (двухмерного) изображения, получаемого с РТУ, в трехмерное, то есть в стереозрение.

Архитектура приложения представлена на рисунке 9. Для корректной работы приложения добавлен мультимедиа фреймворк, использую-

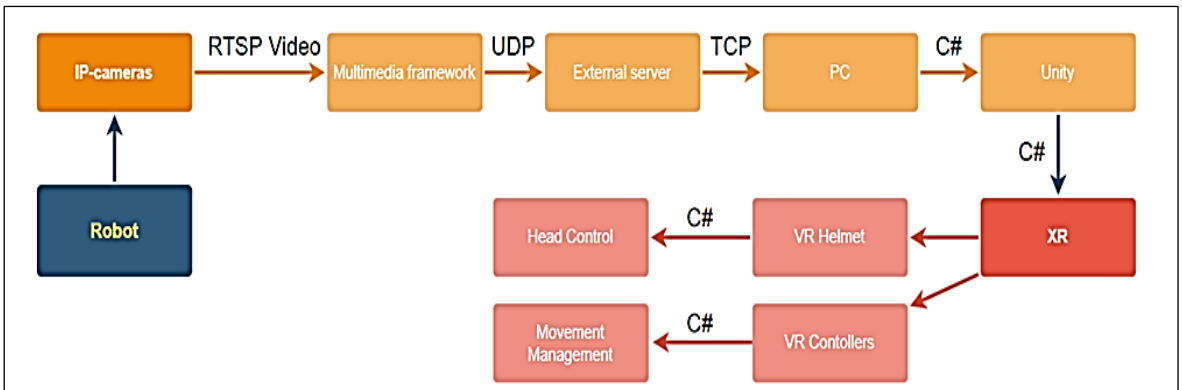


Рис. 9. Архитектура приложения

Fig. 9. An application architecture

щий систему типов GObject и являющийся по сути ядром мультимедийных приложений, таких как видеоредакторы, потоковые серверы и медиапроигрыватели. С помощью этого фреймворка роботизированная единица получает видеоизображение RTSP с установленных на нем камер и отправляет на внешний сервер по UDP в формате H264. Внешний сервер, в свою очередь, принимает видео по UDP и создает TCP-сервер для возможности удаленного подключения и получения видео.

Одна из двух используемых роботизированных единиц оснащена IP-камерами, способными передавать RTSP-видео. В свою очередь, внедренный в систему мультимедиа фреймворк позволяет обеспечивать получение этого RTSP-видео и реализовать его передачу на внешний сервер. Передача видеопотока от мультимедиа фреймворка на внешний сервер происходит через протокол UDP, так как он не требует заранее установленного соединения и позволяет обеспечить более высокую скорость передачи данных. Именно поэтому UDP предпочтительнее для программ, воспроизводящих потоковое видео. Передача данных с внешнего сервера на ПК пользователя происходит уже через TCP для обеспечения надежности передачи и осуществления контроля процесса обмена, что гарантирует минимизацию риска потерь при передаче. Затем при помощи скриптов на C# получаем видео от ПК и перенаправляем его в Unity. С помощью компонентов с координатами объектов и донастройки собственных координатных систем и математических алгоритмов реализуются системы управления стереопарой и гусеничным механизмом движения.

Реализация стереозрения. Для воспроизведения стереозрения, чтобы в VR-шлеме появился эффект объемной среды, а не просто плоских картинок, была использована система слоев Unity, где изображение с одной камеры представляется как один слой, а изображение с другой – как другой слой. Слоям были даны соответствующие названия – Left Eye и Right Eye (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/24.jpg). Затем были использованы две камеры, каждая из которых имитирует глаз пользователя. Это необходимо для реализации системы, при которой отображение одного из слоев направляется в левый дисплей виртуального шлема, а другого – в правый, чтобы в разных дисплеях не отображалось ничего, кроме этих самых разделенных слоев (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/25.jpg).

Для настройки принципа работы полотен, принимающих изображение (чтобы выдать им слой, соответствующий разделению на левый/правый глаз), необходимо указать камеру для рендера и разрешение экрана (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/26.jpg).

После того как полотна, слои и камеры корректно настроены, реализуется механизм стереозрения, заключающийся в том, что IP-камера, находящаяся слева, транслирует видеопоток в левый дисплей VR-шлема, а IP-камера, находящаяся справа, – в правый дисплей VR-шлема. Затем за счет стыковки этих видеопотоков получается общая картина, отображаемая в виртуальном пространстве.

Синхронизация поворота стереопары. Система управления камерами РТУ действует таким образом, что, получая на вход данные об изменении положения головы в пространстве, приложение отправляет РТУ запрос о соответствующем изменении местоположения камер.

Функционирует этот процесс при помощи кватернионов, использующихся в Unity для представления вращений. В рамках реализации механизма управления поворотами стереопары необходимо настроить систему так, чтобы можно было получать данные о поворотах виртуального шлема и затем уже настраивать обновление поворота стереопары. Для этого был использован компонент Transform (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/27.jpg), хранящий позицию, вращение, размер и информацию о «родителях» и «детях» игрового объекта. Любой игровой объект всегда включает в себя этот компонент, его невозможно удалить, как и невозможно создать какой-либо игровой объект без него.

Из компонента Transform можно получать данные об изменении Rotation посредством параметра eulerAngles, который используется для представления вращения в мировом пространстве. При этом с учетом свойства eulerAngles для установки поворота важно помнить, что предоставляемые для описания поворота значения координат X, Y и Z не сохраняются в повороте. Вместо этого значения координат преобразуются во внутренний формат Quaternion, о котором речь шла выше.

Исходя из этого, можно понять, что для реализации механизма управления РТУ поворотами головы, необходимо преодолеть некоторые трудности получения данных о повороте в виде углов Эйлера в градусах и их конвертации в привычные углы поворота.

Учитывая, что VR включает в себя игровой объект, используемый как смещение камеры, необходимо настроить работу системы так, чтобы, получая Transform объекта CameraOffset (для чего была проведена конвертация его rotation.x и rotation.y в eulerAngles), можно математически преобразовать полученные значения в стандартные углы поворота.

Получая покадрово обновляющиеся переменные, содержащие стандартные углы поворота, округленные до целого числа, реализована система управления поворотами IP-камер через цикл:

– обращение к компоненту Transform объекта CameraOffset;

– получение поворота в виде углов Эйлера в градусах;

– конвертация углов Эйлера в обычные углы в градусах;

– округление значения до целого числа;

– запрос на движение камерами по каждой из осей X и Y на полученное количество градусов.

Выбор направления перемещения. Для реализации механизма управления передвижением РТУ в пространстве была использована другая роботизированная единица, оснащенная гусеничным механизмом движения и имеющая два мотора (то есть данная система функционирует в тракторном формате): движение прямо – оба мотора включаются прямо; движение назад – оба мотора включаются назад; движение влево – правый мотор включается вперед, а левый назад; движение вправо – левый мотор включается вперед, а правый назад.

Поскольку функциональную составляющую приложения необходимо настроить так, чтобы воспроизводить все описанные выше манипуляции моторами посредством VR-контроллеров, для управления использован имеющийся на контроллере thumb-stick, обладающий возможностью отклоняться в четырех направлениях от центральной точки своего позиционирования на контроллере (рис. 10).

Для настройки взаимодействия таким образом, чтобы при отклонении стика в какую-либо сторону стало возможным управление передвижением РТУ, была создана система координат внутри стика, представляющая собой векторы (x, y) и их значения в диапазоне [–1; 1]. После этого остается только настроить систему так, чтобы при отклонении стика в разных направлениях пользователи отправляли запросы, соответствующие направлению этого отклонения, и вызывали команды движения моторов.

Разработанная система телеуправления удаленным РТУ состоит из трех частей: гарнитура VR Oculus Quest 2, гусеничное роботизированное устройство и роботизированное устройство, оснащенное парой камер на площадке с несколькими степенями свободы. Гарнитура использует технологию отслеживания масштаба помещения, позволяя пользователю перемещаться в трехмерном пространстве и использовать ручные контроллеры с отслеживанием движения для взаимодействия с окружающей средой.

Изображения рабочих сценариев робота могут быть получены и отображены в режиме реального времени с камер РТУ (рис. 11). Когда оператор фиксирует на контроллере кнопку thumb-stick, происходит выбор направления движения РТУ, который продолжается, пока она нажата.

Синхронизация передвижения одного из конечных эффекторов робота (например, захват) вслед за движением ручного контроллера для достижения желаемой цели манипуляции реализована позже и решается аналогично алгоритмам, представленным в [23].

Оценка времени отклика. При оценке синхронности передвижения стереопары на уда-

Рис. 10. Real-time управление роботом

Fig. 10. Real-time robot control

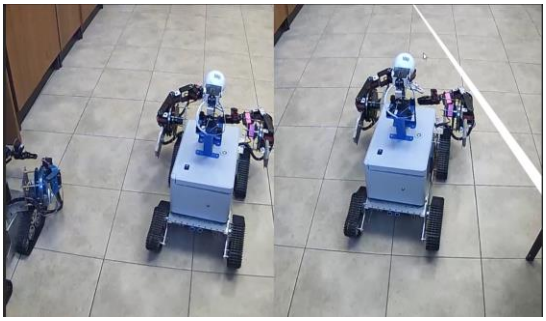


Рис. 11. Изображение, полученное от робота

Fig. 11. An image received from a robot

ленном устройстве (РТУ) с получением изображения на VR-гарнитуре необходимо провести эксперименты при расположении РТУ в разных локациях с различной скоростью интернета.

Большая часть экспериментов по оценке времени отклика проводилась с использованием общедоступной интернет-сети университета. Согласно замерам, задержка в передаче видеопотока составила порядка 300 мс, а в передаче сигналов для управления передвижением РТУ – 100 мс.

Задержка обновления данных о местоположении головы оператора была настроена вручную – камеры РТУ передвигались на актуальные местоположения головы оператора каждую секунду, что позволило не перегружать систему огромным количеством поступающих запросов и не вызывать перегрузок.

Передача команд. Для управления передвижением РТУ была разработана система, позволяющая управлять роботизированной единицей, используя при этом один из VR-контроллеров. Система функционирует так, что при наличии двух моторов взаимодействие с ними осуществляется в зависимости от того, в каком направлении необходимо выполнить движение. Аналогично можно реализовать и управление прочими манипуляторами РТУ, если таковые присутствуют на устройстве и настроены необходимым образом.

Итак, РТУ должно включать в себя API для возможного использования передачи и приема команд, чтобы была возможность отправлять запросы на действия контроллеров. Большинство современных систем VR имеют несколько доступных для взаимодействия кнопок, поэтому можно настроить систему так, чтобы при управлении, допустим, thumb-stick'ом левой руки манипулятор передвигался в пространстве, а при нажатии Button One или Button Two манипулятор совершал захваты или разжимал хватку. Если манипуляторов и других систем, которыми нужно управлять, больше, чем стандартных кнопок, то остается возможность использовать интерфейс (как дигиетический, так и недигиетический) – например, в видимой зоне появляется виртуальная панель управления с набором необходимых инструментов.

Заключение

В работе представлены основные моменты реализации алгоритмов стереозрения на Unity на основе получаемого видеопотока в режиме реального времени и управления удаленной роботизированной единицей на основе получаемых команд в режиме реального времени: повороты гусеничными/колесными устройствами (треками), повороты площадкой (головой), на которой установлены две видеокамеры (стереопара), передвижение всего робота вперед и назад, одновременные независимые повороты треками и головой робота.

Описаны проведенные эксперименты с получением качественного стереоизображения через гарнитуру VR, а также телеуправление передвижением робота с полным эффектом присутствия и телеуправление одним роботом с наблюдением через пару камер другого робота.

Разработанное ПО допускает возможность расширения функционала для реализации на удаленном РТУ таких разнообразных узкоспециализированных задач в той же парадигме, как управление дополнительными манипуляторами (щупами, клешнями, захватами, ковшами и т.п.), а также получение в реальном времени дополнительной информации с дополнительно установленных датчиков (лидаров или дальномеров, тепловизоров и т.п.) или дополнительных камер (например, работающих в ИК-режиме), что позволяет обеспечить широкое практическое использование созданной системы.

Эффект задержки при изменении положения головы оператора, вследствие чего могут появиться симптомы киберболезни, можно уменьшить, если спрогнозировать движение головы пользователя.

В дальнейшем можно будет перенастроить систему так, чтобы она могла предполагать вектор движения головы пользователя и тем самым действовала на опережение в рамках изменения положения камер в пространстве, что позволит уменьшить задержку, не создавая при этом больших нагрузок в плане передачи запросов, и реализовать тем самым более плавные механизмы движения головой. Проведенные эксперименты показывают убедительные результаты работы созданной системы телеуправления с использованием HMD. Тем не менее, для внедрения в реальные проекты с длительным использованием гарнитур VR и в реальной операционной деятельности, такой, например, как управление сельскохозяйственной техникой на протяжении рабочей смены, необходимо:

– реализовать предиктивные модели для «смягчения» задержек при телеуправлении;

– оптимизировать методы пользовательского ввода (кручение головой);

– оценить результаты экстраполяции;

– предложить контрмеры для уменьшения киберболезни с подстройкой под уникальные особенности пользователя.

Разработанный функционал был успешно протестирован в ряде экспериментов с конкретными роботизированными устройствами, удаленными от оператора. Планируются его дальнейшее активное использование, развитие и масштабирование.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Клебанов Д.А., Кузнецов И.В., Бигель Н.В. Принципы построения системы дистанционного и автономного управления карьерным самосвалом // Горная Промышленность. 2013. № 4. С. 8.

2. Lipton J.I., Fay A.J., Rus D. Baxter's homunculus: Virtual reality spaces for teleoperation in manufacturing. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 179–186. DOI: 10.1109/lra.2017.2737046.

3. Whitney D., Rosen E., Ullman D., Phillips E., Tellex S. ROS reality: A virtual reality framework using consumer-grade hardware for ROS-enabled robots. Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. IROS, 2018, pp. 1–9. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593513.

4. Zhang T., McCarthy Z., Jowl O., Lee D., Chen X., Goldberg K., Abbeel P. Deep imitation learning for complex manipulation tasks from virtual reality teleoperation. Proc. IEEE ICRA, 2018, pp. 5628–5635. DOI: 10.1109/ICRA.2018.8461249.

5. Kheddar A., Neo E., Tadakuma R., Yokoi K. Enhanced teleoperation through virtual reality techniques. In: Springer Tracts in Advanced Robotics, 2007, vol. 31, pp. 139–159. DOI: 10.1007/978-3-540-71364-7_10.

6. Jung Y., Han K., Bae J. A tele-operated display with a predictive display algorithm. IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 154447–154456. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2948879.

7. de la Cruz M., Casañ G., Sanz P., Marín R. Preliminary work on a virtual reality interface for the guidance of underwater robots. Robotics, 2020, vol. 9, no. 4, art. 81. DOI: 10.3390/ROBOTICS9040081.

8. Lin X., Mahmud S., Roman S., Shaker A., Law Z., Lin M., Kim J. Design of a novel transformable centaur robot with multilateral control interface for search and rescue missions. Proc. V Int. Conf. CACRE, 2020, pp. 200–205. DOI: 10.1109/CACRE50138.2020.9230311.

9. Bevere L., Sharan R., Barrett S., Honegger C. Natural catastrophes and man-made disasters in 2016. Swiss Re Institute, 2017, 30 p. URL: https://www.swissre.com/dam/jcr:75ec4a3a-ab68-4730-89b5-77012de5cfd8/LuciaBevere_Analysis+of+2016+losses+and+lessons+learned.pdf (дата обращения: 29.06.2022).

10. Guha-Sapir D., Hoyois P., Wallemacq P., Below R. Annual disasterstatistical review 2016: The numbers and trends. CRED, 2017, 80 p.

11. Lim J., Lee I., Shim I. et al. Robot system of DRC-HUBO+ and control strategy of team KAIST in DARPA robotics challenge finals. J. of Field Robotics, 2017, vol. 34, pp. 802–829. DOI: 10.1002/rob.21673.

12. Yi S., McGill G., Vadakedathu L., He Q., Ha I. et al. Team THOR's entryin the DARPA robotics challenge trials 2013. J. of Field Robotics, 2015, vol. 32, no. 3, pp. 315–335. DOI: 10.1002/rob.21555.

13. Johnson M., Shrewsbury B., Bertrand S., Calvert D., Wu T., Duran D., Stephen D. et al. Team IHMC's lessons learned from the DARPA robotics challenge: Finding data in the rubble. J. of Field Robotics, 2017, vol. 34, no. 2, pp. 241–261. DOI: 10.1002/rob.21674.

14. Martins H., Oakley I., Ventura R. Design and evaluation of a head-mounted display for immersive 3D teleoperation of field robots. Robotica, 2015, vol. 33, no. 10, pp. 2166–2185. DOI: 10.1017/S02635747 1400126X.

15. St. Pierre M.E., Banerjee S., Hoover A.W., Muth E.R. The effects of0.2Hz varying latency with 20 −100 ms varying amplitude on simulator sickness in a helmet mounted display. Displays, 2015, vol. 36, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.displa.2014.10.005.

16. Sun D., Naghdy F., Du H. Wave-variable-based passivity control of four-channel nonlinear bilateral teleoperation system under TimeDelays. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016. vol. 21, no. 1, pp. 238–253. DOI: 10.1109/tmech.2015.2442586.

17. Sun D., Naghdy F., Du H. Neural network-based passivity control of teleoperation system under time-varying delays. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, vol. 47, no. 7, pp. 1666–1680. DOI: 10.1109/TCYB. 2016.2554630.

18. Yang C., Wang X., Li Z., Li Y., Su C. Teleoperation control based on combination of wave variable and neural networks. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 2017, vol. 47, no. 8, pp. 2125–2136. DOI: 10.1109/TSMC.2016.2615061.

19. Schwarz M., Rodehutskors T., Droeschel D., Beul M., Schreiber M. et al. NimbRo rescue: Solving disaster-response tasks with the mobile manipulation robot momaro. J. of Field Robotics, 2017, vol. 34, no. 2, pp. 400–425. DOI: 10.1002/rob.21677.

20. Theofilis K., Orlosky J., Nagai Y., Kiyokawa K. Panoramic view reconstruction for stereoscopic teleoperation of a humanoid robot. Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, 2016, pp. 242–248. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2016.7803284.

21. Wu J., Ouhyung M. On latency compensation and its effects on head motion trajectories in virtual environments. The Visual Computer, 2000, vol. 16, pp. 79–90. DOI: 10.1007/s003710050198.

22. Brudnak M.J. Predictive displays for high latency teleoperation. Proc. NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium, 2016, pp. 1–16.

23. Liu N., Lu T., Cai Y., Lu J. et al. Design of virtual reality teleoperation system for robot complex manipulation. Proc. 2019 CAC, 2019, pp. 1789–1793. DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8997211.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.348-361

Received 01.08.22, Revised 05.08.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 348–361

Remote control of a robotic device using virtual reality

V.V. Kugurakova [1], *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Laboratory, vlada.kugurakova@gmail.com*
M.R. Khafizov [1], *Senior Lecturer, mrimsh@mrimsh.ru*
S.A. Kadyrov [1], *Graduate Student, kadyrovsamat16@gmail.com*
E.Yu. Zykov [1], *Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of Laboratory, Evgeniy.Zykov@kpfu.ru*

[1] *Kazan Federal University, Kazan, 420008, Russian Federation*

Abstract. The subject of this paper is the possibility of remote control of a robotic device using the virtual reality technology. This concept is being developed in order to create a more native way to control a device remotely, as well as a more convenient image transmission for an operator, which is especially relevant in extreme situations.

The paper presents the analysis of intelligent control system technologies and the examples of implementing virtual reality technologies in tele-robotics. This helped to highlight the overall structure of the remote control system and to show the main implementation problems of this project. This analysis has become a base for development and implementation of a universal hardware and software telecontrol platform on the Unity platform.

The paper presents the application architecture and considers the requirements initially imposed on it in order to bypass the wireless channel limitations in the task of the real-time robot control using VR headsets. There is an implemented control system for selecting the direction of moving a robotic unit using one of the VR controllers. The paper considers implemented algorithms for obtaining high-quality stereoscopic vision in virtual reality devices, as well as the technique for synchronizing the remote rotation of a stereo pair. Moreover, there is a description of a command transmission system.

The experiments of the implemented system were conducted in order to verify if it meets the necessary requirements to obtain the proper quality. The authors have measured the response time of the system and minimized the delay in the communication channel.

The developed software for robotic unit telecontrol using a virtual reality headset provides the possibility of stable telecontrol of remote robotic equipment.

Keywords: virtual reality, telecontrol, robotics, cybersickness.

Acknowledgements. *This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").*

References

1. Klebanov D.A., Kuznecov I.V., Bigel N.V. Principles of building a system of remote and autonomous management of a dump truck. *Russian Mining Industry*, 2013, no. 4, p. 8 (in Russ.).
2. Lipton J.I., Fay A.J., Rus D. Baxter's homunculus: Virtual reality spaces for teleoperation in manufacturing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 179–186. DOI: 10.1109/lra.2017.2737046.
3. Whitney D., Rosen E., Ullman D., Phillips E., Tellex S. ROS reality: A virtual reality framework using consumer-grade hardware for ROS-enabled robots. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. IROS*, 2018, pp. 1–9. DOI: 10.1109/IROS.2018.8593513.
4. Zhang T., McCarthy Z., Jowl O., Lee D., Chen X., Goldberg K., Abbeel P. Deep imitation learning for complex manipulation tasks from virtual reality teleoperation. *Proc. IEEE ICRA*, 2018, pp. 5628–5635. DOI: 10.1109/ICRA.2018.8461249.
5. Kheddar A., Neo E., Tadakuma R., Yokoi K. Enhanced teleoperation through virtual reality techniques. In: *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2007, vol. 31, pp. 139–159. DOI: 10.1007/978-3-540-71364-7_10.
6. Jung Y., Han K., Bae J. A tele-operated display with a predictive display algorithm. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 154447–154456. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2948879.
7. de la Cruz M., Casañ G., Sanz P., Marín R. Preliminary work on a virtual reality interface for the guidance of underwater robots. *Robotics*, 2020, vol. 9, no. 4, art. 81. DOI: 10.3390/ROBOTICS9040081.
8. Lin X., Mahmud S., Roman S., Shaker A., Law Z., Lin M., Kim J. Design of a novel transformable centaur robot with multilateral control interface for search and rescue missions. *Proc. V Int. Conf. CACRE*, 2020, pp. 200–205. DOI: 10.1109/CACRE50138.2020.9230311.
9. Bevere L., Sharan R., Barrett S., Honegger C. Natural catastrophes and man-made disasters in 2016. *Swiss Re Institute*, 2017, 30 p. Available at: https://www.swissre.com/dam/jcr:75ec4a3a-ab68-4730-89b5-77012de5cfd8/LuciaBevere_Analysis+of+2016+losses+and+lessons+learned.pdf (accessed June 29, 2022).
10. Guha-Sapir D., Hoyois P., Wallemacq P., Below R. Annual disasterstatistical review 2016: The numbers and trends. *CRED*, 2017, 80 p.
11. Lim J., Lee I., Shim I. et al. Robot system of DRC-HUBO+ and control strategy of team KAIST in DARPA robotics challenge finals. *J. of Field Robotics*, 2017, vol. 34, pp. 802–829. DOI: 10.1002/rob.21673.
12. Yi S., McGill G., Vadakedathu L., He Q., Ha I. et al. Team THOR's entryin the DARPA robotics challenge trials 2013. *J. of Field Robotics*, 2015, vol. 32, no. 3, pp. 315–335. DOI: 10.1002/rob.21555.
13. Johnson M., Shrewsbury B., Bertrand S., Calvert D., Wu T., Duran D., Stephen D. et al. Team IHMC's lessons learned from the DARPA robotics challenge: Finding data in the rubble. *J. of Field Robotics*, 2017, vol. 34, no. 2, pp. 241–261. DOI: 10.1002/rob.21674.
14. Martins H., Oakley I., Ventura R. Design and evaluation of a head-mounted display for immersive 3D teleoperation of field robots. *Robotica*, 2015, vol. 33, no. 10, pp. 2166–2185. DOI: 10.1017/S02635747 1400126X.
15. St. Pierre M.E., Banerjee S., Hoover A.W., Muth E.R. The effects of0.2Hz varying latency with 20−100 ms varying amplitude on simulator sickness in a helmet mounted display. *Displays*, 2015, vol. 36, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.displa.2014.10.005.
16. Sun D., Naghdy F., Du H. Wave-variable-based passivity control of four-channel nonlinear bilateral teleoperation system under TimeDelays. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 238–253. DOI: 10.1109/tmech.2015.2442586.
17. Sun D., Naghdy F., Du H. Neural network-based passivity control of teleoperation system under time-varying delays. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, vol. 47, no. 7, pp. 1666–1680. DOI: 10.1109/TCYB.2016.2554630.
18. Yang C., Wang X., Li Z., Li Y., Su C. Teleoperation control based on combination of wave variable and neural networks. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2017, vol. 47, no. 8, pp. 2125–2136. DOI: 10.1109/TSMC.2016.2615061.
19. Schwarz M., Rodehutskors T., Droeschel D., Beul M., Schreiber M. et al. NimbRo rescue: Solving disaster-response tasks with the mobile manipulation robot momaro. *J. of Field Robotics*, 2017, vol. 34, no. 2, pp. 400–425. DOI: 10.1002/rob.21677.
20. Theofilis K., Orlosky J., Nagai Y., Kiyokawa K. Panoramic view reconstruction for stereoscopic teleoperation of a humanoid robot. *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots*, 2016, pp. 242–248. DOI: 10.1109/HUMANOIDS.2016.7803284.
21. Wu J., Ouhyung M. On latency compensation and its effects on head motion trajectories in virtual environments. *The Visual Computer*, 2000, vol. 16, pp. 79–90. DOI: 10.1007/s003710050198.

22. Brudnak M.J. Predictive displays for high latency teleoperation. *Proc. NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium*, 2016, pp. 1–16.

23. Liu N., Lu T., Cai Y., Lu J. et al. Design of virtual reality teleoperation system for robot complex manipulation. *Proc. 2019 CAC*, 2019, pp. 1789–1793. DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8997211.

Для цитирования

Кугуракова В.В., Хафизов М.Р., Кадыров С.А., Зыков Е.Ю. Удаленное управление роботизированным устройством с использованием технологий виртуальной реальности // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 348–361. DOI: 10.15827/0236-235X.139.348-361.

For citation

Kugurakova V.V., Khafizov M.R., Kadyrov S.A., Zykov E.Yu. Remote control of a robotic device using virtual reality. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 348–361 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.348-361.

УДК 519.681.5
DOI: 10.15827/0236-235X.139.362-373
Дата подачи статьи: 25.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 362–373

Применение технологии CUDA для обучения нейронной сети Кохонена

Д.С. Латыпова [1], *аспирант, dina.latypova23@gmail.com*
Д.Н. Тумаков [1], *к.ф.-м.н., доцент, dtumakov@kpfu.ru*

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт вычислительной математики и информационных технологий, г. Казань, 420008, Россия*

Проведена кластеризация данных, содержащихся в обучающих выборках – базах данных MNIST и Fashion MNIST. Для кластеризации использована нейронная сеть Кохонена с евклидовой метрикой при оценке расстояний. Для каждой рукописной цифры (MNIST) и каждого типа предметов обихода (Fashion MNIST) определено оптимальное количество кластеров (не более 50).

Обучение нейронной сети распараллелено на графическом устройстве NVidia с использованием технологии CUDA. Для каждой цифры приведены результаты, иллюстрирующие сравнение времен работы процессора и графического процессора. Как для цифр, так и для типов предметов обихода сделан вывод о 17-кратном ускорении параллельных вычислений над последовательными на игровом ноутбуке начального уровня. Тестовые выборки из тех же баз данных использованы для проверки правильности построения кластеров. Как для последовательного, так и для параллельного обучения сделан вывод о том, что векторы из тестовой выборки принадлежат правильному кластеру с вероятностью более 90 % в случае рукописных цифр. Кроме того, для каждой цифры и каждого типа предметов обихода вычислены F-меры для оценки попадания объектов в свои кластеры.

Показано, что последовательная и параллельная кластеризации дают близкие результаты. Наилучшие значения F-меры получены для цифр 0 и 1 (F-среднее значение равно 0,974), в то время как худшее значение (0,903) получено для цифры 9. Для данных Fashion MNIST лучшее значение F-меры (0,96) получено для типа «Брюки», а худшее (0,34) – для типа «Рубашка». Несмотря на большие разбросы для значений F-метрик двух рассмотренных баз данных, отличия результатов кластеризации минимальны. Так, для MNIST максимальное отличие F-меры составляет порядка 0,01, а для Fashion MNIST – около 0,04.

Ключевые слова: *нейронная сеть Кохонена, кластеризация, распараллеливание, CUDA, MNIST.*

Распознавание образа – это автоматизированный процесс поиска точного соответствия и закономерностей данных, который тесно связан с машинным обучением. Распознавание изображений с использованием искусственного интеллекта широко применяется в повседневной жизни. Понимание рукописного ввода значительно облегчает взаимодействие между компьютером и человеком. Однако при распознавании изображений существует проблема с категоризацией данных – данные в неподходящей категории означают неверную информацию, что, в свою очередь, может привести к серьезным ошибкам.

Одним из решений этой проблемы является кластерный анализ данных. Распознавание образов выступает в качестве основного шага для обеспечения кластеризации, поскольку во время этого процесса анализируются структура и векторное значение каждого символа в наборе данных. Например, в работе [1] предложен алгоритм консенсусной кластеризации для набора рукописных цифр из БД MNIST. Так называемая надежная непрерывная кластеризация рассмотрена в [2]. В работе [3] предложен алгоритм для улучшения эффективности классификации при распознавании рукописных цифр на наборе данных MNIST.

Для кластеризации рукописных цифр часто применяются подходы c-means [4] и k-means [5, 6]. В работе [7] рукописные письма были сгруппированы с использованием нейронной сети Кохонена. Различные категории алгоритмов кластеризации рассмотрены в [8] – это кластеризации на основе разделов, плотности, сетки, а также иерархическая кластеризация. Одним из самых популярных алгоритмов кластеризации является k-means [9]. При использовании этого метода на большинстве данных достигается точность примерно 90 %. В случае больших размерностей также может быть применена кластеризация подпространства [10, 11].

Обучение нейронной сети на больших данных занимает довольно много времени, поэтому все чаще применяется распараллелива-

ние сетевого обучения с использованием технологии CUDA. Основная причина – единообразие операций, выполняемых во время обучения. В [12] технология CUDA использована для идентификации текста с помощью нейронных сетей, полученное ускорение составило 15 раз. В [13] технология CUDA применена для реализации самоорганизующихся карт на основе модели распределенных вычислений MapReduce. Во время работы ядра оптимизированы для доступа к общей памяти, а также ее эффективного использования. Было получено десятикратное ускорение. В [14] алгоритм Batch-SOM использован для кластеризации, а технология CUDA – для распараллеливания, выполненного на уровне обучающей выборки. В результате получено 11-кратное ускорение.

В [15] отмечено, что при реализации OpenCL снижается производительность по сравнению с технологией CUDA. Кроме того, при использовании различных комбинаций OpenCL и CUDA для двух разных видеокарт продемонстрирована возможность масштабирования реализации алгоритма SOM на разных графических устройствах. В [16] получено также ускорение алгоритма SOM на графических процессорах. В [17] рассмотрен алгоритм HPSOM, который был распараллелен с использованием технологий CUDA и MPI; показано, что с его помощью можно не только добиться хороших результатов с точки зрения производительности, но и оптимизировать затраты с точки зрения памяти.

В настоящей работе описана кластеризация рукописных цифр из БД MNIST [18] и типов предметов обихода из расширения MNIST – Fashion MNIST. Кластеризация выполнена с использованием нейронной сети Кохонена. При этом для каждого объекта количество кластеров, полученное предложенным алгоритмом, разное, но не превышает 50. Для оценки расстояния между изображениями цифр использована евклидова норма, хотя для оценки расстояний возможно использование и других метрик [15, 19]. Обучение сети Кохонена проведено на центральном и графическом процессорах с применением технологии CUDA.

Для каждой цифры приведены диаграммы, которые показывают время, затраченное на обучение. Проведено сравнение времени обучения на центральном и графическом процессорах. Получен средний коэффициент ускорения обучения нейронной сети с использованием технологии CUDA. Тестовая выборка позволила оценить точность кластеризации, вычислить F-меру для каждой цифры. Также кластеризация проведена для БД Fashion MNIST, которая, как и база MNIST, содержит обучающий и тестовый наборы соответственно из 60 000 и 10 000 примеров. Каждый пример представляет собой изображение в оттенках серого, связанное с меткой, которая берется из 10 классов. Получены оценки ускорения и точности кластеризации для обеих баз.

Материалы и методы

Целью кластеризации является разделение набора объектов на группы, называемые кластерами. Объекты группируются таким образом, чтобы в пределах одного кластера они были более похожи друг на друга, чем на объекты из других кластеров. Рассмотрим два набора данных: рукописные цифры и подборку изображений десяти типов предметов обихода.

Наборы данных MNIST и Fashion MNIST. MNIST – это БД рукописных цифр, которая содержит 60 000 изображений цифр в обучающей выборке и 10 000 изображений в тестовой. В таблице 1 приведена информация о том, сколько изображений каждой цифры содержится в обучающей и тестовой выборках. Каждое изображение из БД представлено в двух форматах: в виде метки и вектора значений пикселей, а также нормировано по размеру. Размер каждого изображения составляет 28 на 28 пикселей. При этом значение пикселя изменяется от 0 до 255, где 0 соответствует черному пикселю, а 255 белому.

Таблица 1

Количество изображений каждой цифры в обучающей и тестовой выборках из набора данных MNIST

Table 1

The number of each digit images in the training and test samples from the MNIST dataset

Цифра	Обучающая выборка	Тестовая выборка
0	5 923	980
1	6 742	1 135
2	5 958	1 032
3	6 131	1 010
4	5 842	982
5	5 421	892
6	5 918	958
7	6 265	1 028
8	5 851	974
9	5 949	1 009

БД MNIST и ее расширения (Fashion MNIST и другие) широко используются для тестирования различных подходов к распознаванию образов [20, 21], кластеризации [22] и других алгоритмов [23–25]. Многие алгоритмы проверяются на этой БД. Например, методы k-ближайшего соседа на основе MNIST дают ошибку 5 %, многослойные персептроны в зависимости от методов обучения и количества слоев – около 2–5 %, сверточные нейронные сети – чуть менее 1 %, а иерархические нейронные сети даже улучшают точность [26, 27].

Необходимо показать универсальность используемых нейронных сетей, то есть продемонстрировать способность предлагаемого алгоритма группировать не только рукописные цифры, но и другие изображения. Для этой цели выбран набор данных Fashion MNIST.

Набор модных списков содержит данные размером 28 на 28 пикселей и десять составляющих: футболка/топ, брюки, пуловер, платье, пальто, сандалии, рубашка, кроссовки, сумка, ботильоны. В обучающей выборке содержится 60 000 изображений, в тестовой – 10 000.

Нейронная сеть Кохонена. Эта сеть представляет собой неконтролируемый тип обучения и состоит из одного слоя настраиваемых весов. Веса нейронной сети изменяются таким образом, что векторы, принадлежащие одному и тому же кластеру, приводят в движение один и тот же выходной нейрон [28]. Архитектура нейронной сети Кохонена приведена на рисунке 1.

Выходы нейронной сети z_j вычисляются по формуле $z_j = \Sigma_i w_{ij} x_i$, где x_i – входные значения нейронной сети Кохонена. Изображения в наборе данных MNIST имеют размер 28 на 28.

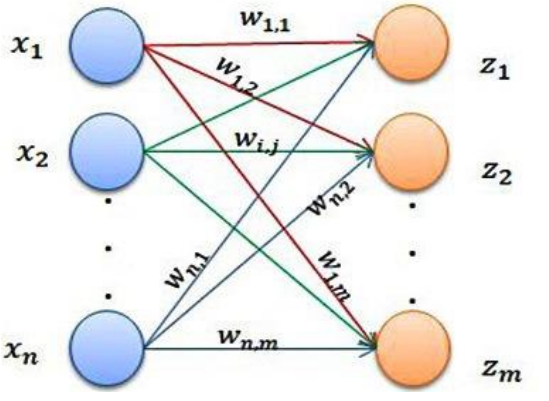


Рис. 1. Архитектура нейронной сети Кохонена

Fig. 1. The architecture of the Kohonen neural network

Следовательно, в нейронной сети Кохонена количество нейронов равно 784. Веса w_{ij} являются центрами кластеров и участвуют в обучении сети. Обучение нейронной сети Кохонена можно описать следующим алгоритмом.

Шаг 1. Нормируются входные векторы x^p.

Шаг 2. Из векторов обучающей выборки случайным образом выбираются значения весов w_{ij}. Это связано с тем, что в случае неравномерного распределения (если веса будут заполняться случайным образом) веса могут располагаться далеко от входных векторов и поэтому не принимать участия в обучении.

Шаг 3. Вычисляются расстояния между входными векторами x^p с координатами $x^p{}_i$ и весами w_{ij} по формуле $D_j = \left(\sum_{i=1}^{784} \left(x_i^p - w_{ij} \right)^2 \right)^{1/2}$.

Выбирается вектор-победитель – такой вектор w_j, у которого расстояние D_j до входного вектора x^p наименьшее.

Шаг 4. Изменяются координаты вектора-победителя, выбранного на предыдущем шаге, в соответствии с формулой $w_l = w_l + \theta(x^p - w_l)$, где θ – скорость обучения.

Шаг 5. Шаги 3 и 4 повторяются для всех векторов x^p.

Значение θ определяется по формуле $\theta = \alpha\theta$, где $\alpha < 1$. Если $\theta > \varepsilon$, то выполняется переход к шагу 3, и снова, проходя через все входные векторы, веса корректируются.

Технология CUDA. Процесс обучения нейронной сети очень длительный, для каждой цифры необходимо обучить отдельную нейронную сеть Кохонена. Для распараллеливания выберем технологию CUDA [29]. Логически графический процессор с поддержкой CUDA можно рассматривать как набор многоядерных процессоров. Основными вычислительными блоками таких видеочипов являются мультипроцессоры нескольких тысяч регистров общей памяти, текстурных и постоянных кэшей. Также стоит отметить одно из ключевых преимуществ технологии CUDA – отсутствие типов данных и принципов вычислений, характерных исключительно для обработки вершин и пикселей при построении кадра.

С помощью технологии CUDA могут быть достигнуты значительные ускорения (в несколько десятков раз) на обычных компьютерах при вычислении математических и физических задач [30–32]. Реализация нейронной сети с использованием комбинации CUDA и OpenMP и параллелизма центральных процессоров на уровне языка программирования и ап-

паратно-программного интерфейса создает еще один уровень прироста производительности.

Результаты

Кластеры рукописных цифр. Проблема с распознаванием рукописных цифр искусственным интеллектом заключается в том, что разные люди могут написать одно и то же разными способами. На примере БД MNIST можно видеть, что существует множество методов для записи определенной цифры. Каждая цифра имеет свои специфические особенности написания, например, цифру 1 можно записать с наклоном или без него. Каждая цифра имеет разное количество таких признаков. По этой причине количество кластеров для каждой цифры может быть разным.

Количество кластеров, на которые необходимо разделить входные изображения, неизвестно. Определим их оптимальное количество для каждой цифры. Для автоматической кластеризации будем использовать следующий алгоритм [33].

Шаг 1. На основе евклидовой метрики вычислим квадраты расстояний между всеми векторами в обучающей выборке. Из полученных значений создадим матрицу

$$d^2\left(x^i, x^j\right) = \left\|x^i - x^j\right\|^2 = \sum_{l=1}^{n} (x_l^i - x_l^j)^2 .$$

Шаг 2. Определим максимальное значение матрицы, которая была построена на предыдущем шаге. Этот элемент является максимальным расстоянием между всеми векторами ($\max d^2(x^i, x^j)$).

Шаг 3. Определим допустимое расстояние между векторами, расположенными в одном кластере, как фиксированный процент от максимального расстояния между векторами.

Шаг 4. Выберем произвольный i-й столбец матрицы (вектор x^i). Отметим все элементы столбца со значениями, меньшими допустимых, как элементы одного и того же кластера (строки под номером j). Проигнорируем i-й столбец, а также все j-е столбцы.

Шаг 5. Если матрица еще не пустая, то перейдем к шагу 4.

Таким образом, использовав автоматическую кластеризацию, для каждой цифры получим следующее количество кластеров: для 0 – 39, 1 – 49, 2 – 30, 3 – 47, 4 – 28, 5 – 33, 6 – 49, 7 – 29, 8 – 38, 9 – 28.

В таблице 2 показано оптимальное количество кластеров для БД Fashion MNIST. Легко заметить, что типы «Рубашка» и особенно «Сумка» содержат мало кластеров. Это связано с простотой изображений. Все изображения типа объектов «Сумка» обрабатываются как простые прямоугольники. Это дает один кластер, который представляет собой прямоугольник на плоскости.

Таблица 2

Оптимальное количество кластеров для каждого предмета обихода из Fashion MNIST

Table 2

An opptimal number of clusters for each Fashion MNIST

Тип предмета обихода	Количество кластеров
Футболка/Топ	25
Брюки	37
Свитер	29
Платье	37
Пальто	44
Сандалии	46
Рубашка	13
Кроссовки	49
Сумка	1
Туфли	40

После определения оптимального количества кластеров для каждой цифры используем нейронную сеть Кохонена для построения самих кластеров.

Реализация нейронной сети Кохонена. Оптимальные параметры для обучения нейронной сети Кохонена получены экспериментально: $\alpha = 0{,}96$, $\varepsilon = 0{,}02$, $\theta = 0{,}6$. Ниже представлены основные этапы обучения этой сети, которые являются самыми длительными по времени.

Первый шаг влияет на определение расстояния между весами и вектором из обучающей выборки. Представим функцию для вычисления расстояния и выбора минимального расстояния на процессоре ($m = 39$):

```
void DistanceSeq(int clustersCount, int
numOfVector, float* x[], float* w[], int*
clst){
float minimum = FLOAT_MAX, tmp;
int num = 0;
for (int i = 0; i < clustersCount; i++){
      tmp = 0.0f;
      for (int j = 0; j < N; j++){
         float r = w[i][j] - x[numOfVec-
tor][j];
         tmp += r * r;
      }
      if (tmp < minimum){
         min = tmp;
```

```
            num = i;
        }
}
*clst = num;
}
```

Эта часть определяет расстояние от вектора из обучающей выборки x[numOfVector] до каждого из кластеров *w*[*i*]. Количество кластеров обозначено как clustersCount, и это значение варьируется от 28 до 49 в зависимости от цифры, для которой выполняется обучение. Так как проводится перебор всех пикселей изображения по всем кластерам, сложность этой функции равна 0 (количество кластеров * *N*), где *N* равно 784.

Второй шаг влияет на прохождение всех векторов и изменяет веса нейронов. В обучающей части второй этап включает передачу всех векторов и изменение весов нейронов. Последовательный алгоритм обучения нейронной сети Кохонена выглядит следующим образом:

```
void Training_Sequential(int clst, int vec-
torsCount, float* w[], float* x[])
{
float h = 0.6f;
float rt = 0.96f;
float minimumh = 0.002f;
int distMin;
do
{
      for (int k = 0; k < vectorsCount;
k++){
         DistanceSeq(clst, k, x, w,
&distMin);
         for (int i = 0; i < N; i++)
            w[distMin][i] =
w[distMin][i]+h*(x[k][i]-w[distMin][i]);
      }
      h *= rt;
} while (h > minh);
}
```

В части обучения прохождение осуществляется по всем векторам из обучающей выборки. Переменная vectorsCount обозначает количество векторов в выборке, а distMin содержит номер кластера, к которому относится текущее векторное изображение.

Реализация алгоритма обучения нейронной сети Кохонена с помощью технологии CUDA. Алгоритм обучения нейронной сети Кохонена состоит из двух длительных этапов, которые были описаны выше. В обучающих образцах содержится около 6 000 изображений, размерность входного вектора равна 784, а количество кластеров для каждой цифры варьируется от 28 до 49. Как правило, обучение сети занимает всего несколько десятков итераций. В рассматриваемом случае (выбранные параметры указаны в предыдущем разделе) алгоритм обучения содержит 84 итерации. Существуют следующие уровни распараллеливания [34]: фазы обучения, обучающей выборки, слоя, нейрона и весов.

Выбор уровня распараллеливания зависит от количества нейронов, вычислительных узлов и особенностей компьютерной архитектуры искусственной нейронной сети. В настоящей работе распараллеливание осуществлено на уровне обучающей выборки, что связано с большим количеством входных векторов. Для распараллеливания выберем необходимое количество блоков (чтобы покрыть количество входных векторов), причем каждый блок содержит 256 потоков. Каждый поток отвечает за один вектор в обучающей выборке. Таким образом, убран цикл по всем изображениям, что значительно ускорит работу алгоритма. Функция Distance вычисляет расстояние между векторами на графическом процессоре. Представим ее код:

```
__device__ void Distance(int vector, float*
x[], float* w[], int* clst){
float mn = FLOAT_MAX, tmp;
int numb = 0;
for (int i = 0; i < CLUSTERCOUNT; i++){
   tmp = 0.0;
   for (int j = 0; j < N; j++){
      float r = w[i][j] - x[vector][j];
      tmp += r * r;
   }
   if (tmp < mn){
      mn = tmp;
      numb = i;
   }
}
*clst = numb;
}
```

Представим код функции графического процессора, которая обучает сеть Кохонена:

```
__global__ void TrainingPar(float* w[],
float* x[], float h){
int thread = blockIdx.x * blockDim.x +
threadIdx.x;
int distMin;
if (thread < vectorsCount)
   do{
      Distance(thread, patternArr, w,
&distMin);
      for (int i = 0; i < N; i++){
         w[distMin][i] += h * (x[thread][i]
- w[distMin][i]);
      }
      __syncthreads();
      h *= Rate;
   } while (h > minH);
}
```

Здесь Rate означает параметр θ. Обратим внимание, что в цикле *for* изменение веса *w* может выполняться одновременно несколькими потоками. Однако из-за большого размера выборки и, следовательно, частых изменений весов этот «конфликт» записи новых значений

в массив не является критичным и практически не влияет на результат.

Компьютер, на котором выполнены вычисления (в среде Visual Studio 2017), имеет следующие характеристики: операционная система – Windows 10 Pro x64, модель GPU – NVidia GeForce GTX 1050TI, объем GDDR – 4 GB, модель CPU – Intel Core i7-7700HQ 2.80 GHz, объем RAM – 24 GB.

На рисунке 2 представлена гистограмма, демонстрирующая время обучения сети Кохонена на CPU и GPU для каждой цифры отдельно.

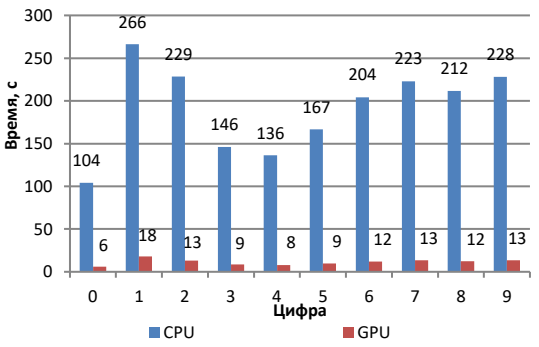


Рис. 2. Время обучения нейронной сети Кохонена на CPU и GPU

Fig. 2. Training time of the Kohonen neural network on CPU and GPU

На основе данных о времени выполнения алгоритма для каждой цифры можно рассчитать ускорение, полученное с использованием технологии CUDA. Коэффициент ускорения вычислен как отношение времени выполнения алгоритма на процессоре к времени выполнения алгоритма на графическом процессоре. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Ускорение работы на графическом процессоре при кластеризации

Table 3

GPU acceleration with clustering

Цифра	Ускорение
0	17,2
1	14,8
2	17,4
3	16,9
4	17,5
5	17,5
6	17,2
7	16,5
8	17,2
9	17,0

Таким образом, на основе анализа результатов (рис. 2 и табл. 3) можно сделать вывод, что обучение нейронной сети Кохонена ускоряется в среднем в 16,9 раза. Примерно такое же ускорение достигается и для Fashion MNIST.

Проверим правильность построения кластеров на тестовом образце. Для тестового образца из БД рукописных цифр MNIST проанализируем процент векторов – изображений цифр, которые находятся в требуемом кластере.

Для этого нужно определить расстояние от каждого вектора цифр до всех полученных кластеров для каждой из цифр. Если вектор изображения находится ближе всего к кластеру, который относится к группе кластеров для того же рисунка, считаем, что вектор попал в нужный кластер.

На рисунке 3 представлены процентные доли получения изображений из тестовой выборки в кластеры их цифр. Также имеет смысл проверить, построены ли кластеры отдельно на CPU и GPU.

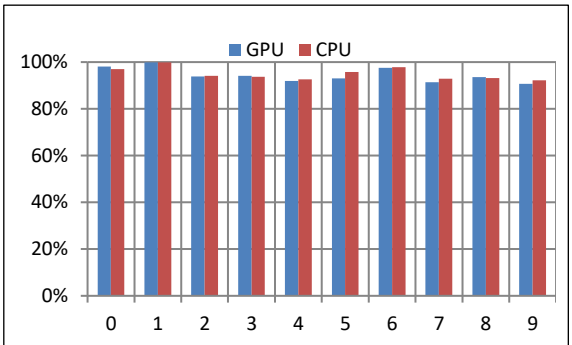


Рис. 3. Процент изображений цифр, которые попадают из тестовой выборки в свой кластер

Fig. 3. The percentage of images of numbers that fall from the test sample into their cluster

Сравнение точности определения типа предметов обихода на центральном и графическом процессорах показано на рисунке 4. Отметим, что в этом случае характеристики последовательного и параллельного алгоритмов очень близки. Как видно на рисунках 3 и 4, кластеры, построенные с помощью CPU и GPU, дают примерно одинаковый результат. Однако это не одно и то же. Кроме того, для анализа точности результатов кластеризации нейронной сети Кохонена вычислим F-меру (табл. 4).

Также вычислим F-меру для набора данных Fashion MNIST (табл. 5).

Класс «Рубашка» распознается очень плохо, в то время как классы «Брюки» и «Платье»,

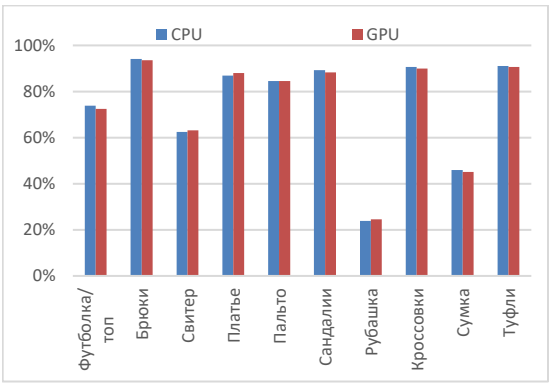


Рис. 4. Процент изображений преметов обихода, попадающих из тестируемого образца в свой кластер

Fig. 4. The percentage of images of clothes that fall from the tested sample into their cluster

а также классы, представляющие типы обуви, распознаются довольно хорошо. В среднем их распознавание нейронной сетью Кохонена составляет 74 %. Распознавание объектов из Fashion MNIST оказалось хуже, чем объектов из MNIST. Это связано с тем, что центры кластеров для этого набора оказались менее четкими, следовательно, при построении кластеров могут возникать ошибки.

Обсуждение

Основная проблема при распознавании образов заключается в том, что одни и те же цифры записываются по-разному. В результате либо значительно увеличивается количество кластеров, либо растет их размер. С другой стороны, существует проблема, связанная с тем, что разные цифры записываются одинаковым образом. В случае незначительного количества кластеров ожидается, что из-за их большого размера будут пересечения кластеров с разными цифрами [35].

Анализируя рисунок 3 и таблицу 5, можно сделать вывод, что нейронная сеть Кохонена может быть использована для распознавания шаблонов рукописных цифр, поскольку большой процент изображений цифр из тестовой выборки попадает в требуемый кластер. Отметим, что цифра 9 признана наихудшей, результат ее распознавания – чуть более 90 %. Цифра 1 распознается нейронной сетью Кохонена почти в 100 % случаев.

Алгоритм, реализованный на CUDA, показывает стабильные результаты кластеризации с большим количеством кластеров. Об этом свидетельствуют гистограммы на рисунке 4. Таким образом, для каждой из цифр 0, 1, 3, 6 и 8 количество кластеров варьируется примерно от 40 до 50 и процент цифр из тестовой выборки в ее кластере примерно одинаков. Для цифр 4, 5, 7 и 9 количество кластеров составляет около 30, и для них точность кластеризации для центрального процессора выше. Таким образом, увеличение количества кластеров дает улучшение результатов кластеризации на графическом процессоре.

Полученные кластеры могут быть использованы для распознавания изображений, например, в качестве этапа в ансамбле нейронных сетей или в иерархической нейронной сети. В этих случаях число кластеров может быть произвольным. В случае же использова-

Таблица 4

F-мера для кластеров, построенных на GPU и CPU на наборе данных MNIST

Table 4

F-measure for GPU and CPU clusters for the MNIST dataset

Цифра	Recall		Precision		F-means	
	GPU	CPU	GPU	CPU	GPU	CPU
0	0,97	0,97	0,98	0,97	0,97	0,97
1	0,95	0,96	0,99	0,99	0,97	0,98
2	0,96	0,97	0,94	0,94	0,95	0,95
3	0,93	0,96	0,94	0,94	0,94	0,95
4	0,94	0,94	0,92	0,93	0,93	0,93
5	0,95	0,94	0,93	0,96	0,94	0,95
6	0,96	0,97	0,98	0,98	0,97	0,97
7	0,95	0,95	0,91	0,93	0,93	0,94
8	0,94	0,95	0,94	0,93	0,94	0,94
9	0,89	0,89	0,90	0,92	0,90	0,91

Таблица 5

F-мера для кластеров, построенных на GPU и CPU на наборе данных Fashion MNIST

Table 5

F-measure for GPU and CPU clusters on the Fashion MNIST dataset

Тип предмета обихода	Recall		Precision		F-means	
	GPU	CPU	GPU	CPU	GPU	CPU
Футболка / Топ	0,73	0,75	0,72	0,74	0,72	0,74
Брюки	0,96	0,97	0,93	0,94	0,96	0,97
Свитер	0,66	0,65	0,63	0,62	0,64	0,63
Платье	0,78	0,74	0,91	0,87	0,84	0,80
Пальто	0,53	0,5	0,88	0,85	0,66	0,63
Сандалии	0,75	0,77	0,87	0,89	0,81	0,83
Рубашка	0,55	0,52	0,25	0,24	0,34	0,33
Кроссовки	0,80	0,83	0,88	0,91	0,83	0,86
Сумка	0,94	0,99	0,43	0,46	0,61	0,63
Туфли	0,89	0,9	0,90	0,91	0,89	0,9

ния нейронной сети Хопфилда существует ограничение на количество запоминаемых объектов [36] и для изображений MNIST оно ограничено 50.

Заключение

С использованием нейронной сети Кохонена проведена кластеризация рукописных цифр из БД MNIST и типов предметов обихода из БД Fashion MNIST. Для каждой цифры определено оптимальное количество кластеров. Сделан вывод, что изображения из тестовой выборки принадлежат правильному кластеру с вероятностью более 90 % для каждой цифры. Наилучшая кластеризация получена для цифр 0 и 1 (F-мера равна 0,97), в то время как цифра 9 была наихудшей кластеризованной – F-мера равна 0,903. Для данных Fashion MNIST лучшее значение F-меры получено для типа «Брюки» (значение равно 0,96), а худшее – для типа «Рубашка» (значение равно 0,34).

Алгоритм обучения нейронной сети Кохонена распараллелен на графическом процессоре с использованием технологии CUDA. Распараллеливание выполнено на уровне обучающей выборки. Для обеих БД алгоритм ускорен примерно в 17 раз. Несмотря на большой разброс значений F-метрик двух рассмотренных БД, отличия результатов кластеризации минимальны. Так, для MNIST максимальное отличие F-мер составляет порядка 0,01, а для Fashion MNIST – около 0,04. Таким образом, предложенный подход без потери точности кластеризации может быть использован для больших объемов данных.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Rexy M., Lavanya K. Handwritten digit recognition of MNIST data using consensus clustering. IJRTE, 2019, vol. 7, no. 6, pp. 1969–1973.

2. Nhery S., Ksantini R., Kaaniche M.B., Bouhoula A. A novel handwritten digits recognition method based on subclass low variances guided support vector machine. Proc. XIII Int. Joint Conf. on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications. VISAPP, 2018, vol. 4, pp. 28–36. DOI: 10.5220/0006611100280036.

3. Shal S.A., Koltun V. Robust continuous clustering. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, vol. 114, no. 37, pp. 9814–9817. DOI: 10.1073/pnas.1700770114.

4. Miri E., Razavi S.M., Sadri J. Performance optimization of neural networks in handwritten digit recognition using intelligent fuzzy c-means clustering. Proc. ICCKE, 2011, pp. 150–155. DOI: 10.1109/ICCKE.2011.6413342.

5. Pourmohammad S., Soosahabi R., Maida A.S. An efficient character recognition scheme based on k-means clustering. ICMSAO, 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICMSAO.2013.6552640.

6. Li B.Y. An experiment of k-means initialization strategies on handwritten digits dataset. Intelligent Information Management, 2018, vol. 10, pp. 43–48. DOI: 10.4236/iim.2018.102003.

7. Munggaran L.C., Widodo S., Cipta A.M. Handwritten pattern recognition using Kohonen neural network based on pixel character. IJACSA, 2014, vol. 5, no. 11, pp. 1–6. DOI: 10.14569/IJACSA.2014.051101.

8. Fahad A., Alshatri N., Tari Z., Alamari A., Zomaya A. et al. A survey of clustering algorithms for big data: taxonomy and empirical analysis. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 267–279. DOI: 10.1109/TETC.2014.2330519.

9. Bi Y., Wang P., Guo X. K-means clustering optimizing deep stacked sparse autoencoder. Sensing and Imaging, 2019, vol. 20, art. 6. DOI: 10.1007/s11220-019-0227-1.

10. Chen Y., Li C.G., You C. Stochastic sparse subspace clustering. Proc. CVPR, 2020, pp. 4155–4164.

11. Zhang S., You C., Vida R., Li C.G. Learning a self-expressive network for subspace clustering. Proc. CVPR, 2021, pp. 12393–12403.

12. Jang H., Park A., Jung K. Neural network implementation using CUDA and Open MP. Proc. DICTA, 2008, pp. 155–161. DOI: 10.1109/DICTA.2008.82.

13. Wittek P., Daranyi S. A GPU-accelerated algorithm for Self-Organizing Maps in a distributed environment. Proc. ESANN, 2012, pp. 609–614.

14. Daneshpajouh H., Delisle P., Boisson J.C., Krajecki M., Zakaria N. Parallel batch Self-Organizing Map on graphics processing unit using CUDA. In: High Performance Computing, CARLA, 2018, pp. 87–100. DOI: 10.1007/978-3-319-73353-1_6.

15. McConnell S., Sturgeon R., Henry G., Mayne A., Hurley R. Scalability of Self-Organizing Maps on a GPU cluster using OpenCL and CUDA. J. of Physics: Conf. Ser., 2012, vol. 341, art. 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/341/1/012018.

16. Takatsuka M., Bui M. Parallel batch training of the Self-Organizing Map using OpenCL. Proc. ICONIP, 2010, pp. 470–476. DOI: 10.1007/978-3-642-17534-3_58.

17. Liu Y., Sun J., Yao Q., Wang S., Zheng K., Liu Y. A scalable heterogeneous parallel SOM based on MPI/CUDA. PMLR, 2018, vol. 95, pp. 264–279.

18. LeCun Y., Cortes C., Burges C.J.C. The MNIST Database Handwritten Digits. URL: http://yann.lecun.com/exdb/mnist/ (дата обращения: 17.01.2022).

19. Xu Y., Zhang W. On a clustering method for handwritten digit recognition. Proc. III Int. Conf. on Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2010, pp. 112–115. DOI: 10.1109/ICINIS.2010.130.

20. Cohen G., Afshar S., Tapson J., Schaik A. EMNIST: Extending MNIST to handwritten letters. IJCNN, 2017, pp. 2921–2926. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966217.

21. Baldominos A., Saez Y., Isasi P. A Survey of handwritten character recognition with MNIST and EMNIST. Applied Sciences, 2019, vol. 9, no. 15, art. 3169. DOI: 10.3390/app9153169.

22. Agarap A.F., Azcarraga A.P. Improving k-means clustering performance with disentangled internal representations. IJCNN, 2020, pp. 1–8. DOI: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207192.

23. Cheng K., Tahir R., Eric L.K., Li M. An analysis of generative adversarial networks and variants for image synthesis on MNIST dataset. Multimedia Tools and Applications, 2020, vol. 79, no. 19-20, pp. 13725–13752. DOI: 10.1007/s11042-019-08600-2.

24. Kossen J., Farquhar S., Gal Y., Rainforth T. Active testing: Sample-efficient model evaluation. PMLR, 2021, vol. 139, pp. 5753–5763.

25. Zhang R., Chang P.C. Robustness against adversary models on MNIST by deep-Q reinforcement learning based parallel-GANs. Proc. APSIPA ASC, 2021, pp. 1590–1597.

26. Kayumov Z., Tumakov D., Mosin S. Hierarchical convolutional neural network for handwritten digits recognition. Procedia Computer Science, 2020, vol. 171, pp. 1927–1934. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.206.

27. Kayumov Z., Tumakov D., Mosin S. Combined convolutional and perceptron neural networks for handwritten digits recognition. Proc. DSPA, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/DSPA48919.2020.9213301.

28. Murtagh F., Hernández-Pajares M. The Kohonen Self-Organizing Map method: An Assessment. J. of Classification, 1995, vol. 12, no. 2, pp. 165–190. DOI: 10.1007/BF03040854.

29. Storti D., Yurtoglu M. CUDA for Engineers: An Introduction to High-performance Parallel Computing. Addison-Wesley Professional Publ., 2015, 352 p.

30. Shirokanev A.S., Andriyanov N.A., Ilyasova N.Y. Development of vector algorithm using CUDA technology for three-dimensional retinal laser coagulation process modeling. Computer Optics, 2021, vol. 45, pp. 427–437. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-828.

31. Giniyatova D., Tumakov D., Markina A. Solving the problem of electromagnetic wave diffraction by a flat screen using CUDA. Lobachevskii J. of Mathematics, 2021, vol. 42, no. 6, pp. 1335–1344. DOI: 10.1134/S1995080221060081.

32. Imankulov T., Daribayev B., Mukhambetzhanov S. Comparative analysis of parallel algorithms for solving oil recovery problem using CUDA and OpenCL. Int. J. of Nonlinear Analysis and Applications, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 351–364.

33. Сеньковская И.С., Сараев П.В. Автоматическая кластеризация в анализе данных на основе самоорганизующихся карт Кохонена. Вестн. МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. С. 278–279.

34. Nordstrom T. Designing parallel computers for Self-Organizing Maps. Proc. IV Swedish Workshop on Computer System Architecture, Linkoping, 1992, pp. 1–10.

35. Латыпова Д.С., Тумаков Д.Н. Определение основных кластеров рукописных цифр // DSPA. 2020. С. 620–625.

36. Latypova D., Tumakov D. Peculiarities of image recognition by the Hopfield neural network. Proc. IEMAICLOUD, 2021, vol. 273, pp. 34–47. DOI: 10.1007/978-3-030-92905-3_4.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.362-373

Received 25.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 362–373

Applying CUDA technology for training the Kohonen neural network

D.S. Latypova [1], *Postgraduate Student, dina.latypova23@gmail.com*
D.N. Tumakov [1], *Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, dtumakov@kpfu.ru*

[1] *Kazan Federal University, Institute of Computational Mathematics and Information Technology, Kazan, 420008, Russian Federation*

Abstract. The paper presents clustering of the data from in the training samples of the MNIST and Fashion MNIST databases. For clustering, the authors use a Kohonen neural network with a Euclidean metric for estimating distances. The optimal number of clusters (no more than 50) is determined for each handwritten digit (MNIST) and type of clothing (Fashion MNIST).

Neural network training is parallelized on a NVidia graphics device using CUDA technology. There are the results for each digit illustrating the comparison of the processor and GPU operating time. For both the digits and clothing types, there is a conclusion about a 17-fold acceleration on an entry-level gaming laptop. Test samples of the same databases are used to verify the cluster construction correctness. For both sequential and parallel learning, it is concluded that the vectors from the test sample belong to the correct cluster with a probability of more than 90 % in the case of handwritten digits. In addition, there are calculated F-measures for each digit and type of clothing to evaluate clusters.

It is shown that sequential and parallel clustering give similar results. The best values of the F-measure are obtained for the digits 0 and 1 (F-mean is 0.974), while the worst value is obtained for the digit 9 (F-mean is 0.903). For the Fashion MNIST data, the best value for the F-measure was obtained for trousers (F-average value is 0.96), and the worst value was for a shirt (F-average value is 0.34). Despite the large variations for the F-metric values of the considered two databases, the differences in the clustering results are minimal. Thus, the maximum difference of the F-measure is about 0.01 for the MNIST and about 0.04 for the Fashion MNIST.

Keywords: Kohonen neural network, clustering, parallelization, CUDA, MNIST.

Acknowledgements. *This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").*

References

1. Rexy M., Lavanya K. Handwritten digit recognition of MNIST data using consensus clustering. *IJRTE*, 2019, vol. 7, no. 6, pp. 1969–1973.

2. Nhery S., Ksantini R., Kaaniche M.B., Bouhoula A. A novel handwritten digits recognition method based on subclass low variances guided support vector machine. *Proc. XIII Int. Joint Conf. on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications. VISAPP*, 2018, vol. 4, pp. 28–36. DOI: 10.5220/0006611100280036.

3. Shal S.A., Koltun V. Robust continuous clustering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, vol. 114, no. 37, pp. 9814–9817. DOI: 10.1073/pnas.1700770114.

4. Miri E., Razavi S.M., Sadri J. Performance optimization of neural networks in handwritten digit recognition using intelligent fuzzy c-means clustering. *Proc. ICCKE*, 2011, pp. 150–155. DOI: 10.1109/ICCKE.2011.6413342.

5. Pourmohammad S., Soosahabi R., Maida A.S. An efficient character recognition scheme based on k-means clustering. *ICMSAO*, 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICMSAO.2013.6552640.

6. Li B.Y. An experiment of k-means initialization strategies on handwritten digits dataset. *Intelligent Information Management*, 2018, vol. 10, pp. 43–48. DOI: 10.4236/iim.2018.102003.

7. Munggaran L.C., Widodo S., Cipta A.M. Handwritten pattern recognition using Kohonen neural network based on pixel character. *IJACSA*, 2014, vol. 5, no. 11, pp. 1–6. DOI: 10.14569/IJACSA.2014.051101.

8. Fahad A., Alshatri N., Tari Z., Alamari A., Zomaya A. et al. A survey of clustering algorithms for big data: taxonomy and empirical analysis. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 267–279. DOI: 10.1109/TETC.2014.2330519.

9. Bi Y., Wang P., Guo X. K-means clustering optimizing deep stacked sparse autoencoder. *Sensing and Imaging*, 2019, vol. 20, art. 6. DOI: 10.1007/s11220-019-0227-1.

10. Chen Y., Li C.G., You C. Stochastic sparse subspace clustering. *Proc. CVPR*, 2020, pp. 4155–4164.

11. Zhang S., You C., Vida R., Li C.G. Learning a self-expressive network for subspace clustering. *Proc. CVPR*, 2021, pp. 12393–12403.

12. Jang H., Park A., Jung K. Neural network implementation using CUDA and Open MP. *Proc. DICTA*, 2008, pp. 155–161. DOI: 10.1109/DICTA.2008.82.

13. Wittek P., Daranyi S. A GPU-accelerated algorithm for Self-Organizing Maps in a distributed environment. *Proc. ESANN*, 2012, pp. 609–614.

14. Daneshpajouh H., Delisle P., Boisson J.C., Krajecki M., Zakaria N. Parallel batch Self-Organizing Map on graphics processing unit using CUDA. In: *High Performance Computing, CARLA*, 2018, pp. 87–100. DOI: 10.1007/978-3-319-73353-1_6.

15. McConnell S., Sturgeon R., Henry G., Mayne A., Hurley R. Scalability of Self-Organizing Maps on a GPU cluster using OpenCL and CUDA. *J. of Physics: Conf. Ser.*, 2012, vol. 341, art. 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/341/1/012018.

16. Takatsuka M., Bui M. Parallel batch training of the Self-Organizing Map using OpenCL. *Proc. ICONIP*, 2010, pp. 470–476. DOI: 10.1007/978-3-642-17534-3_58.

17. Liu Y., Sun J., Yao Q., Wang S., Zheng K., Liu Y. A scalable heterogeneous parallel SOM based on MPI/CUDA. *PMLR*, 2018, vol. 95, pp. 264–279.

18. LeCun Y., Cortes C., Burges C.J.C. *The MNIST Database Handwritten Digits*. Available at: http://yann.lecun.com/exdb/mnist/ (accessed January 17, 2022).

19. Xu Y., Zhang W. On a clustering method for handwritten digit recognition. *Proc. III Int. Conf. on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 2010, pp. 112–115. DOI: 10.1109/ICINIS.2010.130.

20. Cohen G., Afshar S., Tapson J., Schaik A. EMNIST: Extending MNIST to handwritten letters. *IJCNN*, 2017, pp. 2921–2926. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966217.

21. Baldominos A., Saez Y., Isasi P. A Survey of handwritten character recognition with MNIST and EMNIST. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 15, art. 3169. DOI: 10.3390/app9153169.

22. Agarap A.F., Azcarraga A.P. Improving k-means clustering performance with disentangled internal representations. *IJCNN*, 2020, pp. 1–8. DOI: 10.1109/IJCNN48605.2020.9207192.

23. Cheng K., Tahir R., Eric L.K., Li M. An analysis of generative adversarial networks and variants for image synthesis on MNIST dataset. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, vol. 79, no. 19-20, pp. 13725–13752. DOI: 10.1007/s11042-019-08600-2.

24. Kossen J., Farquhar S., Gal Y., Rainforth T. Active testing: Sample-efficient model evaluation. *PMLR*, 2021, vol. 139, pp. 5753–5763.

25. Zhang R., Chang P.C. Robustness against adversary models on MNIST by deep-Q reinforcement learning based parallel-GANs. *Proc. APSIPA ASC*, 2021, pp. 1590–1597.

26. Kayumov Z., Tumakov D., Mosin S. Hierarchical convolutional neural network for handwritten digits recognition. *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 171, pp. 1927–1934. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.206.

27. Kayumov Z., Tumakov D., Mosin S. Combined convolutional and perceptron neural networks for handwritten digits recognition. *Proc. DSPA*, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/DSPA48919.2020.9213301.

28. Murtagh F., Hernández-Pajares M. The Kohonen Self-Organizing Map method: An Assessment. *J. of Classification*, 1995, vol. 12, no. 2, pp. 165–190. DOI: 10.1007/BF03040854.

29. Storti D., Yurtoglu M. *CUDA for Engineers: An Introduction to High-performance Parallel Computing*. Addison-Wesley Professional Publ., 2015, 352 p.

30. Shirokanev A.S., Andriyanov N.A., Ilyasova N.Y. Development of vector algorithm using CUDA technology for three-dimensional retinal laser coagulation process modeling. *Computer Optics*, 2021, vol. 45, pp. 427–437. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-828.

31. Giniyatova D., Tumakov D., Markina A. Solving the problem of electromagnetic wave diffraction by a flat screen using CUDA. *Lobachevskii J. of Mathematics*, 2021, vol. 42, no. 6, pp. 1335–1344. DOI: 10.1134/S1995080221060081.

32. Imankulov T., Daribayev B., Mukhambetzhanov S. Comparative analysis of parallel algorithms for solving oil recovery problem using CUDA and OpenCL. *Int. J. of Nonlinear Analysis and Applications*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 351–364.

33. Senkovskaya I.S., Saraev P.V. Automatic clustering in data analysis based on Kohonen Self-Organizing Maps. *Vestn. of NMSTU*, 2011, pp. 278–279 (in Russ.).

34. Nordstrom T. Designing parallel computers for Self-Organizing Maps. *Proc. IV Swedish Workshop on Computer System Architecture*, Linkoping, 1992, pp. 1–10.

35. Latypova D., Tumakov D. Identification of base clusters of handwritten digits. *Proc. DSPA*, 2020, pp. 620–625 (in Russ.).

36. Latypova D., Tumakov D. Peculiarities of image recognition by the Hopfield neural network. *Proc. IEMAICLOUD*, 2021, vol. 273, pp. 34–47. DOI: 10.1007/978-3-030-92905-3_4.

Для цитирования

Латыпова Д.С., Тумаков Д.Н. Применение технологии CUDA для обучения нейронной сети Кохонена // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 362–373. DOI: 10.15827/0236-235X.139.362-373.

For citation

Latypova D.S., Tumakov D.N. Applying CUDA technology for training the Kohonen neural network. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 362–373 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.362-373.

УДК 004.42:005.83
DOI: 10.15827/0236-235X.139.374-383
Дата подачи статьи: 25.07.22, после доработки: 05.08.22
2022. Т. 35. № 3. С. 374–383

Методика упрощения таск-трекинга в проектах игровой индустрии

Р.А. Шараева [1], *младший научный сотрудник, r.sharaeva3496@gmail.com*
В.В. Кугуракова [1], *к.т.н., доцент, руководитель лаборатории, vlada.kugurakova@gmail.com*
Н.Э. Селезнева [1], *аспирант, nataliseleznewa306@gmail.com*

[1] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, Лаборатория разработки интеллектуальных инструментов компьютерных игр, Институт информационных технологий и интеллектуальных систем, г. Казань, 420008, Россия*

Разработка компьютерных игр отличается от традиционной разработки проектов в сфере информационных технологий, главным образом, высокой степенью креативности процессов, что необходимо учитывать при применении методов программной инженерии.

Темой настоящего исследования стали изучение особенностей автоматизации процессов управления проектами, а также разработка инструмента для управления задачами (таск-трекинг), воплощающего методики и рекомендации, сформированные для игровой индустрии. Для качественных формулировки цели и постановки задач проанализированы актуальные научные источники, в результате выделен ряд функций, необходимых для командных таск-трекеров: присвоение сотруднику роли или задачи, создание зависимых задач, диаграмма Ганта, доступ сотрудника к информации о связанных задачах, распространение ссылок и документов, создание повторно используемых шаблонов.

По результатам проведенного исследования представлена методика, которая упрощает работу менеджера проекта с точки зрения ведения задач. Разработанный подход предполагает создание следующих возможностей: автоматическое распределение задач исполнителям (в соответствии с направлением их деятельности), автоматическое создание дубликатов и настройка зависимости задач, автоматическая передача артефактов зависимым задачам, генерация шаблона проекта по брифу – опросному листу с ключевыми аспектами проекта. На примере управления процессом разработки приложениями с дополненной реальностью было показано, что полученные результаты актуальны для разработки интерактивных, геймифицированных проектов. Для проверки эффективности этих результатов сформированные практические приемы были интегрированы в систему с открытым исходным кодом (LeanTime).

Предложенный подход показал сокращение времени решения управленческих задач более, чем на 20 %, а в случае потребности в множестве новых шаблонов сокращение может превысить 40 %. Созданный веб-инструмент можно использовать в качестве инструмента автоматизации процессов разработки в любых узкоспециализированных ИТ-направлениях.

Ключевые слова: *программная инженерия, ИТ-разработка, игровая разработка, таск-трекер, автоматизация.*

По данным аналитики маркетплейса My.Games, за 2021 год российская индустрия видеоигр по объему вложенных финансовых ресурсов выросла до 177,4 млрд рублей. Помимо развлекательных целей, компьютерные игры могут внести большой вклад в освоение новых навыков благодаря геймификации процесса обучения. Сформировалось понятие «серьезные игры», которые стали активно развиваться в последнее время, погружаясь во многие сферы нашей жизни, включая здравоохранение, маркетинг и бизнес [1, 2]. Геймификация – это внедрение игровых форм в неигровой контекст: работу, учебу и повседневную жизнь.

Несмотря на то, что создание видеоигр вообще и разработка разнообразных геймифицированных проектов (геймдев-проектов) относятся к направлению программной инженерии, выделяют несколько аспектов, отличающих эту разработку от разработки ПО в общем случае. Прежде всего, сфера разработки видеоигр тесно связана с креативом и творческим процессом. Такая разработка требует участия, помимо программистов, разнообразных специалистов, например, сценаристов, музыкантов, художников. Игровые проекты чаще реализуются по гибким методологиям, когда предъявляемые требования менее четкие, чем для классических программных продуктов [3]. С уче-

том перечисленных аспектов необходим особый подход к таск-трекингу таких проектов.

Базовый функционал по управлению проектами разработки ПО – в общем случае давно решенная задача, но остается актуальным расширение возможностей используемого инструментария на специализированные сферы разработки.

Связанные работы

С точки зрения управления решением задач в сфере разработки ПО облачные технологии позволили менеджерам следить за процессами, реализуемыми в выполняемом проекте, дистанционно и с большой точностью. Интегрированность онлайн-технологий в ИТ-проекты максимально проявилась и в веб-сервисах, благодаря чему распространенными являются такие инструменты, как Trello (https://trello.com/ru) и даже более профессиональная система Asana (https://asana.com/).

С научной точки зрения интересны как эффективность, так и перспективы развития таск-трекеров, а развитие автоматизации в этой сфере позволяет сократить десятки часов работы менеджеров. В свою очередь, это дает возможность распараллелить производство проектов, а также упрощает ведение менеджерами нескольких проектов одновременно. Автоматизация рутины процесса управления проектами также может снизить порог вхождения в профессию, так как часть ошибок начинающих специалистов может быть нивелирована автоматизированными алгоритмами.

В [4] проанализированы 60 таск-трекеров для совместной работы с перечнем критериев оценки инструментов. Среди них интересны следующие функции: планирование на основе взаимосвязанных задач, создание диаграммы Ганта, возможность делиться ссылками, файлами и другими данными.

Существует ряд работ, которые затрагивают тему менеджмента в конкретной отрасли. Например, разработчики веб-трекера WebTP сформулировали требования к коллаборативному инструменту ведения веб-проекта [5].

Свое развитие получили как проприетарные инструменты для управления процессом разработки ПО, так и системы с открытым исходным кодом. Открытые системы по реализованному функционалу ничуть не отстают от популярных проприетарных, однако акцент на удобство использования больше присущ второму типу инструментов [6].

Актуальными для таск-трекера остаются следующие функции: присвоение сотруднику роли или задачи, создание взаимозависимых задач, диаграмма Ганта, доступ сотрудника к информации о связанных задачах, распространение ссылок и документов, создание повторно используемых шаблонов.

В 2018 году был проведен анализ трех зарубежных инструментов управления проектами: Asana, Freedcamp и Ace Project [7]. Подсвеченные отсутствующие функции Asana, такие как создание зависимостей между задачами, установка приоритетов, отсутствие диаграммы Ганта, были внедрены в более поздних обновлениях системы в бесплатной, премиум- или бизнес-версиях.

Поиск подходов для повышения эффективности инструментов для автоматизации проектного менеджмента продолжается, разрабатываются расширения существующих инструментов. Так, для Trello был выработан плагин, позволяющий отслеживать эмоциональное состояние сотрудников при получении технических задач [8].

Сбор статистических данных об активности участников проектной команды и их дальнейший анализ также вызывают интерес у руководителей проекта. Автоматизация отслеживания снимков кода и данных о действиях разработчиков предлагают в инструменте TaskTracker-tool [9].

В ходе анализа имеющихся источников авторами данного исследования не было найдено специализированное решение для автоматизации управленческих задач в сфере разработки игр. Однако получено достаточно информации для разработки целостной и эффективной концепции создания инструмента управления задачами и проектом в целом.

Существующие примеры автоматизации таск-трекинга в геймдев. По мнению интернет-издания Game Career Guide [10], в сфере разработки видеоигр наиболее популярными являются следующие системы таск-менеджмента.

- Asana – универсальная система управления проектами, разработанная в США. Имеет множество интеграций с другими инструментами, например, для учета времени или хранения и передачи артефактов разработки.
- Monday (https://monday.com/lang/ru) – универсальная система проектного менеджмента из Израиля. Предоставляет готовые шаблоны проектов без возможности заготовки задач. Передача файлов между участниками

команды доступна посредством интеграции. Решение предлагает настройку автоматизации через задание правил, например, для назначения конкретного исполнителя [11].

- Trello – австралийская универсальная система для ведения проектов. Инструмент предлагает гибкую настройку автоматизации с учетом правил [12], а также готовые шаблоны проектов.
- HacknPlan (https://hacknplan.com/) – система, специально предназначенная для ведения проектов из геймдев-сферы и разработанная в Испании. Особенностью инструмента является автоматическая генерация GDD (полного описания разрабатываемого игрового проекта). В решении отсутствует возможность настройки автоматизации и не реализована функция передачи результатов работ.
- Google Drive (https://www.google.com/intl/ru_ru/drive/) – хранилище файлов, разработанное американской компанией Google. Система не предназначена для полноценного таск-трекинга и управления проектом. Целевой функцией решения является возможность обмена данными с передачей дополнительных комментариев.
- Basecamp (https://basecamp.com/) – американское универсальное решение для управления проектами, предоставляющее функционал для создания проектов с использованием заранее заготовленных шаблонов. В системе недоступна настройка автоматизации и отсутствуют встроенный функционал и интеграция для передачи файлов с дополнительной информацией для корректной интеграции.
- Assembla (https://get.assembla.com/) – универсальная система управления проектно-ориентированным бизнесом, которая создана специально для команд, занимающихся разработкой ПО. Создатели решения делают акцент на функциях контроля версий, автоматическом резервном копировании и на безопасности продуктов пользователей. Несмотря на это, в инструменте отсутствует возможность настраиваемой автоматизации дубликатов задач и назначения исполнителей.
- Jira (http://jira.ru/) – популярный инструмент для управления проектами из США, предлагающий готовые шаблоны без заготовки задач, передачу файлов между участниками команды посредством интеграции и автоматизацию назначения исполнителей, а также других настраиваемых правил [13].

Настраиваемая автоматизация в существующих системах предусматривает настройку правил для автоматизации, например, назначение конкретного или свободного исполнителя при смене статуса задачи. Однако она не учитывает проектную роль участников команды.

В системе управления проектами Asana [14] есть возможность автоматического создания дубликата задачи при назначении дополнительного исполнителя. Такой подход может позволить значительно сократить время, но он не учитывает последовательность выполнения задач.

Только в двух решениях (Asana и HacknPlan) доступно создание шаблонов: у пользователя есть возможность формирования проекта с заготовленными задачами и дальнейшего использования его в качестве шаблона [15, 16]. Однако в сфере разработки геймдев присутствуют множества библиотек и различных механик [17], что при наличии всевозможных шаблонов, учитывающих все эти комбинации, не ускорит процесс старта проекта, а замедлит его из-за долгого выбора подходящего шаблона. Поэтому требуется пересмотр парадигмы шаблонизации.

Передача файлов, встроенная или организованная путем интеграции, в выявленных авторами статьи системах представляет собой непосредственно отсылку или передачу доступа. Но при специфике геймдев-проектов и необходимости разбиения команды их исполнителей на группы по имеющимся навыкам деятельности необходима передача дополнительных данных для интеграции в проект артефактов. Напрашивается аналогичный вывод – требуется уточнение процедуры передачи материалов от одного участника команды другому.

Общее заключение: необходимо пересмотреть все описанные механики автоматизации, привычно используемые в таск-трекерах в геймдев. При этом система Asana является ключевым аналогом решения, разрабатываемого в рамках настоящего исследования, так как включает в себя и автоматизацию назначения и дублирования задач, и создание шаблонов с заготовкой задач.

Особенности разработки геймдев-проектов. *Многофункциональная команда разработки.* Выделяют две наиболее популярные методологии разработки геймдев-проектов: водопадную (Waterfall) и гибкую (Agile) [2]. Учитывая риски, водопадную разработку ПО стоит применять лишь при условии полного понимания и неизменности требований, а также в случае «штамповки» подобных решений. Методо-

логия Agile является более подходящей для ведения проектов по созданию игровых приложений и приложений с дополненной реальностью, так как в ней большее внимание уделяется качеству ПО, пожеланиям заинтересованных лиц и быстрому получению рабочего прототипа. Однако стоит учесть, что для сферы разработки видеоигр (https://vc.ru/hr/174739-komandy-razrabotchikov-sostav-i-roli-v-gamedev) характерна многофункциональная команда разработки, включающая как классические (проектный менеджер/scrum master, аналитик, архитектор/техлид, UI/UX-дизайнер, программист/разработчик, тестировщик/QA, заказчик/владелец продукта/producer), так и узкоспециализированные роли (например, арт-лид, нарративный дизайнер; сценарист, level-дизайнер/дизайнер уровней, 3D-дизайнер, аниматор, 2D-дизайнер, саунд-дизайнер/композитор). Поэтому существуют гибкие методологии, учитывающие аспекты и проблемы геймдев-сферы [18]. Для целей конкретного проекта список специальностей, конечно, может быть расширен. Главный вывод – задачи не могут быть назначены любому свободному участнику команды, а должны быть выполнены только одним из целевых специалистов, владеющим определенными компетенциями. В командах разработки обычного ПО таких узких специальностей намного меньше.

Ответы на шаблонные вопросы формируют рутины. В зависимости от выбранного фокуса геймдев-приложения необходим стартовый набор ответов на вопросы (будем называть его «бриф»), которые влияют на реализацию проекта (например, если речь идет об AR-приложении: На каком устройстве воспроизводится приложение с дополненной реальностью? Какой игровой движок используется при разработке? Какая платформа дополненной реальности используется? Какой маркер используется для запуска дополненной реальности? Взаимодействует ли пользователь с элементами дополненной реальности? Нужен ли пользовательский интерфейс? Какой тип контента воспроизводится? Нужен ли сценарий?). Список вопросов может быть расширен в сторону более детального разбиения, а также путем введения дополнительных критериев. Ответы на эти вопросы определяют, какими навыками должны обладать специалисты в команде, и позволяют генерировать рутинные процедуры, необходимые на старте проекта.

Сильно связанный процесс разработки и слабые коммуникации. Проектный менеджмент разработки игры, как и других видов ПО, включает постановку и распределение задач, управление и контроль их выполнения [2]. По существующим сложностям сфера разработки игр незначительно отличается от традиционной разработки, имея общие с последней актуальные проблемы: отставание от графика, возникающее в связи с неправильной оценкой и неучетом рисков, или неверная оценка бюджета и масштабов проекта [19]. Помимо наличия большого количества креативных задач, есть риск упустить в оценке проекта базовые задачи, которые так или иначе должны быть решены, а также последовательность выполнения задач. В команде с участниками, каждый из которых имеет узкоспециализированные навыки, решаемые задачи по умолчанию должны быть привязаны к конкретным исполнителям в зависимости от их специализации, однако такое четкое разделение порождает проблему отсутствия коммуникации между группами разработки [18]. Вторым сложным моментом при такой многофункциональной команде является простаивание специалиста одного направления, ожидающего, когда решит задачу участник с другим навыком [19], – в противовес, например, веб-разработке, когда frontend- и backend-части могут быть реализованы параллельно.

Авторам не известны подходы к реализации системы управления проектами, которая могла бы позволить решить проблемы, описанные выше.

Предлагаемая методика

После детального анализа особенностей геймдев-проектов был выработан подход к созданию системы таск-трекинга, позволяющей упростить управление задачами их реализации.

1. *Исполнители автоматически получают задачи по своему направлению.* При этом в зависимости от размера проекта исполнителей для заданного направления один или несколько участников команды могут иметь множество ролей. Реализовать такое автоматическое назначение задач можно, опираясь на метки к ней. Назначение меток должно модерироваться через справочник в панели администратора (например, при указании на задаче метки 3D-модель она будет назначена исполнителю с ролью 3D-дизайнер). Если претендентом на решение задачи является не один член команды, задача будет назначена лидеру группы разработки (арт-лиду – для задач визуальной части,

техлиду – для программистов) для дальнейшего выбора исполнителя в подчиненной ему группе разработки уже вручную.

2. *Автоматическое дублирование и настройка зависимостей между задачами.* В рассматриваемой сфере выделяют креативные задачи и задачи по программированию, при этом большинство требований связано с разработкой контента и дальнейшей интеграцией [20]. Описание и иная информация, например, референсные данные, сроки исполнения, могут быть едиными для всех задач для реализации требования. При такой специфике можно сократить время на дублирование и распределение задач. В качестве примера приведем простейший сценарий AR-приложений: по распознаванию маркера дополненной реальности с помощью камеры смартфона на экране должен появиться скачущий мяч. Какие же задачи необходимо осуществить для выполнения требования? Минимальный их набор: создание трехмерной модели мяча (роль исполнителя – 3D-дизайнер), анимирование мяча (роль исполнителя – аниматор), интеграция мяча в проект (роль исполнителя – программист), сборка проекта (роль исполнителя – программист). Необходимо учесть и порядок выполнения задач: 1 – создание модели, 2 – анимация, 3 – интеграция модели, 4 – финальная сборка проекта.

Исходную идею назначения исполнителей логично расширить до алгоритма автоматизации, представленного на кратких блок-схемах (рис. 1–3), более детальные блок-схемы представлены соответственно в приложениях (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/28.jpg, http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/29.jpg, http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/30.jpg).

Если невозможно полностью описать общее требование для дубликатов задачи, возможны корректировка описания дубликатов задачи, а также добавление дополнительной информации для реализации.

К подходу, описанному выше, можно отнести и такую стадию выполнения задачи, как проверка лидерами групп разработки технической реализации, а качества – тестировщиками, путем добавления соответствующих меток и учета последовательности выполнения. Конечно, для этого должна быть настроена система меток.

3. *Автоматическая передача артефактов зависимым задачам.* Для решения проблемы коммуникации в команде разработки и передачи артефактов между исполнителями необходим функционал фиксации результата выполнения задач. У исполнителя задачи должна быть возможность как сохранить сам артефакт разработки, так и оставить дополнительные комментарии. Для корректной работы процесса менеджеру проекта или scrum-мастеру необходимо обеспечить добросовестную фиксацию результатов по итогам завершения выполнения задачи исполнителем. По выполнении одной задачи ее результат дублируется зависящим задачам. При этом отображение сохраненных артефактов для всей цепочки зависимых задач позволит снизить риск пропуска важных аспектов артефактов разработки

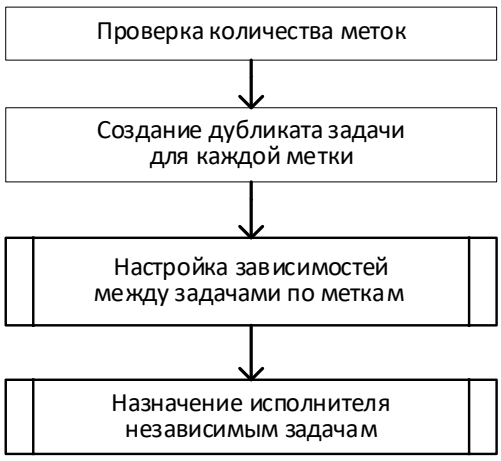


Рис. 1. Создание дубликатов задачи

Fig. 1. Creating task duplicates

Рис. 2. Настройка зависимости между задачами по меткам

Fig. 2. Setting the dependency between tasks by labels

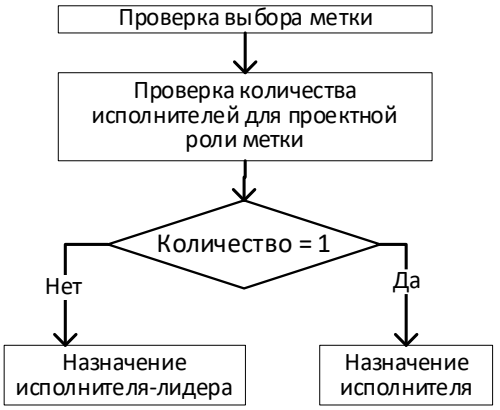


Рис. 3. Назначение исполнителя по меткам

Fig. 3. Appointing a performer by labels

и их модификаций для дальнейшей работы. Важно отобразить цепочку событий в иерархическом виде для лучшей визуализации процесса разработки со ссылками на детали задач-предшественников. Если переданной информации задаче-наследнику будет недостаточно, имея ссылку на предшествующую задачу и ее исполнителя, можно инициировать дополнительное обсуждение.

4. *Генерация шаблона проекта по брифу*. Бриф представляет собой опросный лист с ключевыми инструментами, механиками и иными аспектами проекта. Заготовка задач и заметок по ответу на эти вопросы позволяет сгенерировать начальное представление проекта в таск-трекере, минуя рутинные этапы инициализации базовых компонентов проекта. Создание отдельных шаблонов для пересечения множеств технологий, механик и иных условий, как представлено в аналогах, может быть неэффективным. Во-первых, потребуется достаточное время на создание каждой из таких заготовок. Во-вторых, не все варианты могут быть востребованы командой. В-третьих, выбор шаблонов из имеющегося множества также станет непростой задачей (так сделано в системе Asana). Для задач должна быть доступна настройка всех параметров, включая перечень меток, что позволяет к моменту начала работ иметь начальное представление проекта с назначенными исполнителями и установленным порядком решения зависимых задач. Для достижения большего эффекта в режиме администратора должны быть доступны настройка опросных листов и создание отдельных опросных листов (например, для приложений виртуальной реальности). Тогда решение становится универсальным для всей сферы разработки видеоигр.

Обсуждение реализации

Для проверки разработанной методики новые функции (генерации шаблона проекта с задачами и заметками по результатам заполнения брифа, автоматического сбора и передачи результатов работы другим участникам команды разработки, автоматизации дублирования задач и назначения исполнителей с учетом процесса разработки проектов) были внедрены в систему LeanTime [21] с открытым исходным кодом, написанным на языке PHP. Данная система опережает другие открытые системы по реализованному функционалу и отвечает почти всем требованиям современного таск-трекера (возможность ведения разработки как по Waterfall, так и по Agile; наличие канбан-доски для отслеживания перечня задач; возможность интеграции с системами хранения больших объемов данных – для хранения результатов по итогам выполнения задачи), для полного соответствия этому термину были внедрены заметки, зависимость задач и диаграмма Ганта по задачам (рис. 4).

Более того, была подтверждена гипотеза упрощения таск-трекинга на примере ведения проекта в реализованной системе и ее аналоге (Asana). Согласно собранной статистике, предложенный подход к автоматизации показал сокращение времени на управленческие задачи более чем на 20 %. Однако в случае потребности множества новых шаблонов сокращение может превысить и 40 %. Действительно, когда создается один проект либо используется только один шаблон, время, затрачиваемое на создание системы проектных ролей и меток, а также составление опросного листа, бессмысленны. Ручные настройки исполнителей задач и зависимостей между задачами также оказывают существенное влияние на сокращение времени менеджера.

Возможность передачи артефактов разработки также может быть необязательным требованием к системе управления задачами, однако такой функционал позволит оптимизировать взаимодействие сотрудников внутри команды.

Стоит отметить, что немаловажным фактором стало наличие большого объема релевантного опыта у авторов статьи [22–24].

Разрабатываемый инструмент можно соединить с другими инструментами автоматизации, которые встраиваются в пайплайн гейм-

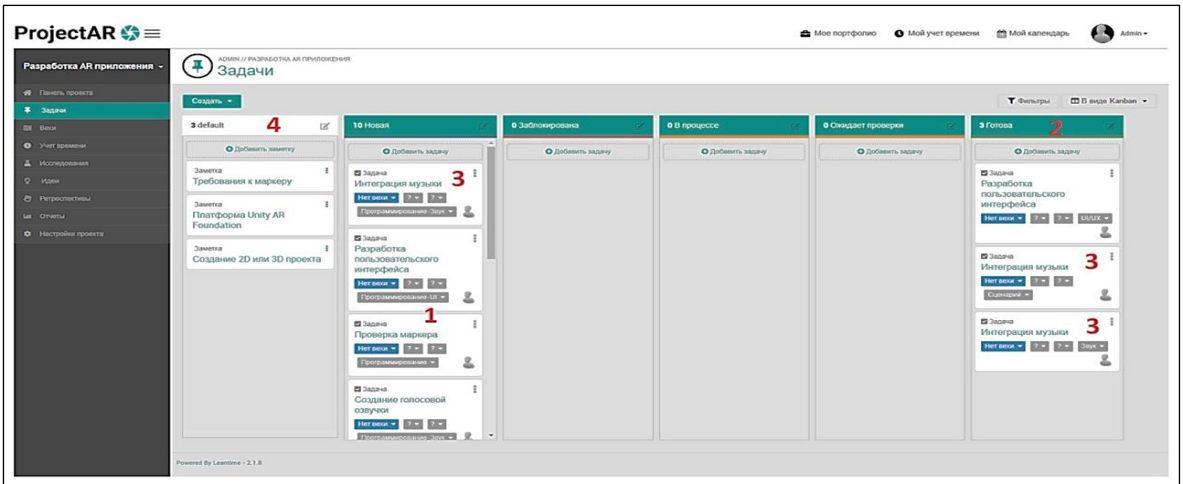


Рис. 4. Интерфейс расширенного таск-трекера: 1 – отображение меток задач; 2 – при переносе в статус «Готово» зависящим задачам назначается исполнитель по роли для метки; 3 – сгенерированные дубликаты одной задачи для уникальных меток с учетом последовательности выполнения; 4 – заметки к проекту

Fig. 4. The extended task tracker interface: 1 – displaying task labels; 2 – dependent tasks are assigned an executor according to the role for the label when moving to the "Done" status; 3 – generated duplicates of one task for unique labels taking into account the execution sequence; 4 – project notes

дев-проектов. Например, интеграция артефактов генератора игровых прототипов [25, 26] может производиться на нескольких уровнях: сценарий, компьютерная графика, код.

Заключение

Несмотря на наличие множества систем таск-трекинга, как для сферы разработки игр, так и для традиционной разработки ПО существуют пути дальнейшего расширения функционала. Создание собственных подходов к уже реализованным возможностям, которые учитывают специфику и процессы разработки проекта, позволит сократить время менеджеров на управление задачами, а также такие риски, как проблемы коммуникации внутри команды.

В статье предложен новый подход к ведению проекта в системах таск-трекинга, учитывающий особенности разработки геймдев-проектов и включающий в себя генерацию проекта по его ключевым вопросам, автоматизацию назначения исполнителей с учетом их роли и последовательности выполнения задач, а также передачу артефактов разработки по цепочке последовательных задач.

Необходимо отметить, что созданный веб-инструмент можно использовать в качестве инструмента автоматизации процессов разработки в любых узкоспециализированных ИТ-направлениях, не ограничиваясь лишь управлением геймдев-проектами.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

Литература

1. Vasudevamurt V., Uskov A. Serious game engines: Analysis and applications. Proc. IEEE Int. Conf. EIT, 2015, pp. 440–445. DOI: 10.1109/EIT.2015.7293381.

2. Aleem S., Capretz L., Ahmed F. Game development software engineering process life cycle: A systematic review. J. of Software Engineering Research and Development, 2016, vol. 4, art. 6. DOI: 10.1186/s40411-016-0032-7.

3. Murphy-Hill E., Zimmermann T., Nagappan N. Cowboys, ankle sprains, and keepers of quality: How is video game development different from software development? Proc. ICSE, 2014, pp. 1–11. DOI: 10.1145/2568225.2568226.

4. Oliveira J., Tereso A., Machado R. An application to select collaborative project management software tools. In: New Perspectives in Information Systems and Technologies, vol. 1. AISC, 2014, vol. 275, pp. 467–476. DOI: 10.1007/978-3-319-05951-8_44.

5. Andonova S., Bontchev B. Web project tracker. Proc. Int. Conf. CompSysTech, 2003, pp. 208–213. DOI: 10.1145/973620.973655.

6. Abramova V., Pires F., Bernardino J. Open source vs proprietary project management tools. In: New Advances in Information Systems and Technologies. AISC, 2016, pp. 331–340. DOI: 10.1007/978-3-319-31232-3_31.

7. Ferreira T., Gutiérrez-Artacho J., Bernardino J. Freemium project management tools: Asana, freedcamp and ace project. In: Trends and Advances in Information Systems and Technologies. AISC, 2018, pp. 1026–1037. DOI: 10.1007/978-3-319-77703-0_100.

8. El-Migid M.-A.A., Cai D., Niven T., Vo J., Madampe K., Grundy J., Hoda R. Emotimonitor: A Trello power-up to capture and monitor emotions of Agile teams. J. of Systems and Software, 2022, vol. 186, art. 111206. DOI: 10.1016/j.jss.2021.111206.

9. Lyulina E., Birillo A., Kovalenko V., Bryksin T. TaskTracker-tool: A toolkit for tracking of code snapshots and activity data during solution of programming tasks. Proc. SIGCSE '21, 2021, pp. 495–501. DOI: 10.1145/3408877.3432534.

10. Hall M. Choosing a Project Management Tool for Game Development. 2018. URL: https://www.gamedeveloper.com/business/choosing-a-project-management-tool-for-game-development (дата обращения: 19.07.2022).

11. Monday.com. Build Your Own Custom Automation. URL: https://support.monday.com/hc/en-us/articles/360012254440-Build-your-own-custom-automation (дата обращения: 19.07.2022).

12. Trello. Автоматизация любых действий в Trello. URL: https://trello.com/ru/guide/automate-anything (дата обращения: 19.07.2022).

13. ATLASSIAN. Jira Software. Руководство 3. Расширение Jira Software. Автоматизация: примеры использования. URL: https://www.atlassian.com/ru/software/jira/guides/expand-jira/automation-use-cases/ (дата обращения: 19.07.2022).

14. Asana Guide. Исполнители и участники задач. URL: https://asana.com/ru/guide/help/tasks/people (дата обращения: 19.07.2022).

15. Asana Guide. Создание и использование шаблонов Asana. URL: https://asana.com/ru/guide/team/advanced/create-use-asana-templates (дата обращения: 19.07.2022).

16. HacknPlan. Setting up a Project. Project Information. URL: https://hacknplan.com/knowledge-base/setting-up-a-project/#articleTOC_2 (дата обращения: 19.07.2022).

17. PHYGITALISM. AR механики: все о дополненной реальности. 2021. URL: https://phygitalism.com/wp-content/uploads/2021/04/PHYGITALISM-White-Paper-AR-2021.pdf (дата обращения: 19.07.2022).

18. Godoy A., Barbosa E. Game-Scrum: An approach to agile game development. Proc. of SBGames, 2010, pp. 292–295.

19. Petrillo F., Pimenta M., Trindade F., Dietrich C. Houston, we have a problem ...: A survey of actual problems in computer games development. Proc. ACM SAC, 2008, pp. 707–711. DOI: 10.1145/1363686.1363854.

20. Callele D., Neufeld E., Schneider K. Requirements engineering and the creative process in the video game industry. Proc. XIII IEEE Int. Conf. RE, 2005, pp. 240–250. DOI: 10.1109/RE.2005.58.

21. Sofbox. Innovation Management for Remote Teams. Open Source Project Management System – Leantime. URL: https://leantime.io/ (дата обращения: 19.07.2022).

22. Бакиров А.Р., Кугуракова В.В., Манахов Н.Р., Селезнёва Н.Э. Использование контроллера Microsoft Kinect в разработке реабилитационных игр // Электронные библиотеки. 2016. Т. 19. № 6. С. 521–537.

23. Кугуракова В.В., Судаков В.А., Нургалиев Д.К., Шараева Р.А. и др. Программа для симуляции трубы горения в виртуальной реальности: Свид. о регистр. ПрЭВМ № 2020660114. Рос. Федерация, 2020.

24. Sultanova R., Sharaeva R. Virtual reality-based immersive simulation mechanics for invasive surgery training. Proc. Int. Conf. DeSE, 2019, pp. 924–928. DOI: 10.1109/DeSE.2019.00171.

25. Сахибгареева Г.Ф., Кугуракова В.В. Прототипирование вариативности сюжета компьютерных игр // Научный сервис в сети Интернет: тр. XXIII Всеросс. науч. конф. 2021. С. 347–360. DOI: 10.20948/abrau-2021-11.

26. Sahibgareeva G., Kugurakova V. Branched Structure component for a video game scenario prototype generator. Proc. XXIII Sci. Conf. Scientific Services & Internet, 2021, pp. 101–111. DOI: 10.20948/abrau-2021-10-ceur.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.374-383

Received 25.07.22, Revised 05.08.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 374–383

A method for simplifying task tracking in video game development projects

R.A. Sharaeva [1], *Junior Researcher, r.sharaeva3496@gmail.com*
V.V. Kugurakova [1], *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Laboratory, vlada.kugurakova@gmail.com*
N.E. Selezneva [1], *Postgraduate Student, nataliseleznewa306@gmail.com*

[1] *Kazan Federal University, Institute of Information Technology and Intelligent Systems, Department of Software Engineering, Kazan, 420008, Russian Federation*

Abstract. Computer game development differs from "traditional" IT project development mainly due to the high degree of process creativity, which should be taken into account when applying software engineering methods.

The research topic is studying the specifics of project management process automation and developing a tool embodying the methods and recommendations formed for the game industry. The authors have analyzed topical scientific sources to set the goal and objectives correctly. As a result, they have highlighted a number of functions necessary for team task trackers that are: assigning a role or a task to an employee, creating dependent tasks, Gantt chart, giving access to information about related tasks to an employee, distributing links and documents, creating reusable templates.

Based on the extensive research results, the paper presents a methodology that simplifies the work of the project manager in terms of task management. The approach includes creation of the following features: executors automatically receive tasks according to their field of concern; automatic creation of duplicates and configuration of task dependencies; automatic transfer of artifacts to dependent tasks; generating a project template according to a brief. The work is interesting for the field of interactive project development with a prevailing game-dev component.

In order to check the result effectiveness, the generated practical approaches were integrated into the LeanTime system. The proposed approach has shown the reduction of time for management tasks by more than 20%; in case of need for many new templates the reduction can even exceed 40%. The designed web-tool can then be integrated as an automation tool not only in the development processes of gamedev projects, but in general for any highly specialized IT development areas.

Keywords: software engineering, IT development, gamedev, task tracker, automation.

Acknowledgements. *This paper has been supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program ("PRIORITY-2030").*

References

1. Vasudevamurt V., Uskov A. Serious game engines: Analysis and applications. *Proc. IEEE Int. Conf. EIT*, 2015, pp. 440–445. DOI: 10.1109/EIT.2015.7293381.
2. Aleem S., Capretz L., Ahmed F. Game development software engineering process life cycle: A systematic review. *J. of Software Engineering Research and Development*, 2016, vol. 4, art. 6. DOI: 10.1186/s40411-016-0032-7.
3. Murphy-Hill E., Zimmermann T., Nagappan N. Cowboys, ankle sprains, and keepers of quality: How is video game development different from software development? *Proc. ICSE*, 2014, pp. 1–11. DOI: 10.1145/2568225.2568226.
4. Oliveira J., Tereso A., Machado R. An application to select collaborative project management software tools. In: *New Perspectives in Information Systems and Technologies, vol. 1. AISC*, 2014, vol. 275, pp. 467–476. DOI: 10.1007/978-3-319-05951-8_44.
5. Andonova S., Bontchev B. Web project tracker. *Proc. Int. Conf. CompSysTech*, 2003, pp. 208–213. DOI: 10.1145/973620.973655.
6. Abramova V., Pires F., Bernardino J. Open source vs proprietary project management tools. In: *New Advances in Information Systems and Technologies. AISC*, 2016, pp. 331–340. DOI: 10.1007/978-3-319-31232-3_31.
7. Ferreira T., Gutiérrez-Artacho J., Bernardino J. Freemium project management tools: Asana, freedcamp and ace project. In: *Trends and Advances in Information Systems and Technologies. AISC*, 2018, pp. 1026–1037. DOI: 10.1007/978-3-319-77703-0_100.

8. El-Migid M.-A.A., Cai D., Niven T., Vo J., Madampe K., Grundy J., Hoda R. Emotimonitor: A Trello power-up to capture and monitor emotions of Agile teams. *J. of Systems and Software*, 2022, vol. 186, art. 111206. DOI: 10.1016/j.jss.2021.111206.

9. Lyulina E., Birillo A., Kovalenko V., Bryksin T. TaskTracker-tool: A toolkit for tracking of code snapshots and activity data during solution of programming tasks. *Proc. SIGCSE '21*, 2021, pp. 495–501. DOI: 10.1145/3408877.3432534.

10. Hall M. *Choosing a Project Management Tool for Game Development*. 2018. Available at: https://www.gamedeveloper.com/business/choosing-a-project-management-tool-for-game-development (accessed July 19, 2022).

11. *Monday.com. Build Your Own Custom Automation*. Available at: https://support.monday.com/hc/en-us/articles/360012254440-Build-your-own-custom-automation (accessed July 19, 2022).

12. *Trello. Automation of Any Actions in Trello*. Available at: https://trello.com/ru/guide/automate-anything (accessed July 19, 2022).

13. *ATLASSIAN. Jira Software. Guide 3. Jira Software Extension. Automation: Common Use Cases*. Available at: https://www.atlassian.com/ru/software/jira/guides/expand-jira/automation-use-cases/ (accessed July 19, 2022).

14. *Asana Guide. Task Assignee & Collaborators*. Available at: https://asana.com/ru/guide/help/tasks/people (accessed July 19, 2022).

15. *Asana Guide. Creating and Using Asana Templates*. Available at: https://asana.com/ru/guide/team/advanced/create-use-asana-templates (accessed July 19, 2022).

16. *HacknPlan. Setting up a Project. Project Information*. Available at: https://hacknplan.com/knowledgebase/setting-up-a-project/#articleTOC_2 (accessed July 19, 2022).

17. *PHYGITALISM. AR Mechanics: Everything about Augmented Reality*. Available at: https://phygitalism.com/wp-content/uploads/2021/04/PHYGITALISM-White-Paper-AR-2021.pdf (accessed July 19, 2022).

18. Godoy A., Barbosa E. Game-Scrum: An approach to agile game development. *Proc. of SBGames*, 2010, pp. 292–295.

19. Petrillo F., Pimenta M., Trindade F., Dietrich C. Houston, we have a problem ...: A survey of actual problems in computer games development. *Proc. ACM SAC*, 2008, pp. 707–711. DOI: 10.1145/1363686.1363854.

20. Callele D., Neufeld E., Schneider K. Requirements engineering and the creative process in the video game industry. *Proc. XIII IEEE Int. Conf. RE*, 2005, pp. 240–250. DOI: 10.1109/RE.2005.58.

21. *Sofbox. Innovation Management for Remote Teams. Open Source Project Management System – Leantime*. Available at: https://leantime.io/ (accessed July 19, 2022).

22. Bakirov A.R., Kugurakova V.V., Manahov N.R., Seleznjova N.E. Using Microsoft kinect in the rehabilitation games development. *Russ. Digital Libraries J*., 2016, vol. 19, no. 6, pp. 521–537 (in Russ.).

23. Kugurakova V.V., Sudakov V.A., Nurgaliev D.K., Sharaeva R.A. et al. *Software for Simulation of Combustion Pipe in Virtual Reality*. Patent RF, no. 2020660114, 2020 (in Russ.).

24. Sultanova R., Sharaeva R. Virtual reality-based immersive simulation mechanics for invasive surgery training. *Proc. Int. Conf. DeSE*, 2019, pp. 924–928. DOI: 10.1109/DeSE.2019.00171.

25. Sakhibgareeva G.F., Kugurakova V.V. Prototyping the variability of computer games plots. *Proc. XXIII Sci. Conf. Scientific Services & Internet*, 2021, pp. 347–360. DOI: 10.20948/abrau-2021-11 (in Russ.).

26. Sahibgareeva G., Kugurakova V. Branched Structure component for a video game scenario prototype generator. *Proc. XXIII Sci. Conf. Scientific Services & Internet*, 2021, pp. 101–111. DOI: 10.20948/abrau-2021-10-ceur.

Для цитирования

Шараева Р.А., Кугуракова В.В., Селезнева Н.Э. Методика упрощения таск-трекинга в проектах игровой индустрии // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 374–383. DOI: 10.15827/0236-235X.139.374-383.

For citation

Sharaeva R.A., Kugurakova V.V., Selezneva N.E. A method for simplifying task tracking in video game development projects. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 374–383 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.374-383.

УДК 519.68
DOI: 10.15827/0236-235X.139.384-395
Дата подачи статьи: 18.02.22, после доработки: 11.05.22
2022. Т. 35. № 3. С. 384–395

Прогнозирование на основе искусственной нейронной сети второго поколения для поддержки принятия решений в особо значимых ситуациях

Е.В. Пальчевский [1], *преподаватель, teelxp@inbox.ru*
В.В. Антонов [2], *д.т.н., профессор, antonov.v@bashkortostan.ru*
Р.Р. Еникеев [2], *к.т.н., доцент, enikeevRR@mail.ru*

[1] *Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, 109456, Россия*
[2] *Уфимский государственный авиационный технический университет, факультет ИРТ, г. Уфа, 450008, Россия*

Специализированные модели систем, реализованные на основе поддержки принятия решений с помощью искусственного интеллекта для воспроизведения, прогнозирования и предотвращения последствий исключительных ситуаций, становятся все более популярными. Под такие ситуации и состояния подпадают и паводки. Исходя из этого появляется задача прогнозирования исключительной ситуации на примере подъема уровней воды на стационарных гидрологических постах.

Для решения данной проблемы предложена система поддержки принятия решений для прогнозирования уровней подъема воды, основанная на нейросетевом анализе ретроспективных данных с целью расчета значений уровней воды на пять дней вперед. За основу самой искусственной нейронной сети берется свободно распространяемая библиотека программ машинного обучения TensorFlow. В качестве обучения применен измененный метод обратного распространения ошибки. Основным отличием метода является добавление коэффициента повышения скорости обучения искусственной нейронной сети.

Был проведен анализ эффективности предлагаемого решения в рамках прогнозирования паводковой ситуации. Он показал высокую точность при расчетах прогнозных значений уровней воды: разница между реальными и спрогнозированными значениями составила 2,10 %. Это позволит специализированным службам заблаговременно осуществлять противопаводковые мероприятия.

Таким образом, информационное сопровождение во время особых ситуаций – это абсолютный показатель качества данных, позволяющий вырабатывать и принимать решения в рамках прогнозирования возможных критических ситуаций и недопущения перевода состояния системы управления территорией в критическое.

Ключевые слова: *прогнозирование, интеллектуальный анализ данных, нейросетевой анализ, ретроспективные данные, прогнозирование уровней воды.*

Появление новых источников и технологий получения и обработки данных об объектах и системах, в том числе их местоположении, обусловило формирование принципиально новых условий для более качественного управления различными процессами и явлениями. При этом в рамках управления ими возникает некая двойственность ситуации: с одной стороны, существующие модели и методы получения и обработки данных используют достаточно большие объемы разнородной информации, на обработку которой требуется много времени, с другой, существуют ограничивающие факторы, например время, для принятия каких-либо управленческих решений на основе имеющихся данных. Соответственно, данные особенности в качестве внешнего фактора способны напрямую повлиять на принятие решений в рамках различных процессов и явлений, так как способствуют угрозам различным целостным системам, например городским поселениям, и подсистемам. Таким образом, для принятия верного управленческого решения при подобных угрозах необходимо заблаговременно получать данные о происходящих процессах и явлениях. Сложность этой проблемы определяется достаточно большим количеством управляющих параметров, нечеткостью требований и изменчивостью целей управления со стороны различных пользователей систем и участников процесса управления, необходимостью минимизировать уязвимость этих систем при наличии большого количества угроз различной природы и сложности. Для ре-

шения данной проблемы предлагается получать информацию о возможном будущем явления или процесса (на примере прогнозирования уровней воды водных ресурсов) с помощью системы, реализованной на основе искусственной нейронной сети второго поколения.

Большое распространение в прогнозировании уровней воды получили различные методы, подразделяющиеся, как правило, на концептуальные модели, физически обоснованные модели и модели черного ящика. Для первых двух категорий необходимо знать физический процесс уровня подъема воды на водных ресурсах, лежащий в фундаменте самой проблемы и описываемый с помощью каких-либо упрощенных соотношений (например, различные статистические методы расчетов [1–3]) или уравнений в частных производных (численные методы [4, 5]). При этом важно отметить, что первые два метода направлены на краткосрочное прогнозирование (от 1 до 2 суток). Что касается модели черного ящика, сюда относят машинное обучение, в том числе и с использованием искусственного интеллекта, нейронных сетей. Методы машинного обучения могут применяться и в рамках различных гибридных подходов, например, при объединении разных статистических моделей машинного обучения и методологий анализа временных рядов [6, 7]. Гибридные подходы могут использовать преимущества каждого из них по отдельности, в том числе и компонентные модели данных подходов, для достижения повышенной точности и гибкости прогнозирования уровней воды и зон затопления. Как следствие, такие модели показывают достаточно точные результаты в краткосрочном прогнозировании, но являются ресурсозатратными по времени. В рамках использования методов искусственного интеллекта, как правило, преобладают простые модели, например MLP [8–10], и сложные структурные нейросетевые решения – LSTM [11–13], CNN [14–17], WNN [18, 19]. Кроме того, применяются модели с использованием большого количества статистических методов – ARMA, ARIMA [20–22], ANFIS [23], NARX [24–26] и другие. Данные методы и модели позволяют не только достаточно точно рассчитывать прогнозные значения уровней воды при создании и обработке исключительных ситуаций, но и модифицировать их под различные задачи.

Исследование, проведенное авторами данной статьи, посвящено разработке метода анализа и направлено на прогноз состояний системы на основе показателей уровня паводковых вод.

Рассмотрим *информационную систему* (ИС) управления территорией (рис. 1), которая должна обладать рядом общесистемных свойств, в том числе устойчивостью, адаптируемостью и эмерджентностью, и обозначим ее *A*. Здесь под устойчивостью ИС понимается некая способность к возвращению ее в равновесное состояние после воздействия какого-либо внешнего возмущения, например, природного явления, нарушившего данное равно-

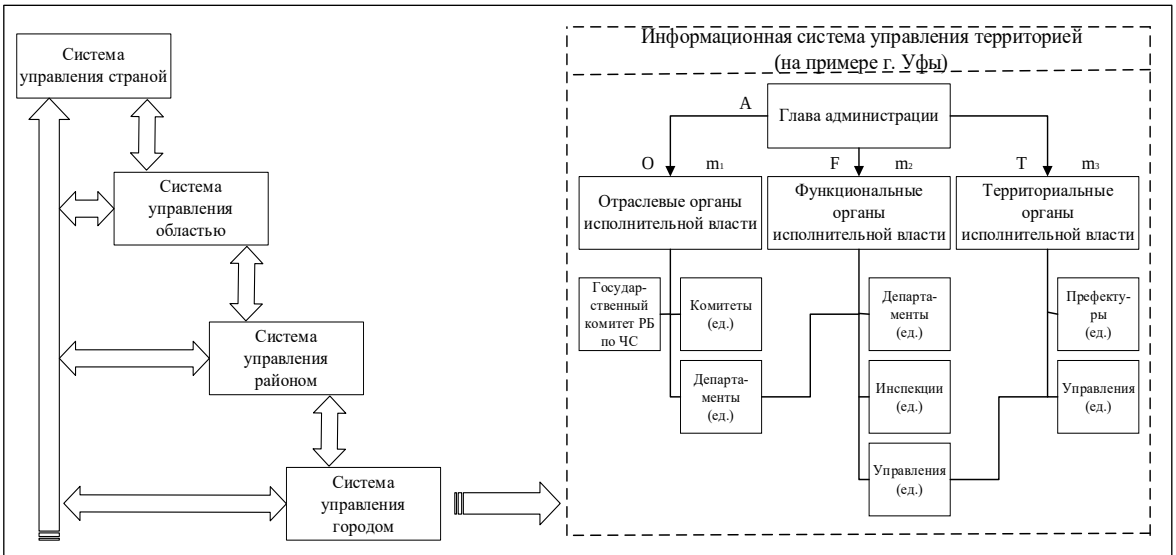


Рис. 1. Информационная система управления территорией

Fig. 1. A territory management information system

весие, под адаптируемостью – способность изменять структуру с целью сохранения показателей состояния в условиях изменения внешней среды. При этом у данной системы есть подсистемы (на рисунке 1 – *O*, *F* и *T*), изучив свойства которых, можно определить свойства самой ИС – эмерджентность. Более того, ИС и все ее подсистемы, несмотря на изменения взаимодействующей с ней внешней среды, должны сохранять свойства целостности.

Рассматриваемая ИС является сложным техническим объектом, может быть представлена в виде множества взаимодействующих подсистем *O, F, T,* и ее можно охарактеризовать множеством состояний:

$$A = \langle O, F, T \rangle. \quad (1)$$

Процесс эксплуатации такой ИС будет сопровождаться сменой состояний во времени в результате реализации отношений между ее подсистемами и внешней средой. При этом у ИС могут появляться свойства, которыми не обладают ее подсистемы. Для дальнейшего анализа следует отождествить приведенные системы с множествами состояний систем. Учитывая, что таких состояний достаточно много (в зависимости от мощности m_1, m_2, m_3 приведенных подмножеств *O, F, T*), может быть применена нечеткая кластеризация этих состояний по параметрам воздействия на предметную область. Очевидно, что не все состояния (или соответствующие кластеры) входят в подмножество разрешенных состояний, для которых возможно путем цепочки управляющих воздействий восстановить устойчивое состояние системы. Причем определение состояний, предшествующих попаданию ИС в одно из критических состояний, возможно за счет превентивной аналитики, прогнозирования или их моделирования. Речь идет об исследовании цепочек разрешенных состояний системы, приводящих к критическим состояниям, вызывающим нарушение устойчивости ИС, в том числе к состояниям, которые могут характеризоваться как новые функции и свойства ИС. Можно говорить о поведении ИС. Таким образом, множество *A* будет состоять из подмножеств *B* – разрешенных состояний и *C* – критичных состояний.

Задача перевода части состояний множества *C* в множество *B* весьма актуальна. Это множество можно классифицировать на подмножество простых отображений (алгоритмизируемых, например, методами линейного программирования или системами конверторов) и сложных, не поддающихся алгоритмизации. Большой интерес вызывают состояния системы (множество *C*), отображения которых в *B* можно реализовать экспертными системами, в том числе с использованием систем искусственного интеллекта, машинного обучения и нейронных сетей. При этом могут быть выстроены цепочки отображений, приводящие к разрешенному состоянию, включенному в *B*, и выявлены потенциально возможные ситуации или цепочки состояний, приводящие к исключительным состояниям, не имеющим решения в *B*. Следовательно, каждая из приведенных на рисунке 1 подсистем характеризуется множеством состояний, которые могут быть взяты за измерения – независимые векторы. Дальнейшая декомпозиция таких подсистем приводит к некоторому многомерному пространству, а независимые векторы могут быть взяты в качестве базиса рассматриваемого многомерного пространства. Таким образом, общая математическая модель ИС (рис. 1) представима множеством пространств – *I*, с введенными в них измерениями согласно нормативной базе каждой подсистемы. Итак, любая точка $(d_1, \ldots, d_n)$, $d_n \in D_i$, $i \in I$, вместе с мерой $(m_1, \ldots, m_k)$, $m_k \in M_i$, $i \in I$, определяют схему каждого многомерного пространства $R_i = \langle D_i, M_i \rangle$, $i \in I$. Также очевидно, что для любой точки $A \in D_i$ существует отношение (проекция) $r[A]$ и любая точка этой проекции будет одновременно значением измерения $\forall\ a \in r[A]$: $a \in ALL$. Тогда формула $Space(r)_i = \{\otimes_{A \in Di}(r[A] \cup ALL)\}$, $i \in I$, может быть взята за математическую модель многомерного пространства.

На основе приведенной совокупности измерений напрашивается вывод о возможности рассмотрения результатов управления по многомерному пространству через последовательный анализ по каждому подпространству. Полученные независимые результаты могут быть агрегированы по любым измерениям на основе ранее указанных. Далее открывается возможность установления новых отношений между уже имеющимися данными и агрегированными, что будет образовывать цепочки состояний ИС и в итоге приведет к многомерной модели, которая учитывает добавленные измерения. Приходим к многомерным информационным объектам – геоинформационным системам.

Рассмотрим применение искусственной нейронной сети второго поколения, основанной на MLP, для заблаговременного прогнозирования на примере подъема уровней воды на стационарных гидрологических постах с це-

лью недопущения перехода системы A в исключительное состояние.

Модели и методы

Одним из основных факторов, влияющих на состояние ИС управления территориями, является паводок, выражающийся в подъеме значений уровней воды (h) на водных объектах. В качестве примера можно взять стационарные гидрологические посты Республики Башкортостан. Введем обозначения: h_{ji}^{k} – значение уровня воды, измеренное на k-м гидропосту на i-ю дату j-го года. Здесь $k = 1, \ldots, n$, где n – количество гидропостов, участвующих в расчетах; j – номер года; i – конкретная дата измерения. Отметим, что задача краткосрочного прогнозирования на 1 сутки была решена в [27], и на основе предложенной методики выполнено прогнозирование на 2–5 суток. Задача заблаговременного прогнозирования заключается в том, чтобы в конкретный текущий i-й день измерения вычислить значение уровня воды на $i + 2$ день, то есть h_{ji+2}^{k}, а также на $i + 3$ (h_{ji+3}^{k}), $i + 4$ (h_{ji+4}^{k}) и $i + 5$ (h_{ji+5}^{k}) $\forall\, k = 1, \ldots, n$.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать результаты предыдущих измерений уровней воды (массив больших ретроспективных данных) на всех стационарных гидрологических постах, находящихся на рассматриваемой территории, за все предыдущие годы. Предлагаемый метод заблаговременного прогнозирования основан на применении искусственной нейронной сети (рис. 2), реализованной с использованием свободно распространяемой библиотеки программ машинного обучения TensorFlow, настройки которой представлены далее. В данную нейронную сеть посредством API интегрирован измененный авторами статьи [28] метод обучения ИНС backpropagation (обратного распространения ошибки). Как показали результаты эксперимента, точность и время расчета прогноза доказывают целесообразность применения данного метода в рамках заблаговременного прогнозирования значений уровней воды на стационарных гидрологических постах. Таким образом, процесс прогнозирования предлагается проводить в три этапа (рис. 3): предобработка данных, формирование прогнозной модели и постобработка данных. Частично данный метод применялся в рамках обнаружения и нейтрализации киберугроз [29].

На первом этапе, выполняющемся, как правило, до развития паводковой ситуации, осуществляется выбор параметров ИНС: общее количество нейронов – 107; количество нейронов во входном ($\overrightarrow{h_{jiK}^{k}}$) – 6 и выходном ($\overrightarrow{h_{jiL}^{k}}$) – 5 слоях, количество промежуточных слоев – 3 и нейронов в них (H_{jk}^{k}) – 96. Функция актива-

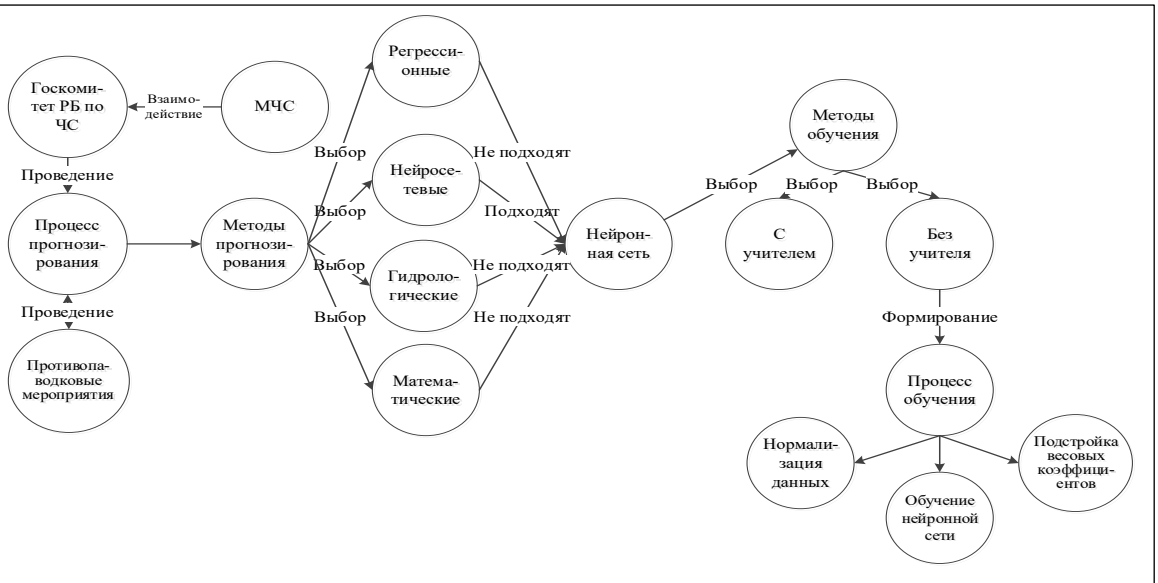


Рис. 2. Функциональные характеристики простейшего потока событий при прогнозировании паводковой ситуации

Fig. 2. Functional characteristics of the simplest flow of events when forecasting a flood situation

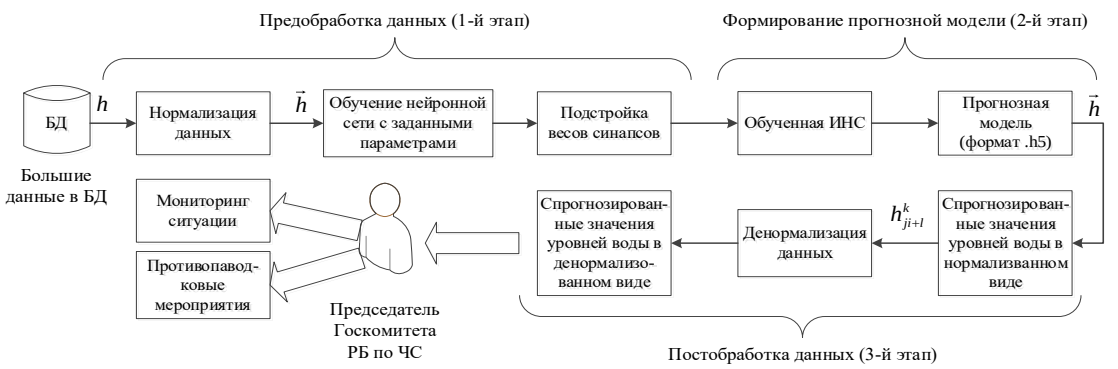


Рис. 3. Схема применения нейронной сети для прогнозирования значений уровней воды

Fig. 3. A scheme of using a neural network to predict water level values

ции на промежуточных слоях является сигмоидальной, при этом на выходном слое используется линейная функция активации по причине ее взвешенной суммы на каждом нейроне выходного слоя [29]. Количество данных по выборкам: обучающая – 60 %, валидационная – 20 % и проверочная – 20 %, количество эпох – 200; скорость обучения α – 0.90, подобранная экспериментальным путем с дальнейшим обучением искусственной нейронной сети. Стоит отметить, что при применении метода обратного распространения ошибки необходимо нормализовать входные значения уровней воды H для предотвращения исчезающих и взрывающихся градиентов:

$$\overrightarrow{h_{ji}^{k}} = \frac{\overrightarrow{h_{ji}^{k}} - \overrightarrow{h_{\min}}}{\overrightarrow{h_{\max}} - \overrightarrow{h_{\min}}}, \quad (2)$$

где $\overrightarrow{h_{\max}}$ и $\overrightarrow{h_{\min}}$ – минимальное и максимальное значения уровней воды по всем данным, подаваемым на входной слой нейронной сети для всех $\overrightarrow{h_{ji}^{k}}$, где $k = 1, \ldots, n$.

Для обучения нейронной сети (рис. 4) используется измененный авторами статьи метод обратного распространения ошибки. Изменение заключается в применении задаваемого экспериментальным путем параметра α – скорости обучения нейронной сети.

Вычисление квадратичной ошибки. Как правило, входы сети рассматриваются как входной вектор $\overrightarrow{h_{ji}^{k}}$, где $\overrightarrow{h_{ji}^{k}} = [\overrightarrow{h_{ji1}^{k}}, \overrightarrow{h_{ji2}^{k}}, ..., \overrightarrow{h_{jiK}^{k}}]$, а выходы сети можно представить в качестве вектора выхода $\overrightarrow{h_{ji}^{k}}$, где $\overrightarrow{h_{ji}^{k}} = [\overrightarrow{h_{ji1}^{k}}, \overrightarrow{h_{ji2}^{k}}, ..., \overrightarrow{h_{jiL}^{k}}]$, при этом $K = 1, \ldots, M$, а $L = 1, \ldots, N$, в которых M и N – количество значений входного и выходного векторов. Соответственно, обучающая выборка представляет собой множество пар R входных векторов $\overrightarrow{h_{jiK}^{k}}$ и желаемых (эталонных) выходных векторов $\overrightarrow{h_{jiL}^{k}}$:

$$R = \{(\overrightarrow{h_{ji1}^{k}}, \overrightarrow{h_{ji1}^{k}}), (\overrightarrow{h_{ji2}^{k}}, \overrightarrow{h_{ji2}^{k}}), ..., (\overrightarrow{h_{jiK}^{k}}, \overrightarrow{h_{jiL}^{k}})\}. \quad (3)$$

При каждом применении $\overrightarrow{h_{jiK}^{k}}$ от R к нейронной сети будет произведен расчет фактического выхода $\overrightarrow{h_{jiL}^{k}}$ выходного слоя:

$$\overrightarrow{h_{jiL}^{k}} = f(\sigma_L), \quad (4)$$

где σ – функция активации, определяемая по соотношению

$$\sigma(\overrightarrow{h_{jiK}^{k}}) = \frac{1}{1 + e^{-\overrightarrow{h_{jiK}^{k}}}} \quad (5)$$

и являющаяся взвешенной суммой выходов нейрона j в каждом промежуточном слое H_j:

$$\sigma_L = \sum_{j'=1}^{j} w_{j'k}^{j} H_{j'k}^{j}, \quad (6)$$

где w – вес синапса; k – k-й нейрон в промежуточном слое.

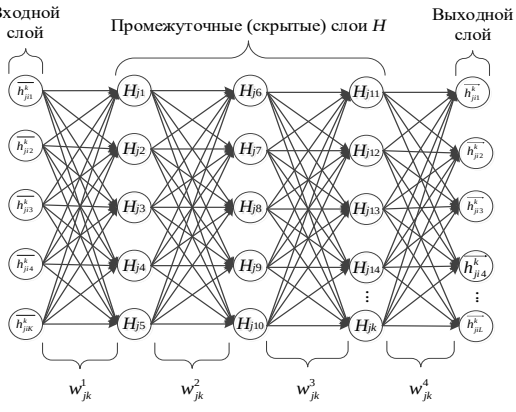


Рис. 4. Структура нейронной сети

Fig. 4. The neural network structure

Исходя из этого, можно определить квадратичную ошибку для каждой пары векторов множества R путем суммирования квадратичных ошибок в каждом выходном нейроне:

$$E_l = \frac{1}{2}\sum_{k'=1}^{L}(\overrightarrow{h^k_{jiK_{k'}}} - \overrightarrow{h^k_{jiL_{k'}}})^2. \quad (7)$$

Как следствие, вычислим полную квадратичную ошибку E путем суммирования всех пар входов и выходов в обучающей выборке:

$$E = \frac{1}{2}\sum_{l'=1}^{K}\sum_{k'=1}^{L}(\overrightarrow{h^k_{jiK_{k'l'}}} - \overrightarrow{h^k_{jiL_{k'l'}}})^2 . \quad (8)$$

Таким образом, цель обучения состоит в минимизации E за счет нахождения соответствующего набора весов w^1_{xk} и w^l_{jk}, где l изменяется от 1 до 4.

Определение частных производных по весам синапсов. Исходя из соотношения (7), можно отметить, что

$$\frac{dE}{dw^l_{jk}} = \overrightarrow{h^k_{jiK}} - \overrightarrow{h^k_{jiL}}, \quad (9)$$

при этом, опираясь на (6), получаем

$$\frac{d\sigma_k}{dw^l_{jk}} = H_j . \quad (10)$$

Исходя из (9), определяем частную производную E по весу w_{jk} для выполнения градиентного спуска для весов синапсов между промежуточным и выходным слоями:

$$\frac{dE}{dw^l_{jk}} = ((\overrightarrow{h^k_{jiK}} - \overrightarrow{h^k_{jiL}})\overrightarrow{h^k_{jiL}})\times \times((\sigma(\overrightarrow{h^k_{jiK}}) - \overrightarrow{h^k_{jiL}})H_{jk}). \quad (11)$$

При этом, если рассматривать частный случай производной E между входным и промежуточными слоями, то отдельно стоит отметить, что в этом случае все выходы зависят от w_{xk}. Таким образом, частную производную будем находить следующим образом:

$$\frac{dE}{dw^1_{xk}} = \sum_{k'=1}^{L}((\overrightarrow{h^k_{jiK_{k'}}} - \overrightarrow{h^k_{jiLk'}})\overrightarrow{h^k_{jiLk'}})\times \times(((\sigma(\overrightarrow{h^k_{jiK}}) - \overrightarrow{h^k_{jiLk'}})(w^l_{jk'}H_{jk'}))((1-H_{jk'})\overrightarrow{h^k_{jiK}}). \quad (12)$$

Следовательно, уравнения (9) и (10) дают все необходимые величины $\frac{dE}{dw}$ для применения (11) и (12) в рамках градиентного спуска для всех весов нейронной сети.

Изменение весов синапсов. Каждый вес будет изменен на dw для уменьшения E:

$$w(t+1) = w(t) + \Delta w(t), \quad (13)$$

где $\Delta w(t) = -\left.\frac{dE}{dw}\right|_t$, $w(t)$ – вес синапса во время t, $w(t + 1)$ – измененный (обновленный) вес синапса. Для увеличения скорости обучения нейронной сети добавляется ранее обозначенный параметр α:

$$\Delta w(t) = -\left.\frac{dE}{dw}\right|_t + \alpha\Delta w(t-1). \quad (14)$$

На втором этапе осуществляется непосредственно формирование прогнозной модели, а на третьем – прогноз значений уровней воды. Так как ранее все значения были нормализованы ($\overrightarrow{h^k_{ji}} \in [0;1]$), то для их дальнейшего использования в рамках противопаводковых мероприятий необходимо произвести денормализацию $\overrightarrow{h^k_{ji+l}}$ по соотношению, обратному (2):

$$\overrightarrow{h^k_{ji}} = \overrightarrow{h^k_{ji}}\left(\overrightarrow{h_{\max}} - \overrightarrow{h_{\min}}\right) + \overrightarrow{h_{\min}} . \quad (15)$$

Анализ эффективности метода в рамках прогнозирования уровней подъема воды

Для проведения анализа использовались многолетние данные измерений уровней воды на гидрологических постах, предоставленные Башкирским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с 01.01.2000 г. по 02.05.2021 г. в следующем виде (БД, см. таблицу): код стационарного гидрологического поста/автоматической станции, дата, уровень воды на стационарном гидрологическом посту/автоматической станции, атмосферное давление, скорость ветра, толщина снежного покрова, количество осадков, время и температура воздуха.

В ходе эксперимента проведено множество итераций за весь период многолетних наблюдений (с 01.01.2000 по 06.05.2021) по расчету прогнозируемых значений уровней воды. Общий массив используемых в эксперименте данных составляет 1 025 815 значений, из которых 60 % (данные многолетних наблюдений в период с 01.01.2000 по 31.12.2013) подаются на обучающую выборку нейронной сети, 20 % (с 01.01.2014 по 31.12.2017) – на тестовую выборку и 20 % (с 01.01.2018 по 06.05.2021) – на проверочную, при этом глубина прогнозирования, на основе которой рассчитывается прогнозируемое значение, задается экспериментально в зависимости от стационарного гидрологического поста.

В качестве примера приведем результаты прогнозирования уровней воды, полученные на стационарном гидрологическом посту

Фрагмент исторических данных для прогнозирования

A historical data fragment for forecasting

ID	Object ID	Hydrological post code	Parameter code	Date Time	Water level	Description	Atmosphere pressure	Wind speed	Snow thickness	Precipitation	Time	Air temperature
0	11232	19123	1	2001-10-10 00:00:00	159	No anomalies	763	3	100	10	8:00	6
1	11233	19123	1	2001-10-11 00:00:00	201		762	5	110	25	8:00	3
2	11234	19123	1	2001-10-12 00:00:00	165		764	5	120	9	8:00	7
3	11235	19123	1	2001-10-20 00:00:00	141		754	4	115	12	8:00	4
4	11236	19123	1	2001-10-21 00:00:00	141		765	3	115	10	8:00	6
5	11237	19123	1	2001-10-22 00:00:00	143		763	4	125	5	8:00	3
6	11238	19123	1	2001-10-23 00:00:00	144		760	5	130	5	8:00	2

в г. Уфе (76289, река Белая) во время весеннего паводка 2021 г. в Республике Башкортостан. Первый этап заключался в сравнении реальных и прогнозных значений уровней воды на гидрологических постах в разные периоды прохождения паводка. Результаты приведены в таблице (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/14.jpg), где реальный уровень воды – это фактически измеренное значение на стационарном гидрологическом посту и автоматической станции, а прогнозируемый – значение уровня воды, полученное с использованием нейронной сети. Важно отметить, что по сравнению с другими методами (рис. 2) нейросетевое прогнозирование показало более качественный результат (выходные значения оказались точнее, нежели при расчетах прогнозных значений уровней воды другими методами) [28].

Ежедневно с момента начала наблюдения за развитием паводковой ситуации (в 2021 г. – это 07 апреля, прогноз производился на 1–5 дней, соответственно, датой начала уровня подъема воды во время весеннего паводка можно считать 12.04.2021, то есть i = 1) с помощью нейронной сети осуществлялся прогноз на следующие m дней (например 1–5) по одному гидропосту (то есть n = 1; такое значение n взято для сокращения времени эксперимента). На следующий день измерялось фактическое значение уровней воды $h^k_{j,i+m}$ на этих же постах. В процессе ежедневного прогнозирования до 01 мая (соответственно введем дополнительное обозначение l – количество дней паводка, то есть значение $l_{k,i+m}$ = 25) по каждому посту получено 25 прогнозов и фактических значений уровней воды по каждому из n постов, что дает возможность определить среднюю точность прогноза по каждому k-му посту:

$$E^k_{\text{ср}} = \frac{1}{l_{k,i+m}} \sum_{i=1}^{l_{k,i+m}} E \mid h^k_{ji} - h^k_{j,i+m} \mid . \qquad (16)$$

При этом ошибка E (в сантиметрах) на i-й день j-го года каждого k-го гидропоста рассчитывается по соотношению абсолютной разности:

$$E^k_{ji} = \mid h^k_{ji} - h^k_{j.i+m} \mid . \qquad (17)$$

Важное отличие предлагаемого метода прогнозирования уровней воды с использованием искусственной нейронной сети по сравнению с другими известными методами заключается в быстроте получения прогноза и его корректности (более точен) при заблаговременном прогнозировании (в данном случае – на 5 дней), результаты приведены на рисунке 5.

По данным таблицы (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/14.jpg) и рисунка 5 видно, что искусственная нейронная сеть дает достаточно точные результаты: средняя ошибка не превышает 55,52 см за весь паводковый период. Таким образом, реализованная искусственная нейронная сеть показала более точный и стабильный результат, что доказывает целесообразность применения предлагаемого решения в рамках прогнозирования и дальнейшего предотвращения особых/исключительных ситуаций на примере заблаговременного прогнозирования уровней воды в период паводковой ситуации.

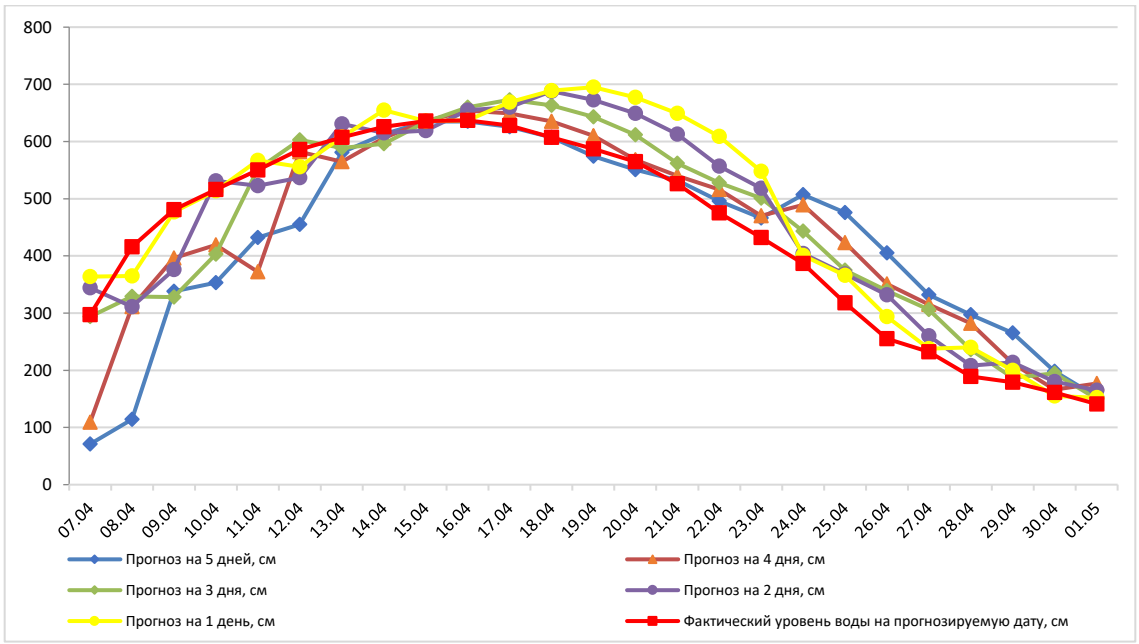


Рис. 5. Результат прогнозирования уровней воды на 5 суток на стационарном гидрологическом посту 76289 г. Уфы

Fig. 5. The result of forecasting water levels for 5 days at a stationary hydrological post 76289 in Ufa

Заключение

Предложенный анализ данных проведен на высоком уровне абстракции, полученные результаты апробированы на реальных физических объектах, что открывает возможность применения метода в широком спектре областей и задач, в том числе и при прогнозировании особых (включая критические) ситуаций с дальнейшим недопущением или минимизацией риска перевода системы в исключительное состояние.

Проведенный анализ эффективности прогнозирования на базе предлагаемой системы показал, что использование искусственной нейронной сети дает более стабильные результаты: средняя ошибка не превышает 55,52 см за весь паводковый период, средняя погрешность между реальными и рассчитанными значениями не более 2,10 %, в то время как при использовании существующих распространенных методов при прогнозировании значений уровней воды средняя ошибка между реальными и рассчитанными значениями достигает 8,36 %. Это дает специальным службам необходимое время (до 5 суток включительно) на осуществление противопаводковых мероприятий по подготовке к защите технических объектов.

Таким образом, рассчитанные заранее (за несколько дней) прогнозы уровней воды могут быть особенно полезны для предупреждения о паводковых ситуациях и принятия своевременных мер.

Исследование проводится при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках основной части государственного задания вузам № FEUE-2020-0007.

Литература

1. Supriya P., Krishnaveni M., Subbulaksmi M. Regression analysis of annual maximum daily rainfall and stream flow for flood forecasting in Vellar river basin. Aquatic Procedia, 2015, vol. 4, pp. 957–963. DOI: 10.1016/J.AQPRO.2015.02.120.

2. He Y., Yan Y., Wang X., Wang C. Uncertainty forecasting for streamflow based on support vector regression method with fuzzy information granulation. Energy Procedia, 2019, vol. 158, pp. 6189–6194. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.489.

3. Luo X., Yuan X., Zhu S., Xu Z., Meng L., Peng J. A hybrid support vector regression framework for streamflow forecast. J. of Hydrology, 2019, vol. 568, pp. 184–193. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2018.10.064.

4. Silvestro F., Rossi L., Campo L., Parodi A., Fiori E., Rudari R., Ferraris L. Impact-based flash-flood forecasting system: Sensitivity to high resolution numerical weather prediction systems and soil moisture. J. of Hydrology, 2019, vol. 572, pp. 388–402. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2019.02.055.

5. Hu R., Fang F., Salinas P., Pain C.C., Domingo N.D., Mark O. Numerical simulation of floods from multiple sources using an adaptive anisotropic unstructured mesh method. Advances in Water Resources, 2019, vol. 123, pp. 173–188. DOI: 10.1016/J.ADVWATRES.2018.11.011.

6. Phan T.T., Nguyen X.H. Combining statistical machine learning models with ARIMA for water level forecasting: The case of the Red river. Advanced in Water Resources, 2020, vol. 142, art. 103656. DOI: 10.1016/j.advwatres.2020.103656.

7. Liu T., Ramirez-Marquez J.E., Jagupilla S.C., Prigiobbe V. Combining a statistical model with machine learning to predict groundwater flooding (or infiltration) into sewer networks. J. of Hydrology, 2021, vol. 603, art. 126716. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126916.

8. Zhou T., Jiang Z., Liu X., Tan K. Research on the long-term and short-term forecasts of navigable river's water-level fluctuation based on the adaptive multilayer perceptron. J. of Hydrology, 2020, vol. 591, art. 125285.

9. Zakaria M.N., Malek M.A., Zolkepli M., Ahmed A.N. Application of artificial intelligence algorithms for hourly river level forecast: A case study of Muda River, Malaysia. Alexandria Engineering J., 2021, vol. 60, no. 4, pp. 4015–4028. DOI: 10.1016/J.AEJ.2021.02.046.

10. Ahmed A.N., Lam T.V., Hung N.D., Thieu N.V., Kisi O., Ahmed A.E. A comprehensive comparison of recent developed meta-heuristic algorithms for streamflow time series forecasting problem. Applied Soft Computing, 2021, vol. 105, art. 107282. DOI: 10.1016/J.ASOC.2021.107282.

11. Nguyen D.H., Bae D.H. Correcting mean areal precipitation forecasts to improve urban flooding predictions by using long short-term memory network. J. of Hydrology, 2020, vol. 584, art. 1247100. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124710.

12. Ding Y., Zhu Y., Feng J., Zhang P., Cheng Z. Interpretable spatio-temporal attention LSTM model for flood forecasting. Neurocomputing, 2020, vol. 403, pp. 348–359. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.04.110.

13. Kao I.F., Zhou Y., Chang L.C., Chang F.J. Exploring a long short-term memory based encoder-decoder framework for multi-step-ahead flood forecasting. J. of Hydrology, 2020, vol. 583, art. 124631. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124631.

14. Barzegar R., Aalami M.T., Adamowski J. Coupling a hybrid CNN-LSTM deep learning model with a boundary corrected maximal overlap discrete wavelet transform for multiscale lake water level forecasting. J. of Hydrology, 2021, vol. 598, art. 126196. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126196.

15. Kabir S., Patidar S., Xia X., Liang Q., Neal J., Pender G. A deep convolutional neural network model for rapid prediction of fluvial flood inundation. J. of Hydrology, 2020, vol. 590, art. 125481. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125481.

16. Khan M.M., Muhammad N.S., El-Shafie A. Wavelet based hybrid ANN-ARIMA models for meteorological drought forecasting. J. of Hydrology, 2020, vol. 590, art. 125380. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125380.

17. Lin A., Wu H., Liang G., Cardenas-Tristan A., Wu X., Zhao C., Li D. A big data-driven dynamic estimation model of relief supplies demand in urban flood disaster. Int. J. of Disaster Risk Reduction, 2020, vol. 49, art. 101682. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2020.101682.

18. Wagena M., Goering D., Collick A.S., Bock E., Fuka D.R., Buda A., Easton Z.M. Comparison of short-term streamflow forecasting using stochastic time series, neural networks, process-based, and Bayesian models. Environmental Modelling and Software, 2020, vol. 126, pp. 104669. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104669.

19. Adikari K.E., Shrestha S., Ratnayake D.T., Budhathoki A., Mohanasundaram S., Dailey M.N. Evaluation of artificial intelligence models for flood and drought forecasting in arid and tropical regions. Environmental Modelling and Software, 2021, vol. 144, art. 105136. DOI: 10.1016/J.ENVSOFT.2021.105136.

20. Zhou Y., Guo S., Chang F. Explore an evolutionary recurrent ANFIS for modelling multi-step-ahead flood forecasts. J. of Hydrology, 2019, vol. 570, pp. 343–355. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2018.12.040.

21. Arora A., Arabameri A., Pandey M., Siddiqui M.A., Shukla U.K. et al. Optimization of state-of-the-art fuzzy-metaheuristic ANFIS-based machine learning models for flood susceptibility prediction mapping in the Middle Ganga Plain, India. Science of The Total Environment, 2021, vol. 750, art. 141565. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141565.

22. Lee Y.H., Kim H.I., Han K.Y., Wong W.H. Flood evacuation routes based on spatiotemporal inundation risk assessment. Water, 2020, vol. 12, no. 8, art. 2271. DOI: 10.3390/w12082271.

23. Wunsch A., Liesch T., Broda S. Forecasting groundwater levels using nonlinear autoregressive networks with exogenous input (NARX). J. of Hydrology, 2018, vol. 567, pp. 743–758. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2018.01.045.

24. Banihabib M.E., Ahmadian A., Jamali F.S. Hybrid DARIMA-NARX model for forecasting long-term daily inflow to Dez reservoir using the North Atlantic Oscillation (NAO) and rainfall data. GeoResJ, 2017, vol. 13, pp. 9–16. DOI: 10.1016/J.GRJ.2016.12.002.

25. Hadid B., Duviella E., Lecoeuche S. Data-driven modeling for river flood forecasting based on a piecewise linear ARX system identification. J. of Process Control, 2020, vol. 86, pp. 44–56. DOI: 10.1016/j.jprocont.2019.12.007.

26. Bukhari A.H., Sulaiman M., Islam S., Shoaib M., Kumam P., Raja M.A. Neuro-fuzzy modeling and prediction of summer precipitation with application to different meteorological stations. Alexandria Engineering J., 2020, vol. 59, no. 1, pp. 101–116. DOI: 10.1016/j.aej.2019.12.011.

27. Palchevsky E.V., Khristodulo O.I., Pavlov S.V., Kalimgulov A. Intelligent data analysis for forecasting threats in complex distributed systems. CEUR Workshop Proceedings, 2020, vol. 2744, pp. 285–296. DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-3-79.

28. Palchevsky E.V., Khristodulo O.I., Pavlov S.V. Threat prediction in complex distributed systems using artificial neural network technology. Proc. Int. Conf. GraphiCon, 2020, p. 2, vol. 2763, art. 79.

29. Пальчевский Е.В., Христодуло О.И. Разработка импульсной нейронной сети с возможностью скоростного обучения для нейтрализации DDoS-атак // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32. № 4. С. 613–627. DOI: 10.15827/0236-235X.128.613-627.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.384-395

Received 18.02.22, Revised 11.05.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 384–395

Forecasting based on the second generation artificial neural network for decision support in especially significant situations

E.V. Palchevsky [1], *Lecturer, teelxp@inbox.ru*
V.V. Antonov [2], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, antonov.v@bashkortostan.ru*
R.R. Enikeev [2], *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, enikeevRR@mail.ru*

[1] *Financial University under the Government of the Russian Federation, Faculty of IT and ABD, Moscow, 109456, Russian Federation*
[2] *Ufa State Aviation Technical University, Faculty of IRT, Ufa, 450008, Russian Federation*

Abstract. Nowadays, specialized system models implemented on the basis of decision support in exceptional (emergency) situations (states) using machine learning, artificial intelligence (including using neural networks) to reproduce, predict and prevent (or minimize risk) consequences) in exceptional situations are useful and becoming increasingly popular. Floods also fall under such exceptional situations and states. Therefore, there arises the problem of early forecasting of an exceptional situation using the example of rising water levels at stationary hydrological posts in order to prevent (or minimize the risk) the transition of the system under consideration into an exceptional state (emergency situation).

To solve this problem, the authors propose a decision support system for early forecasting water rise levels. It is based on a neural network (intelligent) analysis of retrospective data (code of a stationary hydrological station / automatic station, date, water level at a stationary hydrological station / automatic station, atmospheric pressure, wind speed, snow cover thickness, amount of precipitation, time and air temperature) in order to calculate the values of water levels for 5 days in advance. The artificial neural network itself is based on the freely distributed TensorFlow machine learning software library; a modified backpropagation method is used as training. Its main difference is the addition of an artificial neural network (ANN) learning rate increase factor.

An analysis of the effectiveness of the proposed solution in the framework of forecasting the flood situation has shown high accuracy in calculating the forecast values of water levels: the difference between the real and predicted values is 2.10 %. This will allow specialized services to carry out specialized anti-flood measures in advance (5 days in advance).

Thus, information support during special situations is an absolute (not relative) indicator of data quality that allows developing and making decisions in the framework of predicting possible critical situations and preventing the transfer of the state of the territory management system to critical situations.

Keywords: forecasting; intellectual analysis; neural network analysis; retrospective data, data mining; forecasting water levels.

Acknowledgements. *The study has been financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the main part of the state assignment to universities no. FEUE-2020-0007.*

References

1. Supriya P., Krishnaveni M., Subbulaksmi M. Regression analysis of annual maximum daily rainfall and stream flow for flood forecasting in Vellar river basin. *Aquatic Procedia*, 2015, vol. 4, pp. 957–963. DOI: 10.1016/J.AQPRO.2015.02.120.
2. He Y., Yan Y., Wang X., Wang C. Uncertainty forecasting for streamflow based on support vector regression method with fuzzy information granulation. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 6189–6194. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.489.
3. Luo X., Yuan X., Zhu S., Xu Z., Meng L., Peng J. A hybrid support vector regression framework for streamflow forecast. *J. of Hydrology*, 2019, vol. 568, pp. 184–193. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2018.10.064.
4. Silvestro F., Rossi L., Campo L., Parodi A., Fiori E., Rudari R., Ferraris L. Impact-based flash-flood forecasting system: Sensitivity to high resolution numerical weather prediction systems and soil moisture. *J. of Hydrology*, 2019, vol. 572, pp. 388–402. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2019.02.055.
5. Hu R., Fang F., Salinas P., Pain C.C., Domingo N.D., Mark O. Numerical simulation of floods from multiple sources using an adaptive anisotropic unstructured mesh method. *Advances in Water Resources*, 2019, vol. 123, pp. 173–188. DOI: 10.1016/J.ADVWATRES.2018.11.011.
6. Phan T.T., Nguyen X.H. Combining statistical machine learning models with ARIMA for water level forecasting: The case of the Red river. *Advanced in Water Resources*, 2020, vol. 142, art. 103656. DOI: 10.1016/j.advwatres.2020.103656.
7. Liu T., Ramirez-Marquez J.E., Jagupilla S.C., Prigiobbe V. Combining a statistical model with machine learning to predict groundwater flooding (or infiltration) into sewer networks. *J. of Hydrology*, 2021, vol. 603, art. 126716. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126916.
8. Zhou T., Jiang Z., Liu X., Tan K. Research on the long-term and short-term forecasts of navigable river's water-level fluctuation based on the adaptive multilayer perceptron. *J. of Hydrology*, 2020, vol. 591, art. 125285.
9. Zakaria M.N., Malek M.A., Zolkepli M., Ahmed A.N. Application of artificial intelligence algorithms for hourly river level forecast: A case study of Muda River, Malaysia. *Alexandria Engineering J.*, 2021, vol. 60, no. 4, pp. 4015–4028. DOI: 10.1016/J.AEJ.2021.02.046.
10. Ahmed A.N., Lam T.V., Hung N.D., Thieu N.V., Kisi O., Ahmed A.E. A comprehensive comparison of recent developed meta-heuristic algorithms for streamflow time series forecasting problem. *Applied Soft Computing*, 2021, vol. 105, art. 107282. DOI: 10.1016/J.ASOC.2021.107282.
11. Nguyen D.H., Bae D.H. Correcting mean areal precipitation forecasts to improve urban flooding predictions by using long short-term memory network. *J. of Hydrology*, 2020, vol. 584, art. 1247100. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124710.
12. Ding Y., Zhu Y., Feng J., Zhang P., Cheng Z. Interpretable spatio-temporal attention LSTM model for flood forecasting. *Neurocomputing*, 2020, vol. 403, pp. 348–359. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.04.110.
13. Kao I.F., Zhou Y., Chang L.C., Chang F.J. Exploring a long short-term memory based encoder-decoder framework for multi-step-ahead flood forecasting. *J. of Hydrology*, 2020, vol. 583, art. 124631. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124631.
14. Barzegar R., Aalami M.T., Adamowski J. Coupling a hybrid CNN-LSTM deep learning model with a boundary corrected maximal overlap discrete wavelet transform for multiscale lake water level forecasting. *J. of Hydrology*, 2021, vol. 598, art. 126196. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2021.126196.
15. Kabir S., Patidar S., Xia X., Liang Q., Neal J., Pender G. A deep convolutional neural network model for rapid prediction of fluvial flood inundation. *J. of Hydrology*, 2020, vol. 590, art. 125481. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125481.
16. Khan M.M., Muhammad N.S., El-Shafie A. Wavelet based hybrid ANN-ARIMA models for meteorological drought forecasting. *J. of Hydrology*, 2020, vol. 590, art. 125380. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125380.
17. Lin A., Wu H., Liang G., Cardenas-Tristan A., Wu X., Zhao C., Li D. A big data-driven dynamic estimation model of relief supplies demand in urban flood disaster. *Int. J. of Disaster Risk Reduction*, 2020, vol. 49, art. 101682. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2020.101682.
18. Wagena M., Goering D., Collick A.S., Bock E., Fuka D.R., Buda A., Easton Z.M. Comparison of short-term streamflow forecasting using stochastic time series, neural networks, process-based, and Bayesian models. *Environmental Modelling and Software*, 2020, vol. 126, pp. 104669. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104669.

19. Adikari K.E., Shrestha S., Ratnayake D.T., Budhathoki A., Mohanasundaram S., Dailey M.N. Evaluation of artificial intelligence models for flood and drought forecasting in arid and tropical regions. *Environmental Modelling and Software*, 2021, vol. 144, art. 105136. DOI: 10.1016/J.ENVSOFT.2021.105136.

20. Zhou Y., Guo S., Chang F. Explore an evolutionary recurrent ANFIS for modelling multi-step-ahead flood forecasts. *J. of Hydrology*, 2019, vol. 570, pp. 343–355. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2018.12.040.

21. Arora A., Arabameri A., Pandey M., Siddiqui M.A., Shukla U.K. et al. Optimization of state-of-the-art fuzzy-metaheuristic ANFIS-based machine learning models for flood susceptibility prediction mapping in the Middle Ganga Plain, India. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 750, art. 141565. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141565.

22. Lee Y.H., Kim H.I., Han K.Y., Wong W.H. Flood evacuation routes based on spatiotemporal inundation risk assessment. *Water*, 2020, vol. 12, no. 8, art. 2271. DOI: 10.3390/w12082271.

23. Wunsch A., Liesch T., Broda S. Forecasting groundwater levels using nonlinear autoregressive networks with exogenous input (NARX). *J. of Hydrology*, 2018, vol. 567, pp. 743–758. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2018.01.045.

24. Banihabib M.E., Ahmadian A., Jamali F.S. Hybrid DARIMA-NARX model for forecasting long-term daily inflow to Dez reservoir using the North Atlantic Oscillation (NAO) and rainfall data. *GeoResJ*, 2017, vol. 13, pp. 9–16. DOI: 10.1016/J.GRJ.2016.12.002.

25. Hadid B., Duviella E., Lecoeuche S. Data-driven modeling for river flood forecasting based on a piecewise linear ARX system identification. *J. of Process Control*, 2020, vol. 86, pp. 44–56. DOI: 10.1016/j.jprocont.2019.12.007.

26. Bukhari A.H., Sulaiman M., Islam S., Shoaib M., Kumam P., Raja M.A. Neuro-fuzzy modeling and prediction of summer precipitation with application to different meteorological stations. *Alexandria Engineering J.*, 2020, vol. 59, no. 1, pp. 101–116. DOI: 10.1016/j.aej.2019.12.011.

27. Palchevsky E.V., Khristodulo O.I., Pavlov S.V., Kalimgulov A. Intelligent data analysis for forecasting threats in complex distributed systems. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol. 2744, pp. 285–296. DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-3-79.

28. Palchevsky E.V., Khristodulo O.I., Pavlov S.V. Threat prediction in complex distributed systems using artificial neural network technology. *Proc. Int. Conf. GraphiCon*, 2020, p. 2, vol. 2763, art. 79.

29. Palchevsky E.V., Khristodulo O.I. Development of a spiking neural network with the possibility of high-speed training to neutralize DDoS attacks. *Software & Systems*, 2019, vol. 32, no. 4, pp. 613–627. DOI: 10.15827/0236-235X.128.613-627 (in Russ.).

Для цитирования

Пальчевский Е.В., Антонов В.В., Еникеев Р.Р. Прогнозирование на основе искусственной нейронной сети второго поколения для поддержки принятия решений в особо значимых ситуациях // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 384–395. DOI: 10.15827/0236-235X.139.384-395.

For citation

Palchevsky E.V., Antonov V.V., Enikeev R.R. Forecasting based on the second generation artificial neural network for decision support in especially significant situations. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 384–395 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.384-395.

УДК 004.02 + 004.855.5
DOI: 10.15827/0236-235X.139.396-412
Дата подачи статьи: 28.02.22, после доработки: 06.06.22
2022. Т. 35. № 3. С. 396–412

Прогнозирование технологических тенденций на основе анализа разнородных данных

Нгуен Тхань Вьет [1,2], *аспирант, vietqn1987@gmail.com*
А.Г. Кравец [1,3], *д.т.н., профессор, agk@gde.ru*

[1] *Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, 400005, Россия*
[2] *Фам Ван Донг университет, г. Куанг Нгай, Вьетнам*
[3] *Государственный университет «Дубна», г. Дубна, 141980, Россия*

Для достижения конкурентоспособности предприятиям необходимо разработать стратегию развития путем прогноза новых и перспективных технологий при использовании ограниченных ресурсов. Многочисленные предыдущие исследования показали, что неожиданные изменения в направлениях НИОКР и патентования результатов интеллектуальной деятельности связаны с большими изменениями рыночной стоимости фирмы. Существует сильная корреляция между изменчивостью рыночных долей, цен на акции на ранних стадиях развития высокотехнологичного предприятия и тем периодом, когда инновационная технология еще не определена. По этой причине можно предположить: если цены акций предприятия сохранят восходящий тренд, то разработанные технологии, скорее всего, станут многообещающими инновациями в будущем.

В статье предложен метод прогнозирования технологических трендов путем анализа веб-новостей для выявления высокотехнологичных предприятий, прогнозирования тенденций изменения стоимости акций для выбранных предприятий и анализа кластеризации патентных заявок. В отличие от других исследований предлагаемый метод продвигает идею прогнозирования технологических трендов путем прогнозирования (восходящей/нисходящей) тенденции стоимости акций с использованием одномерных и многомерных подходов к подготовке данных и с помощью байесовской оптимизации для нахождения лучших гиперпараметров моделей машинного и глубокого обучения.

Исследование выполнено с помощью разработанной программной системы для анализа обнаружения взрыва частоты слов и прогнозирования цен акций. В частности, предлагаемый метод рассмотрен для прогнозирования динамики цен акций компаний Tesla и Samsung в качестве примера.

Ключевые слова*: интеллектуальный анализ данных, технологический прогноз, цена акций, Tesla, байесовская оптимизация, машинное обучение, глубокое обучение, патентный анализ, кластерный анализ, VOSviewer.*

Выявление как можно раньше будущих тенденций изменения новых технологий имеет решающее значение для стратегического планирования государственных и корпоративных исследований и разработок (НИОКР), чтобы получить преимущество первопроходца в конкурентной бизнес-среде. Многие руководители организаций осознают важность понимания будущих тенденций развития новых технологий для устойчивого развития [1].

С другой стороны, благодаря промышленным революциям технологии привели к быстрым изменениям в обществе, причем финансы вкладываются туда, где есть полезность, экономическая выгода. Технологии ускоряют производство, улучшают качество жизни, делают многие аспекты деятельности более эффективными. Одной из областей, в которых произошла революция благодаря технологическим достижениям, являются финансовые рынки. Есть немало примеров, как технологии изменили и сформировали текущее состояние финансовых рынков, а также будущее направление их развития.

Например, в качестве объектов исследования [2] были выбраны 73 зарегистрированные на бирже компании, опубликовавшие объявления о применении блокчейна. Метод анализа краткосрочных событий использован для количественного анализа влияния применения технологии блокчейна на рыночные показатели этих компаний. Результаты показали, что после объявления о применении блокчейна в собственном бизнесе исследуемые компании получили более высокий доход. Таким образом, рынок капитала имеет существенный положительный отклик на применение блокчейна. В то же время применение анализа событий позволяет количественно оценить влияние появления или применения новых технологий на цену

акций компании. Например, некоторые ученые [3] эмпирически проверяют влияние на доходность акций внедрения 3D-печати, облачных вычислений и политики интеллектуальной логистики.

Если цены на акции отражают прогноз будущих прибылей, то следует ожидать взаимосвязи инноваций, которые в случае успеха могут оказать положительное влияние на рост фирмы и цен на акции. На самом деле существует сильная корреляция между изменчивостью рыночных долей, цен на акции на ранних стадиях развития высокотехнологичного предприятия и тем периодом, когда инновационная технология еще не определена. Другими словами, изменчивость цен на акции отражает динамику риска и неопределенности, связанную с инновациями [4].

В ряде литературных источников подчеркивается связь уровня цен на акции с инновациями, а также рыночной стоимости с патентами. Это объясняется тем, что если патентная статистика отражает изменения технологических возможностей, то ее следует соотносить с текущими изменениями рыночной стоимости, поскольку рыночная стоимость определяется ожиданиями относительно будущего роста. Некоторые авторы исследовали взаимосвязь количества успешных патентных заявок фирм, показателя инвестиций фирмы в изобретательскую деятельность и показателя ее изобретательской продукции. Результат показал, что неожиданные изменения в патентах и НИОКР действительно связаны с большими изменениями рыночной стоимости фирмы.

В частности, в [5] исследована взаимосвязь патентной активности высокотехнологичных компаний и динамики движения цен их акций. Кроме того, продемонстрированы взаимосвязь доходности акций с поправкой на рынок и количества патентных заявок, а также разнообразие соответствующих категорий патентов. Применив метод скользящего окна, авторы создали приспособленные модели с использованием различных терминов запаздывания характеристик патентной активности. Результаты подтверждают значительное влияние патентной активности на движение акций и на их основные статистические характеристики изменчивости. Более того, в [6] заявлено, что обратные ссылки на патенты, патентные заявки и выданные патенты в некоторой степени воздействуют на объем торгов, так как каждый из этих параметров может играть роль переменной поглощающей способности по мере связи нового информационного потока с экономическими инновациями.

Точно так же эмпирические данные о цене акций показывают, что фирмы, успешно инвестирующие в радикальные инновации, получают более высокую доходность акций. В работе [7] представлена модель, выявившая взаимосвязь уровня инноваций фирмы и доходности акций, динамика которых отражает ожидания в отношении прибыльности и роста фирмы. Результаты показывают, что предположение о неприятии неопределенности имеет решающее значение для определения более высокой отдачи при наличии радикальных инноваций и конкретизация ожидаемой полезности устанавливает степень отдачи.

В работе [8] показано, что цена акций компании, использующей определенную технологию, будет меняться в зависимости от жизненного цикла технологии. В частности, автор отфильтровал компании, которые в основном занимаются дополненной реальностью и котируются на корейском рынке KOSDAQ. Затем сгруппировал эти компании на основе конкретных технологий дополненной реальности. Автор использовал метод исследования событий для расчета доходности акций по отношению к контрольному показателю. В результате на этапе «Пик завышенных ожиданий» портфели всех компаний, использующих дополненную реальность, в целом показали более высокую доходность, чем контрольный показатель.

В статье [9] исследуется связь между инновационной активностью крупнейших корпоративных инвесторов в НИОКР по всему миру и их рыночной оценкой. В анализе используется выборка из более чем 1250 зарегистрированных на бирже мультинациональных корпораций и их прав на интеллектуальную собственность – патенты и товарные знаки, зарегистрированные в период с 2005 по 2012 гг. Кроме того, исследование позволяет дифференцировать эффекты увеличения рыночной стоимости, получаемой от дополнительных прав на интеллектуальную собственность.

Исследования [10, 11] посвящены обзору степени разработанности анализа и прогнозирования технологических тенденций. К тому же в них утверждается, что веб-новости являются важным ресурсом данных для изучения общественной осведомленности о новых технологиях. Веб-новости, которые относятся к недавним изменениям, обновляются в реальном времени и размещают появляющиеся в Интернете обзоры, что делает их ценными для

изучения будущих тенденций развития технологий. Алгоритм обнаружения взрывов частоты слов и кластеризация обнаруженных терминов позволили выявить значимые предприятия и основные технологические тенденции, наблюдаемые с января 2016 г. по январь 2020 г.

Таким образом, на основании приведенных исследований авторы выдвинули следующую гипотезу: если предсказательная модель показывает восходящий тренд акций некоторых высокотехнологичных предприятий, наиболее вероятно, что разработанные ими технологии станут многообещающими инновациями в будущем. Целью является разработка метода прогнозирования технологических тенденций на основе анализа разнородных данных. Метод включает следующие шаги:

– интеллектуальный анализ веб-новостей для извлечения значимых предприятий;

– прогнозирование тенденций стоимости акций выбранных предприятий;

– патентный анализ предприятий с ценой акций в восходящем тренде.

Общая процедура метода показана на рисунке 1.

Обзор исследований по прогнозированию цен акций

Прогнозирование фондового рынка – классическая, но достаточно сложная задача, привлекающая внимание экономистов и специалистов по информатике. В частности, если цель состоит в том, чтобы предсказать конкретное значение цены, то определяем ее как задачу регрессии, а если предсказать направление движения цены – как задачу классификации. В большинстве исследований рассматривается ежедневный прогноз и лишь в некоторых внутридневной, например, 5-минутный или часовой. Для построения эффективной модели прогнозирования в течение нескольких последних десятилетий изучались инструменты как эконометрического моделирования, так и машинного обучения.

В последнее время модели глубокого обучения были представлены как новые рубежи для решения задач анализа и прогноза временных рядов с быстрым развитием [12, 13]. Благодаря высокой эффективности работы с большими данными и изучения нелинейной связи между

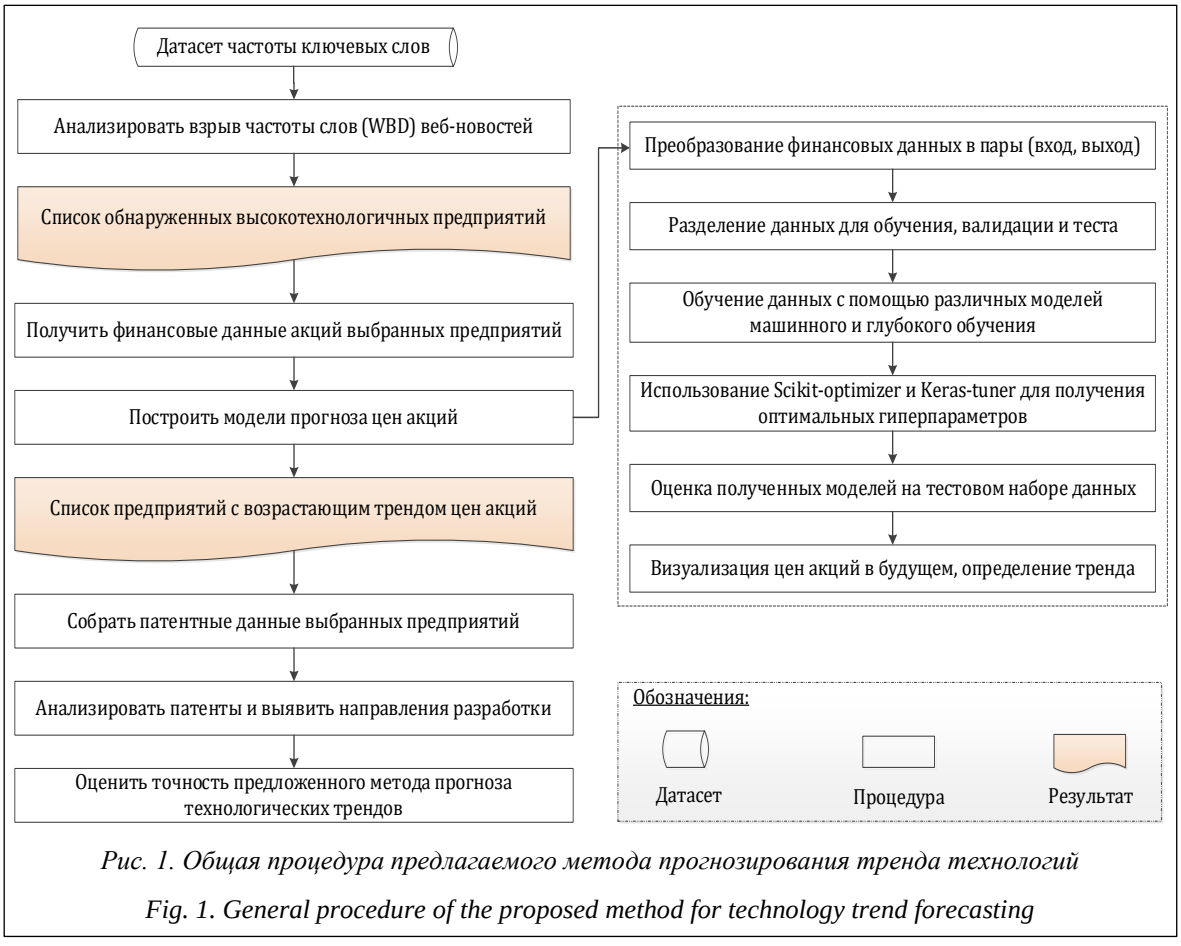


Рис. 1. Общая процедура предлагаемого метода прогнозирования тренда технологий

Fig. 1. General procedure of the proposed method for technology trend forecasting

входными и целевыми (выходными) переменными прогнозирования, модели глубокого обучения показали лучшую производительность, чем модели линейного и машинного обучения, в задачах прогнозирования фондового рынка [14, 15]. Производительность нейросети с архитектурой LSTM была выше, чем у традиционных моделей машинного обучения и моделей без временных рядов. В [16] описана модель глубоко ответственного инвестиционного портфеля (Deep Responsible Investment Portfolio) и сравнивается влияние архитектур LSTM, двунаправленной (Bi-LSTM) и GRU (Gated Recurrent Unit) на прогноз цен акций. Авторы обнаружили, что модель Bi-LSTM считывает данные на один шаг назад, в результате чего повышается точность прогнозов, особенно при прогнозировании последовательных данных, таких как финансовые временные ряды.

В исследованиях [17, 18] делается обзор работ по моделям глубокого обучения и современным методам для прогнозирования фондового рынка. Авторы не только анализируют современные методы, классифицируют различные источники данных, структуры нейронных сетей и часто используемые метрики оценки, но и оценивают их реализацию и воспроизводимость. При этом комбинация нескольких моделей обычно имеет лучшую производительность, чем одна модель, и гибридизация становится основным направлением в прогнозировании цен акций [14, 17, 19].

В [20] предложена система прогнозирования цен на акции, полученная путем объединения SVR и ансамблевой адаптивной нейро-нечеткой системы вывода ENANFIS. Экспериментальные результаты показали, что модель SVR-ENANFIS имеет более высокую производительность прогнозирования, чем ENANFIS, SVR-Linear, SVR-SVR и SVR-ANN (искусственные нейронные сети). В [21] описана разработаная финансовая экспертная система, которая включает исторические цены акций, восемь видов технических индикаторов, подсчеты и оценки настроений в опубликованных новостных статьях, тенденции в поиске Google и информацию из Википедии для прогнозирования краткосрочных цен на акции. Авторы [22] использовали 44 технических индикатора в своих моделях гибридных программных вычислений для предсказания цен акций на 1, 2, 3, 5, 7 и 10 дней вперед. В [23] описана разработанная обучающая архитектура LR2GBDT для прогнозирования и торговли фондовыми индексами, в качестве исходных переменных добавлены 12 технических индикаторов.

Таким образом, эконометрические модели и модели машинного обучения являются наиболее широко используемыми методами прогнозирования цен акций. Однако глубокое обучение – это быстро развивающаяся технология, которая может эффективно обрабатывать данные временных рядов, в том числе за несколько периодов.

Предлагаемый метод и эмпирические результаты прогнозирования цен акций

В ходе исследования была разработана программная система для анализа обнаружения взрыва частоты слов и прогнозирования временного ряда стоимости акций, информационно-функциональная схема которой представлена на рисунке 2.

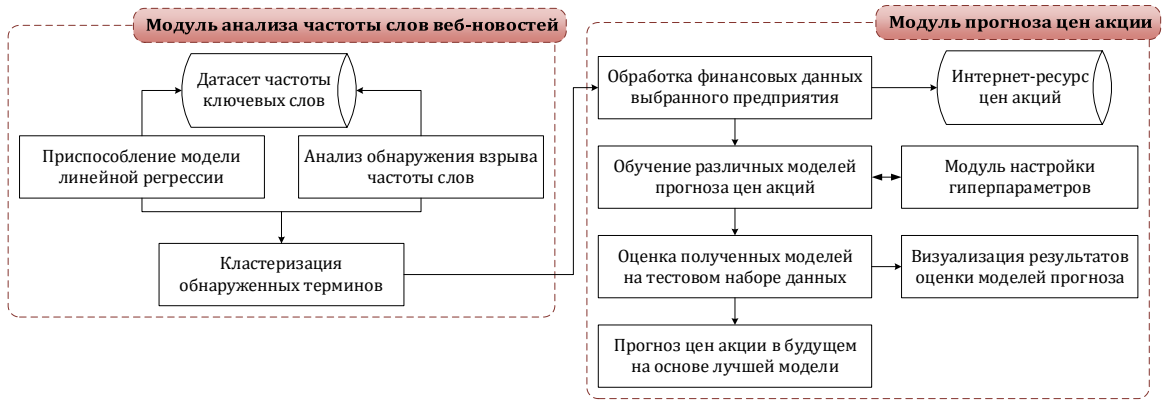


Рис. 2. Информационно-функциональная схема программной системы

Fig. 2. An information-functional diagram of the software system

Программная система состоит из двух модулей: анализа частоты и кластеризации слов и прогноза цен на акции.

Программный код написан на языке Python с поддержкой популярных библиотек машинного/глубокого обучения, таких как Scikit-learn, Keras, Pandas, Matplotlib, Seaborn, Numpy и др. Все эмпирические запуски проводились в интерактивной среде Google Colab. Более подробно модуль анализа частоты и кластеризации слов уже описан в статье [10]. В данной работе описываются функции модуля прогноза цен на акции.

В исследовании [10] показано, что веб-новости являются важным ресурсом данных для изучения общественной осведомленности о новых технологиях. Поэтому после применения алгоритма обнаружения взрыва частоты слов к данным веб-новостей и кластеризации обнаруженных ключевых слов были выявлены некоторые значимые предприятия и основные технологические тенденции, которые произошли с января 2016 г. по январь 2020 г. Среди терминов взрыва появились следующие технологические предприятия: Samsung, Huawei, Intel, Uber, Tesla, Apple и Facebook. В качестве примера рассмотрим применение предлагаемого метода для прогнозирования динамики цен акций компаний Tesla и Samsung.

Исходные данные. Доступные данные о ценах акции Tesla (код NASDAQ: TSLA) за период с января 2011 г. по декабрь 2021 г. загружены с Yahoo Finance (https://finance.yahoo.com/quote/TSLA?p=TSLA) для дальнейшего построения модели прогнозирования. Конечной целью данного раздела является прогнозирование тренда цен акции (восходящего или нисходящего) Tesla в 2022 г. с использованием многочисленных моделей машинного обучения и глубокого обучения. Исходные данные включают в себя все торговые действия, которые происходят на фондовом рынке, то есть цены открытия/цены закрытия/скорректированные цены закрытия/максимальные/минимальные цены и объем торгов. Загруженные данные о цене акции Tesla представлены в таблице 1.

Предобработка данных. Временное окно горизонта прогнозирования используется для обозначения временного отрезка в будущем, которое будет предсказано моделью. Большинство предыдущих исследований сосредоточено на краткосрочном горизонте прогнозирования, например, на один день или пять минут, за некоторыми исключениями для более длительного горизонта, такого как пять или десять дней.

Существуют два подхода к подготовке данных для прогнозирования цены акций: одномерные и многомерные входные данные. В данном исследовании для одномерных входных данных авторы установили временное окно горизонта равным 1 и временной лаг равным 10, как в работе [24]. Это означает, что на основе данных скорректированной цены закрытия за предыдущие 10 дней модель должна предсказать скорректированную цену закрытия на 11-й день. При одномерном подходе к подготовке данных используется только столбец «Скорректированная цена закрытия», а все остальные столбцы (цены открытия/закрытия/максимум/ минимум, объем торгов) исклю-

Таблица 1

Исходные данные о ценах (в долларах США) акции Tesla с 2011 по 2021 гг.

Table 1

Original data of Tesla stock price (USD) from 2011 to 2021

№	Дата	Цена открытия	Максимальная цена	Минимальная цена	Цена закрытия	Скорректированная цена закрытия	Объем торгов
1	03/01/2011	5.368	5.4	5.18	5.324	5.324	6415000
2	04/01/2011	5.332	5.39	5.204	5.334	5.334	5937000
3	05/01/2011	5.296	5.38	5.238	5.366	5.366	7233500
4	06/01/2011	5.366	5.6	5.362	5.576	5.576	10306000
5	07/01/2011	5.6	5.716	5.58	5.648	5.648	11239500
…	…	…	…	…	…	…	…
2765	27/12/2021	1073.67	1117	1070.72	1093.94	1093.94	23715300
2766	28/12/2021	1109.49	1119	1078.42	1088.47	1088.47	20108000
2767	29/12/2021	1098.64	1104	1064.14	1086.19	1086.19	18718000
2768	30/12/2021	1061.33	1095.55	1053.15	1070.34	1070.34	15680300
2769	31/12/2021	1073.44	1082	1054.59	1056.78	1056.78	13577900

чаются. Этот столбец используется в качестве как входных переменных (то есть исторических цен в ретроспективном окне), так и целевых (выходных) переменных прогноза (то есть скорректированной цены закрытия следующего дня).

В то же время для подхода многомерных данных устанавливаем временное окно горизонта равным 250, так как это среднее количество рабочих дней в году (фондовый рынок закрыт в выходные и праздничные дни). Для этого входными являются финансовые данные в течение дня: цены открытия/скорректированные закрытия/максимум/минимум, объем торгов, модель должна предсказать скорректированную цену закрытия на следующий, 250-й день. Разница между двумя подходами к подготовке данных показана на рисунке 3.

Следует отметить, что полученный датасет разделяется на обучающий набор данных с 80 % наблюдений, которые можно использовать для обучения модели (обучающий набор также содержит 20 % данных для валидации), и оставшиеся 20 % – для тестирования модели.

При наличии входных данных с разным масштабом нормализация данных используется, чтобы гарантировать эффективную работу моделей машинного/глубокого обучения, а также повысить скорость и производительность обучения моделей. Таким образом, в работе нормализация данных относится к процессу изменения масштаба входных данных, чтобы все значения находились в диапазоне от 0 до 1.

Модели машинного/глубокого обучения для прогнозирования цен акции. Данные модели обычно включают два типа не предназначенных для обучения параметров, включая переменные проектирования модели и гиперпараметры. Переменные проектирования модели включают тип оптимизатора, функцию потерь, функцию активации и прочие. Гиперпараметр – это параметр, значение которого используется для управления процессом обучения. Например, он может включать количество слоев, количество нейронов, размер ядра, процент исключения, скорость обучения и т.д. Таким образом, для выбора эффективных гиперпараметров моделей используется байесовская оптимизация с помощью библиотек Scikit-optimize (https://scikit-optimize.github.io/stable) и Keras-tuner (https://keras.io/keras_tuner). Целью байесовской оптимизации [25] являются поиск и настройка гиперпараметров данной модели для эффективной работы с валидационным набором данных. Считается, что этот метод оптимизации превосходит такие методы, как случайный поиск или поиск по сетке. Чтобы использовать байесовскую оптимизацию, необходим эффективный метод модели-

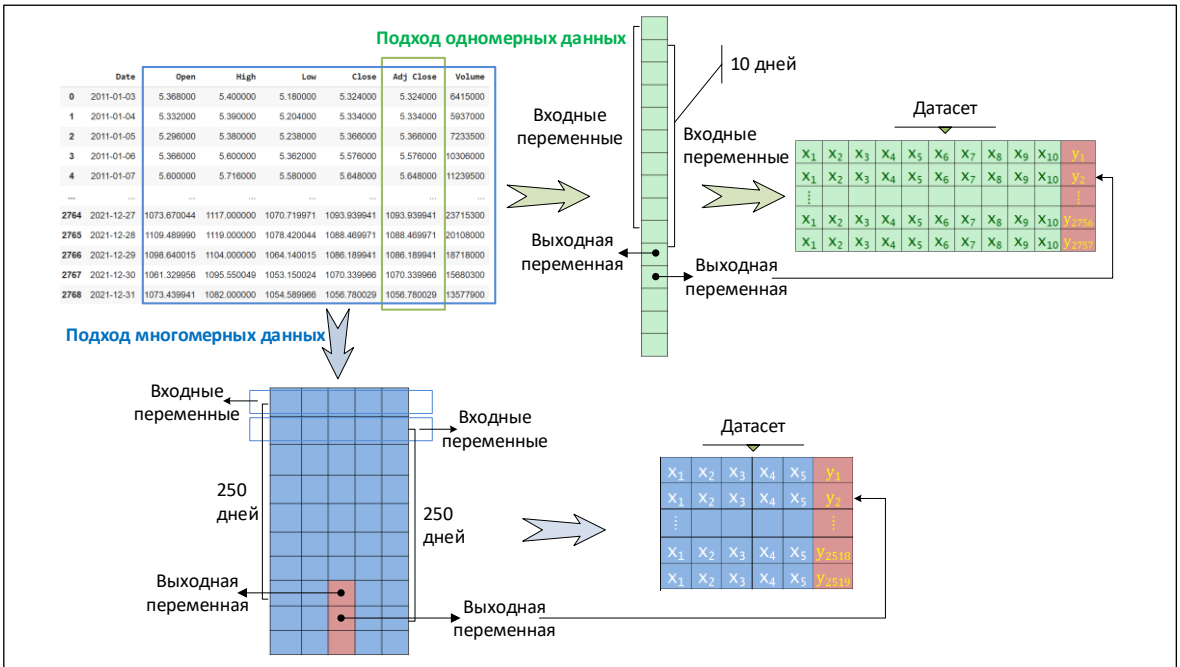


Рис. 3. Походы подготовки одномерных и многомерных данных

Fig. 3. Approaches for preparing one-dimensional and multidimensional data

рования распределения целевой функции. Подход использует гауссовские процессы для создания вероятностной модели целевой функции. В процессе выборки выявляются более многообещающие гиперпараметры для оценки реальной целевой функции, а предварительные знания используются для аппроксимации апостериорного распределения неизвестной целевой функции для корректировки гиперпараметров. Этот метод может определить лучшие настройки гиперпараметров, чем случайный поиск или поиск по сетке, за меньшее количество итераций.

В данной статье исследованы популярные модели машинного обучения для регрессии, например XGB, GBR, SVR и KNN. Кроме того, довольно хорошие результаты оценки обеспечивают и перечисленные далее модели.

1. *Линейная регрессия с регуляризацией Elastic Net.* Линейная регрессия – это классическая линейная модель, которая пытается согласовать взаимосвязь прогнозируемой цели и входных переменных с помощью линейной модели, в которой параметры могут быть обучены методом наименьших квадратов. При подборе моделей линейной или логистической регрессии Elastic Net (https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.ElasticNet.html) представляет собой регуляризованный регрессионный метод, который линейно комбинирует штрафы L1 и L2 методов Lasso и Ridge. Пространство поиска гиперпараметров модели следующее: alpha ∈ {0.01, 0.02, …, 0.99, 1}, l1_ratio – случайное действительное число в диапазоне [0, 1].

2. *Нейронная сеть прямого распространения FFNN.* Это простейший тип искусственной нейронной сети, в которой связи между узлами не образуют цикл. В этой сети информация движется только в одном прямом направлении от входных узлов, через скрытые узлы и к выходным узлам (https://keras.io/guides/sequential_model). Пространство поиска гиперпараметров следующее: количество слоев ∈ {1, 2, 3}, количество нейронов ∈ {50, 70, 90} для подхода одномерных данных и ∈ {200, 250, 300, 350, 400} для подхода многомерных данных, процент исключения ∈ {0.01, 0.1}.

3. *Сверточная нейронная сеть CNN. Сеть предназначена для обработки двумерных изображений.* Каждая группа нейронов, которую также называют фильтром, выполняет операцию свертки к разным областям входного изображения, нейроны имеют одинаковые веса, что уменьшает количество параметров по сравнению с полносвязной сетью FFNN. Операции объединения, например, максимальное объединение, используются для уменьшения исходного размера и могут применяться несколько раз, пока конечный выход не будет объединен в полносвязный слой. Для сведения операций свертки и объединения к одному временному измерению 1D CNN (https://keras.io/api/layers/convolution_layers/convolution1d) часто предлагается для классификации и прогнозирования временных рядов. Пространство поиска гиперпараметров 1D CNN следующее: количество фильтров ∈ {50, 100, 150, 200, 250} (одномерные данные) и ∈ {300, 350, …, 750, 800} (многомерные данные); размер ядра ∈ {2, 3, 4, 5} (одномерные данные) и ∈ {2, 3, 4} (многомерные данные); процент исключения ∈ {0.01, 0.1}.

4. *Рекуррентная нейронная сеть RNN.* По сравнению с нейронной сетью FFNN рекуррентная нейронная сеть представляет собой искусственную нейронную сеть, в которой соединения между узлами образуют цикл вдоль временной последовательности, что помогает демонстрировать временное динамическое поведение. Однако на практике обычным сетям RNN мешает проблема исчезающего или взрывного градиента, когда градиенты некоторых весов начинают уменьшаться или увеличиваться, если сеть развертывается слишком много раз. Сети с долгой краткосрочной памятью LSTM (https://keras.io/api/layers/recurrent_layers/lstm) представляют собой RNN, которые решают проблему исчезающего и взрывного градиента, где скрытый слой заменяется повторяющимися вентилями, называемыми вентилями забывания. В отличие от традиционных RNN сеть LSTM хорошо приспособлена к обучению на задачах классификации, обработки и прогнозирования временных рядов в случаях, когда важные события разделены временными лагами с неопределенной продолжительностью и границами. Пространство поиска гиперпараметров LSTM следующее: для одномерных данных количество единиц в первом и втором слоях ∈ {40, 50, 60}, для многомерных данных число единиц ∈ {200, 250, …, 500}, процент исключения ∈ {0.01, 0.1}.

5. *Гибридная модель CNN-LSTM.* CNN имеет свойство, позволяющее извлекать наиболее очевидные характеристики, поэтому она широко используется в разработке признаков. LSTM имеет свойство расширяться в зависимости от временной последовательности и широко используется во временных рядах. По ха-

рактеристикам CNN и LSTM также тестируется гибридная модель CNN-LSTM для прогнозирования цен акции. Пространство поиска гиперпараметров гибридной модели представляет собой комбинацию пространств поиска в моделях CNN и LSTM.

Метрики оценки. В работе использованы *MAE*, *RMSE* и R^2 в качестве показателей для оценки эффективности моделей прогнозирования. *MAE* и *RMSE* – это меры близости, которые оценивают точность прогнозируемого значения по отношению к фактической цене акции. R^2 измеряет линейную корреляцию между двумя переменными и устраняет влияние размерности на различные проблемы регрессии. В основном необходимо найти модель, которая дает самые низкие значения *MAE*, *RMSE* и наиболее высокий R^2. Эти три показателя определяются следующими формулами:

$$MAE = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}| y_{true}^{(i)} - y_{predict}^{(i)} |,$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(y_{true}^{(i)} - y_{predict}^{(i)})^2},$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m}(y_{true}^{(i)} - y_{predict}^{(i)})^2}{\sum_{i=1}^{m}(y_{true}^{(i)} - \bar{y})^2},$$

где $y_{true}^{(i)}$ – истинное значение целевой переменной выборки (sample) i; $y_{predict}^{(i)}$ – прогнозируемое значение целевой переменной выборки i; $\bar{y}$ – среднее значение истинного значения целевой переменной для всех выборок; m – количество выборок.

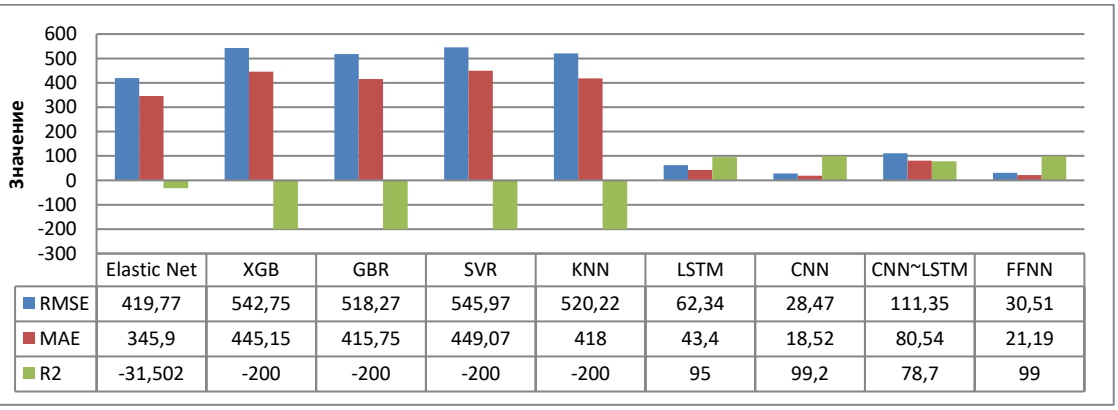
Далее рассмотрим результаты, полученные с помощью различных подходов к подготовке данных и моделей машинного/глубокого обучения.

Эмпирические результаты на тестовом наборе данных

Подход одномерных данных. С помощью такого подхода, основываясь на данных скорректированной цены закрытия за 10 предыдущих дней (в качестве примера используется временной лаг 10), исследуем модель, которая лучше всего предсказывает скорректированную цену закрытия на 11-й день. На рисунке 4 показаны оценки рассматриваемых моделей. Для большей наглядности все значения R^2, которые меньше –200, обозначаются как –200, кроме того, другие положительные значения R^2 также умножаются на 100.

Из рисунка 4 можно определить, что модели глубокого обучения, то есть FFNN, CNN, LSTM, CNN~LSTM, обеспечивают довольно хорошее качество прогноза (низкие *RMSE*, *MAE* и высокие R^2), как показано на рисунке 5а.

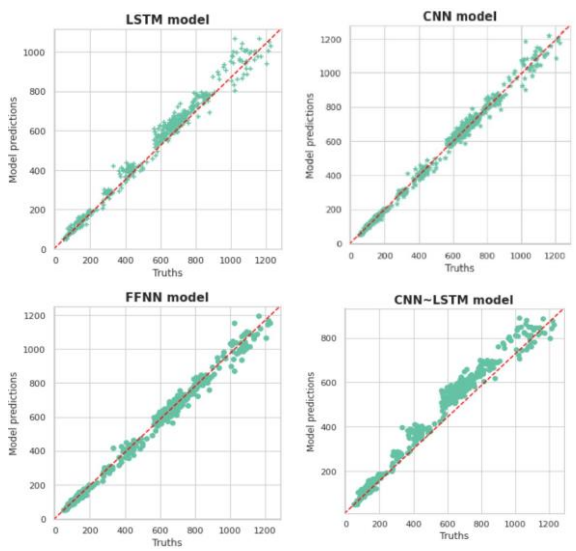
Основное назначение точечных диаграмм (рис. 5а) заключается в наблюдении и отображении взаимосвязей двух числовых переменных (то есть истинной и скорректированной прогнозируемой ценой акции). Точки на диаграмме отражают не только отдельные значения данных, но и закономерности, когда данные взяты в целом. Чем ближе точки расположены к диагональной (пунктирной) линии, тем точнее прогноз цен. Среди них модель CNN достигает лучших показателей, то есть *RMSE* = 28.47, *MAE* = 18.52, R^2 = 0.992. Настроенные гиперпараметры: количество фильтров = 250, размер ядра = 3, процент исключения = 0.01. Структура наилучшей модели CNN представлена на рисунке 5б.



	Elastic Net	XGB	GBR	SVR	KNN	LSTM	CNN	CNN~LSTM	FFNN
RMSE	419,77	542,75	518,27	545,97	520,22	62,34	28,47	111,35	30,51
MAE	345,9	445,15	415,75	449,07	418	43,4	18,52	80,54	21,19
R2	-31,502	-200	-200	-200	-200	95	99,2	78,7	99

Рис. 4. Оценки рассматриваемых моделей (одномерные данные)

Fig. 4. Estimates of the considered models (univariate data)



а)

InputLayer	Input:	[(None, 10, 1)]
	Output:	[(None, 10, 1)]
Conv1D	Input:	(None, 10, 1)
	Output:	(None, 8, 250)
MaxPooling1D	Input:	(None, 10, 1)
	Output:	(None, 4, 250)
Dropout	Input:	(None, 4, 250)
	Output:	(None, 4, 250)
Flatten	Input:	(None, 4, 250)
	Output:	(None, 1000)
Dense	Input:	(None, 1000)
	Output:	(None, 10)
Dense	Input:	(None, 10)
	Output:	(None, 1)

б)

Рис. 5. Оценка эффективности прогноза:
а) диаграмма рассеяния между значениями истинности и прогноза у лучших моделей,
б) структура наилучшей принятой модели CNN

Fig. 5. Prediction quality evaluation:
a) a scatterogram between truth and prediction values of best models,
б) the structure of the best accepted CNN model

Подход многомерных данных. При использовании этого подхода устанавливаем временное окно равным 250 (среднее количество рабочих дней в году), поэтому входными данными являются финансовые данные в течение одного дня (открытые/скорректированные цены закрытия/максимальные/минимальные цены, объем торгов). Необходимо выбрать модель, которая лучше всего предсказывает скорректированную цену закрытия в следующий, 250-й день. В таблице 2 показаны оценки рассматриваемых моделей и настройки их гиперпараметров.

Из таблицы 2 можно определить лучшую модель как LSTM (ее структура представлена на рисунке 6), которая обеспечивает наиболее оптимальные метрики оценки прогноза по отношению к другим моделям, то есть *RMSE* = 365.8, *MAE* = 304.4, R^2 = –0.1. В этом случае результат теста не так хорош, как при

Таблица 2

Оценки рассматриваемых моделей (многомерные данные)

Table 2

Estimates of the considered models (multivariate data)

№ п/п	Модель	RMSE	MAE	R^2	Лучшие гиперпараметры
1	LSTM	365.8	304.4	-0.107	units: 250, dropout: 0.1
2	CNN	443.3	388.4	-11.615	filters: 700, kernels: 3, dropout: 0.01
3	FFNN	443.6	387.9	-12.418	num_layers: 3, units_1: 400, dropout: 0.01, units_2: 400, units_3: 400
4	Elastic Net	485.5	423.6	-35.18	alpha=0.01, l1_ratio=0.86
5	SVR	521.2	451.4	-129.745	C=10.00, gamma=auto, degree=1, kernel=poly, epsilon=0.3
6	KNN	560.5	479	-8046.701	n_neighbors = 38
7	GBR	559.3	477.9	-9580.948	max_depth=1, learning_rate=0.33, min_samples_split=100, min_samples_leaf=1, n_estimators=100
8	XGB	568.7	488.2	-16495.61	max_depth=50, n_estimators=1, min_child_weight=1, learning_rate=0.84, gamma=3.82
9	CNN~LSTM	560	477.6	-25373.58	filters: 350, kernels: 2, units_1: 60, units_2: 60, dropout: 0.1

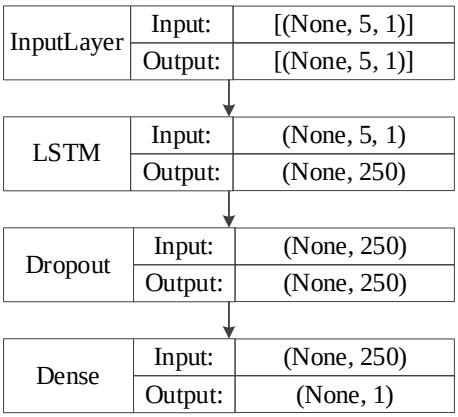


Рис. 6. Структура лучшей модели LSTM при использовании подхода многомерных входных данных

Fig. 6. The best LSTM model structure when using the multivariate input data approach

подходе одномерных данных, поскольку модель должна предсказать на 250 дней вперед с финансовыми данными на один день, в то время как с подходом одномерных данных модель должна прогнозировать только цену акций на следующий день, основываясь на значениях 10 предыдущих дней. Кроме того, если уменьшить временное окно, то можно получить лучшие меры оценки, например, когда временное окно горизонта равно 50, R^2 увеличится до 0.752, а *RMSE* = 187.87, *MAE* = 140.36. Однако, как уже упоминалось, конечной целью данного исследования является прогнозирование восходящего/нисходящего тренда цен на акции, а не точных значений стоимости на определенную дату. Таким образом, при использовании модели LTSM восходящий тренд предсказывается довольно точно, как показано на рисунке 7.

Прогноз цен акций Tesla на 2022 год. Выбраны лучшие модели при использовании подходов одномерных и многомерных данных. Соответственно, для подхода одномерных данных модель CNN получает последние 10 скорректированных цен закрытия в 2021 г. и прогнозирует цену на следующий день. Это полученное значение добавляется в конец входного вектора, который формирует входные данные для следующего прогноза. По этой логике данная итерация повторяется 250 раз. Для большего понимания алгоритм прогнозирования по одномерным данным показан на рисунке 8.

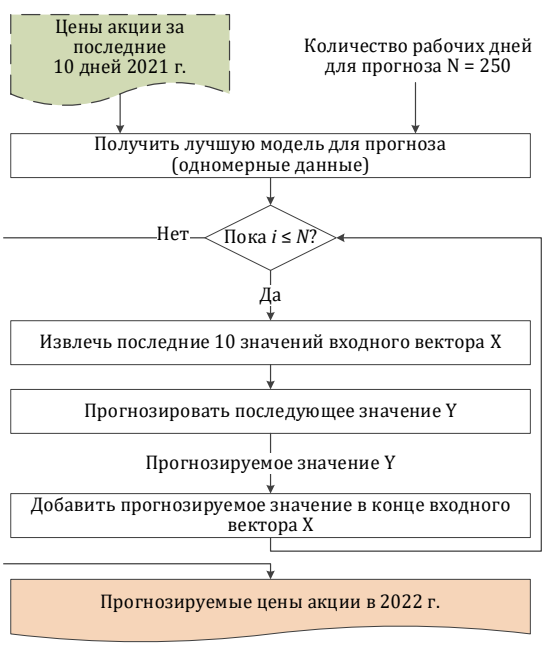


Рис. 8. Алгоритм последовательного прогноза по одномерным данным

Fig. 8. Sequential prediction algorithm based on one-dimensional data

В случае использования подхода многомерных данных лучшая модель LSTM получает последние 250 значений цен акции в наборе

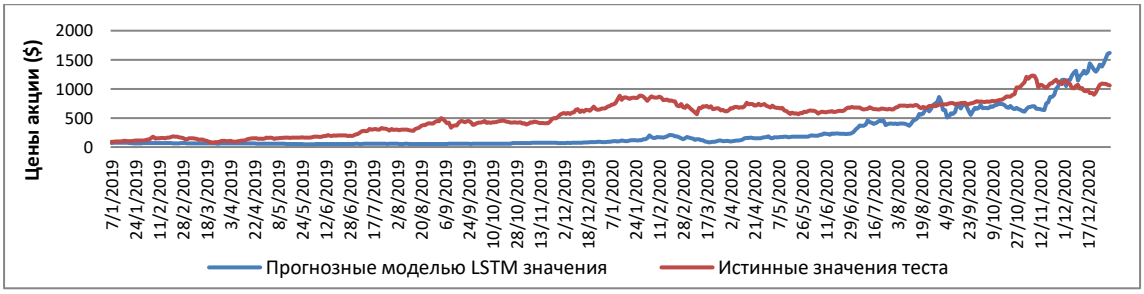


Рис. 7. Сравнение истинных и прогнозируемых значений по лучшей модели LSTM для тестового набора

Fig. 7. Comparing true and predicted values according to the best LSTM model for a test set

данных, каждая выборка в этом наборе обеспечивает прогнозируемое значение на следующий, 250-й день. Таким образом, при входных данных о ценах акции за 250 дней с 06/01/2021 по 31/12/2021 выходные прогнозные значения будут находиться в диапазоне данных с 03/01/2022 по 30/12/2022. Прогнозные значения, полученные из двух лучших моделей, приведены на рисунке 9.

Более того, для проверки трендов, созданных двумя лучшими моделями, авторы пытаются вычислить другие значения прогноза: комбинацию этих двух линий тренда, где каждое новое значение прогноза равно линейной комбинации значений от прогноза подходами одномерных и многомерных данных, с линейными коэффициентами –0.278 и 1.526. Эти числа извлечены после приспособления модели линейной регрессии к истинным ценам акции за первые 20 дней 2022 г. Формула прогнозируемых будущих значений (y_{future}), основанная на прогнозируемых значениях с помощью многомерного ($y_{multivariate}$) и одномерного ($y_{univariate}$) подходов, описана следующим образом: $y_{future} = –0.278\ y_{multivariate} + 1.526\ y_{univariate}$.

Расчетные значения прогноза y_{future} также представлены на рисунке 9в. Наблюдая за графиками, можно сделать вывод, что в целом цены акции Tesla сохранят восходящий тренд – высокие цены относительно 2021 г. – в 2022 г. Кроме того, для проверки точности метода прогноза авторами также приведена статистика о доходах компании Tesla. После сбора данных отчета о доходах за период 2009–2021 гг. (https://www.macrotrends.net/stocks/charts/TSLA/tesla/income-statement) имеем значения Доход, Валовая прибыль и Операционный доход (рис. 10). Доход может быть определен как сумма денег, которую компания получает от своих клиентов в обмен на товары или услуги. Валовая прибыль может быть определена как прибыль, которую компания получает после вычета переменных затрат, непосредственно связанных с производством и продажей ее продукции или предоставлением услуг. Операционный доход может быть определен как доход после вычета операционных расходов и до вычета процентных платежей и налогов. Следует отметить, что доход Tesla за квартал, закончившийся 31 марта 2022 г., составил 18.756 млрд

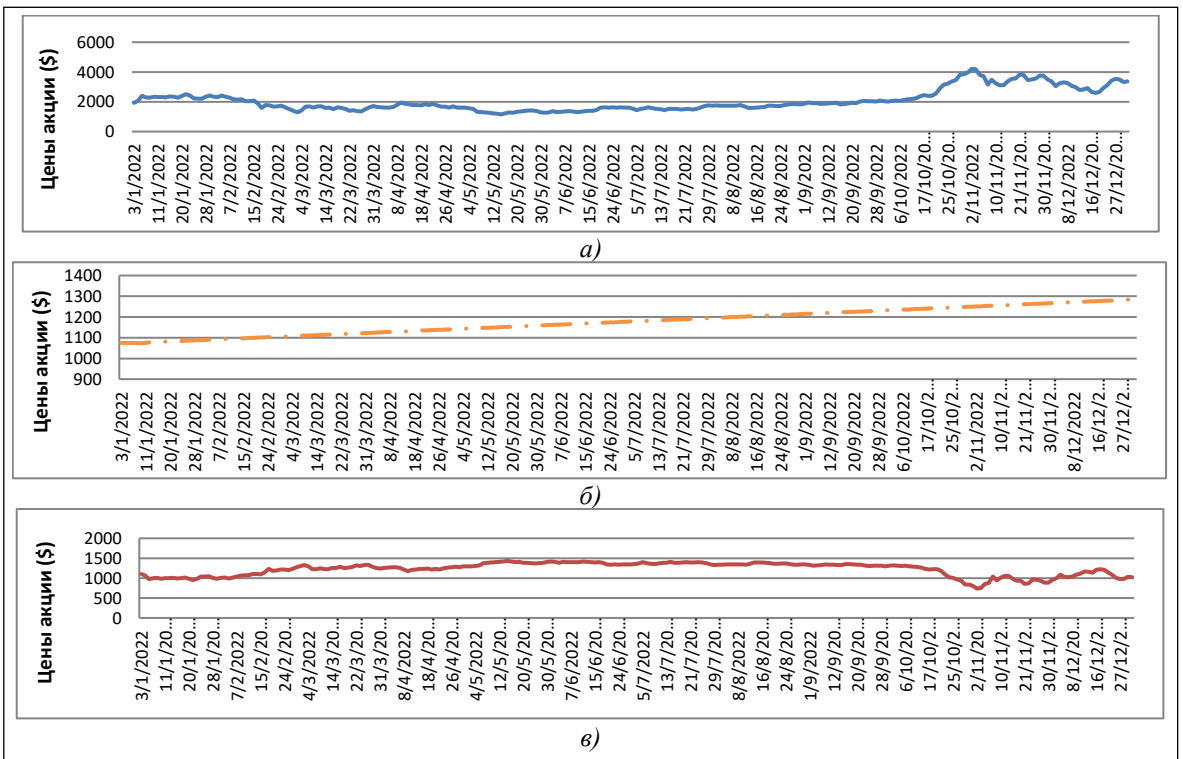


Рис. 9. Прогноз тренда цен акций Tesla на 2022 г.: а) прогноз при подходе многомерных данных, б) прогноз при подходе одномерных данных, в) комбинация прогнозируемых значений двух подходов

Fig. 9. The Tesla stock price trend forecast for 2022: a) a forecast using the multivariate data approach, б) a forecast using the univariate data approach, в) a combination of the predicted values of the two approaches

Рис. 10. Отчет о разных доходах компании Tesla за период 2009–2021 гг.

Fig. 10. Miscellaneous income report of Tesla in period 2009–2021

долларов, что на 80.54 % больше, чем в предыдущем году. Доход Tesla за 12 месяцев, закончившихся 31 марта 2022 г., составил 62.190 млрд долларов, что на 73.04 % больше, чем в предыдущем году. Годовой доход Tesla за 2021 г. составил 53.823 миллиарда долларов, что на 70.67 % больше, чем в 2020 г.

Патентный анализ Tesla для определения технологических тенденций в 2022 г.

Авторами уже были приведены аргументы того, что если цены акции предприятия останутся в восходящем тренде, то технологии, разработанные предприятием, наиболее вероятно, станут многообещающими инновациями в будущем. После наблюдения за прогнозными значениями, полученными из предложенных моделей, с высокой уверенностью можно предположить, что в целом цена акции Tesla сохранит восходящий тренд в 2022 г. По этой причине рассмотрим патентные заявки Tesla, которые были поданы с 2019 по 2021 гг., чтобы предсказать тенденции развития технологий в 2022 г. Метаданные патентных заявок Tesla загружаются с известной платформы The Lens (https://about.lens.org).

Запрос фильтра для получения патентных заявок Tesla: *earliestPriorityDate = (2019-01-01–2021-12-31), Grouped by Simple Families, Document Type = (excl Design_right), Owner Name Exact = (Tesla Inc, Tesla Motors Inc)*. Это означает, что самая ранняя дата приоритета (самая ранняя дата подачи в семействе патентных заявок) – с 01/01/2019 по 31/12/2021; патенты на право дизайна также были исключены. Запрос возвращает 20 патентных заявок; соответственно, можно синтезировать наиболее часто встречающиеся коды совместной патентной классификации (Cooperative Patent Classification – CPC) патентов Tesla, которые представлены на рисунке 11.

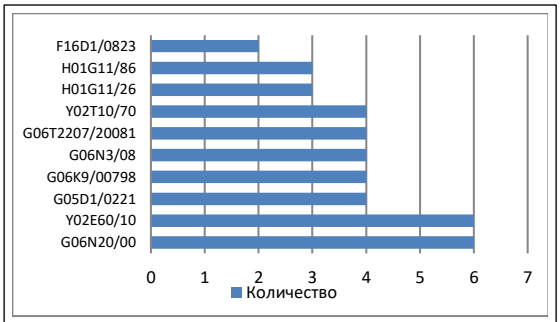


Рис. 11. Топ-10 кодов классификации CPC развивающихся технологий Tesla

Fig. 11. Top 10 CPC Classification Codes for technologies developed by Tesla

Среди них топ-5 классификационных кодов CPC.

G06N20/00: Машинное обучение.

Y02E60/10: Хранение энергии с помощью аккумуляторов.

G05D1/0221: Контроль положения, курса или высоты наземных, водных, воздушных или космических транспортных средств, например, автопилот (радионавигационные системы или аналогичные системы, использующие другие волны), включающий процесс обучения.

G06K9/00: Методы или устройства для распознавания шаблонов для чтения графика или преобразования шаблона механических параметров, например, силы или присутствия, в электрические сигналы; распознавание или понимание изображения или видео; распознавание речи.

G06N3/08: Вычислительные механизмы, основанные на биологических моделях (на основе физических объектов, управляемых смоделированным интеллектом, для воспроизведения разумных форм жизни, например, роботов, воспроизводящих домашних животных или людей по их внешнему виду или поведению).

С другой стороны, чтобы лучше понять технологии, разработанные Tesla, авторы сначала создали корпус текстов из разделов Заголовок, Аннотация и Основание 20 патентных заявок, а затем подали этот корпус в программу VOSviewer [26] для извлечения и кластеризации релевантных ключевых слов (параметры настройки: метод подсчета = Full counting, порог появления Occurrence threshold = 3).

На основании описания кодов классификации CPC и полученных с помощью VOSviewer

кластеров ключевых слов получено семь практических технологических отраслей, в которых Tesla ведет разработки. Рассматриваем эти отрасли как технологические тренды в 2022 г. Для проверки выдвинутой гипотезы и полученных семи трендов в разработках Tesla были изучены публикации на ведущих научно-технологических порталах. Эксперты предметных областей подтвердили эти тренды опубликованными статьями, которые относятся к соответствующим группам ключевых слов.

1. Автономное вождение: autonomous driving, autonomous vehicle applications; machine learning, deep learning system, time series elements, image data (https://www.gtlaw.com/en/insights/2022/1/published-articles/5-trends-to-watch-in-2022-autonomous-vehicles).

2. Литий-ионные аккумуляторы (LIB): elastic polymer binder, dry electrode film, electrode film fabrication, extracting lithium from clay minerals, lithium ion battery, energy storage system (device). LIB стали одним из основных решений для хранения энергии в современном обществе. Области применения и доля рынка LIB быстро увеличивались и продолжают демонстрировать устойчивую тенденцию к росту ([27] и https://www.startus-insights.com/innovators-guide/top-10-renewable-energy-trends-2022).

3. Электродвигатель, электромобиль: stator, electric motor, electric vehicle (https://www.electronicdesign.com/resources/industry-insights/article/21213883/intelligent-product-solutions-top-5-technology-trends-for-2022).

4. Переработанные материалы для автомобиля: environmentally-friendly (recycled) materials for vehicle (https://abcnews.go.com/Business/car-made-recycled-plastic-future/story?id=81634993, https://www.businessinsider.com/sc/10-technology-trends-for-2022-beyond-2022-1).

5. Пользовательские интерфейсы для управления автомобилем: user interfaces for vehicle operation (https://grapeup.com/blog/what-trends-will-set-the-course-of-change-in-the-automotive-industry-for-2022-year).

6. Упаковка ИС: packaged integrated circuits, IC packaging technologies (https://www.startus-insights.com/innovators-guide/electronics-manufacturing-trends).

7. Фотоэлектрическая структура: solar cells, photovoltaic structure, photovoltaic roof tile.

Шесть из семи выявленных технологических кластеров были подтверждены публикациями в экспертных сообществах, поэтому оценка точности прогноза может быть рассчитана как 6/7 (~85.7 %).

Аналогично были проведены эксперименты для анализа цены акций компании Samsung (код 005930.KS) за период 2000–2021 гг. После наблюдения за прогнозными значениями, полученными из предложенных моделей, с высокой уверенностью можно предположить, что в целом цены акций Samsung тоже сохранят восходящий тренд в 2022 г. По этой причине рассмотрены патентные заявки Samsung, которые были поданы с 2020 по 2021 гг., чтобы предсказать тенденции развития технологий в 2022 г. Запрос фильтра для получения патентных заявок Samsung из платформы The Lens: *earliestPriorityDate = (2020-01-01–2021-12-31), Grouped by Simple Families, Document Type = (excl Design_right), Owner Name Exact = (Samsung Electronics Co Ltd)*. Далее после применения кластеризации получены 16 практических технологических отраслей, в которых Samsung ведет разработки. Рассматриваем эти отрасли как технологические тренды в 2022–2023 гг. Аналогично для проверки выдвинутой гипотезы и полученных 16 трендов в разработках Samsung были изучены публикации на ведущих научно-технологических порталах. Эксперты предметных областей подтвердили эти тренды опубликованными статьями, которые относятся к соответствующим группам ключевых слов. Этими трендами являются: Полупроводниковая промышленность, интеграция хранения и вычислений, упаковка ИС (IC packaging); Беспроводная технология, сеть 5G; Автоматизация электронного проектирования; Автономное вождение; Технология Bio-Sensing-PPG (фотоплетизмография); Metaverse – отслеживание взгляда и 3D-сенсоры; Датчик расстояния; Технология нейроморфных вычислений; Литий-ионные батареи; Биометрическая промышленность; Металловоздушные аккумуляторы; Обработка естественного языка; Программное обеспечение для анализа временных рядов; Видеотрансляция; Технология водоочистки и очистки сточной воды; Плазменная технология. Первые 15 из 16 технологических кластеров были одобрены, следовательно, оценка точности прогноза (precision) может быть рассчитана как 15/16 (~93.8 %).

Заключение

Технологическое развитие оказывает существенное влияние на принятие стратегических решений. Заблаговременное осознание возможных предстоящих или возникающих технологических тенденций может привести к

укреплению конкурентоспособности и рыночных позиций предприятий. Однако, если компании, ориентированные на инновации, игнорируют появляющиеся технологические разработки, они могут не использовать весь потенциал своих собственных продуктов или технологий.

В работе была выдвинута новая гипотеза: если стоимость акции предприятия сохраняет восходящий тренд, то технологии, разработанные предприятием, скорее всего, станут перспективными инновациями в будущем. При этом предложен и программно реализован новый метод прогнозирования технологических трендов путем объединения следующих шагов: анализ веб-новостей для извлечения значимых предприятий, прогнозирование тенденций стоимости акций и анализ кластеризации патентных заявок. В отличие от других исследований предложенный метод продвигает идею прогнозирования технологических трендов путем прогнозирования тренда цен акций с использованием байесовской оптимизации для поиска лучших гиперпараметров моделей машинного и глубокого обучения. Кроме того, авторы объединили использование подходов к подготовке одномерных и многомерных данных для прогнозирования тренда цен акций. В частности, предлагаемый метод был рассмотрен для прогнозирования динамики цен акций компаний Tesla и Samsung в качестве примера. Для этого были исследованы различные популярные модели машинного и глубокого обучения. После наблюдения за прогнозными значениями, полученными из изложенных моделей, с высокой уверенностью можно предположить, что в целом цены акций Tesla и Samsung сохранят восходящий тренд в 2022 г. После сбора патентных заявок Tesla и Samsung метод кластеризации текстового корпуса был использован для изучения технологических отраслей, в которых Tesla и Samsung ведут разработки. Эти технологические тенденции недавно были подтверждены экспертами в соответствующих опубликованных статьях. В итоге точность полученного прогноза составляет около 85.7 % (для патентов Tesla) и 93.8 % (для патентов Samsung). Таким образом, это свидетельствует о положительной надежности предложенного метода.

Дальнейшая работа будет направлена на повышение точности метрики оценки R^2 с целью улучшения моделей для прогноза стоимости акций при использовании подхода многомерных данных и учета конъюнктуры рынка таких данных, как новости, мировая экономика, общественные настроения и другая конфиденциальная финансовая информация. Кроме того, также планируется исследовать и разработать методы извлечения значимых ключевых слов из текстового корпуса.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90092.

Литература

1. Кравец А.Г., Сальникова Н.А. Предсказательное моделирование трендов технологического развития // Изв. СПбГТИ (ТУ). 2020. № 55. С. 103–108. DOI: 10.36807/1998-9849-2020-55-81-103-108.

2. Xu M. The Impact of blockchain technology on stock price: An emprical study. SHS Web of Conf., 2021, vol. 96, art. 04008. DOI: 10.1051/SHSCONF/20219604008.

3. Lam H.K.S., Ding L., Cheng T. et al. The impact of 3D printing implementation on stock returns. Int. J. of Operations and Production Management, 2019, vol. 39, no. 6/7/8, pp. 935–961. DOI: 10.1108/ijopm-01-2019-0075.

4. Ballestra L.V., Fontana S., Scuotto V., Solimene S. A multidisciplinary approach for assessing open innovation model impact on stock return dynamics. Management Decision, 2018, vol. 56, no. 6, pp. 1430–1444. DOI: 10.1108/MD-05-2017-0481.

5. Vitt C.A., Xiong H. The impact of patent activities on stock dynamics in the high-tech sector. Proc. IEEE Int. Conf. on Data Mining, 2015, pp. 399–408. DOI: 10.1109/ICDM.2015.95.

6. Senarathne C.W., Wei J. The impact of patent citation information flow regarding economic innovation on common stock returns: Volume vs. patent citations. Int. J. of Innovation Studies, 2018, vol. 2, no. 4, pp. 137–152. DOI: 10.1016/J.IJIS.2019.02.001.

7. Grieco D. Innovation and stock market performance: A model with ambiguity-averse agents. J. of Evolutionary Economics, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 287–303. DOI: 10.1007/S00191-017-0537-1.

8. Lee B. The relationship between technology life cycle and Korean stock market performance. Int. J. of Financial Studies, 2018, vol. 6, no. 4, p. 88. DOI: 10.3390/IJFS6040088.

9. Dosso M., Vezzani A. Firm market valuation and intellectual property assets. Industry and Innovation, 2020, vol. 27, no. 7, pp. 705–729. DOI: 10.1080/13662716.2019.1685374.

10. Viet N.T., Gneushev V. Analyzing and forecasting emerging technology trends by mining web news. CCIS, 2021, pp. 55–69. DOI: 10.1007/978-3-030-87034-8_5.

11. Viet N.T., Kravets A., Duong Q.H.T. Data mining methods for analysis and forecast of an emerging technology trend: A systematic mapping study from SCOPUS papers. LNAI, 2021, pp. 81–101. DOI: 10.1007/978-3-030-86855-0_7.

12. Тормозов В.С., Золкин А.Л., Менциев А.У. Интеллектуальный подход к задаче информирования и краткосрочного прогнозирования временного ряда в онлайн-режиме // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 3. С. 399–408. DOI: 10.15827/0236-235X.135.399-408.

13. Ji X., Wang J., Yan Z. A stock price prediction method based on deep learning technology. Int. J. of Crowd Science, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 55–72. DOI: 10.1108/IJCS-05-2020-0012.

14. Thu H.G.T., Thanh T.N., Quy T. Le. A Neighborhood deep neural network model using sliding window for stock price prediction. Proc. IEEE Int. Conf. on BigComp, 2021, pp. 69–74. DOI: 10.1109/BigComp 51126.2021.00022.

15. Nguyen T.-T., Yoon S. A novel approach to short-term stock price movement prediction using transfer learning. Applied Sciences, 2019, vol. 9, no. 22, art. 4745. DOI: 10.3390/app9224745.

16. Vo N.N.Y., He X., Liu S., Xu G. Deep learning for decision making and the optimization of socially responsible investments and portfolio. Decision Support Systems, 2019, vol. 124, art. 113097. DOI: 10.1016/J.DSS.2019.113097.

17. Jiang W. Applications of deep learning in stock market prediction: Recent progress. Expert Systems with Applications, 2021, vol. 184, art. 115537. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115537.

18. Li A.W., Bastos G.S. Stock market forecasting using deep learning and technical analysis: a systematic review. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 185232–185242. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3030226.

19. Yang C., Zhai J., Tao G. Deep learning for price movement prediction using convolutional neural network and long short-term memory. Mathematical Problems in Engineering, 2020, pp. 1–13. DOI: 10.1155/ 2020/2746845.

20. Zhang J., Li L., Chen W. Predicting stock price using two-stage machine learning techniques. Computational Economics, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 1237–1261. DOI: 10.1007/s10614-020-10013-5.

21. Weng B., Lu L., Wang X. et al. Predicting short-term stock prices using ensemble methods and online data sources. Expert Systems with Applications, 2018, vol. 112, pp. 258–273. DOI: 10.1016/j.eswa.2018. 06.016.

22. Göçken M., Özçalıcı M., Boru A., Dosdoğru A.T. Stock price prediction using hybrid soft computing models incorporating parameter tuning and input variable selection. Neural Computing and Applications, 2019, vol. 31, no. 2, pp. 577–592. DOI: 10.1007/s00521-017-3089-2.

23. Zhou F., Zhang Q., Sornette D., Jiang L. Cascading logistic regression onto gradient boosted decision trees for forecasting and trading stock indices. Applied Soft Computing, 2019, vol. 84, art. 105747. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105747.

24. Lu W., Li J., Li Y. at al. A CNN-LSTM-Based model to forecast stock prices. Complexity, 2020, vol. 2020, pp. 1–10. DOI: 10.1155/2020/6622927.

25. Wu J., Chen X., Xiong L.-D. et al. Hyperparameter optimization for machine learning models based on Bayesian optimization. J. of Electronic Science and Technology, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 26–40.

26. van Eck N.J., Waltman L. Visualizing bibliometric networks. Measuring Scholarly Impact, 2014, pp. 285–320. DOI: 10.1007/978-3-319-10377-8_13.

27. Liu Y., Zhang R., Wang J., Wang Y. Current and future lithium-ion battery manufacturing. iScience, 2021, vol. 24, no. 4, art. 102332. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102332.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.396-412

Received 28.02.22, Revised 06.06.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 396–412

Forecasting technological trends based on the heterogeneous data analysis

Nguyen Thanh Viet [1,2], *Postgraduate Student, vietqn1987@gmail.com*
A.G. Kravets [1,3], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, agk@gde.ru*

[1] *Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation*
[2] *Pham Van Dong University, Quang Ngai, Viet Nam*
[3] *Dubna State University, Dubna, 141980, Russian Federation*

Abstract. To achieve competitiveness, enterprises need to exploit a development strategy by forecasting promising technologies using limited resources. Numerous previous studies have shown that unexpected changes in R&D and patenting of intellectual property are associated with large changes in the market value of an enterprise. In fact, there is a strong correlation between the volatility of market shares, stock prices in the early stages of high-tech enterprise development, and the period when the innovative technology is not yet defined. Thus, we propose that if company's share prices continue to trend upward, then the developed technologies are likely to become promising innovations in the future.

This paper proposes a method for forecasting technology trends by analyzing web news to identify high-tech enterprises, predicting stock price trends for selected enterprises and analyzing the clusters of patent applications. Unlike other studies, our method advances the idea of predicting technology trends by forecasting the stock price trend using univariate and multivariate data preparation approaches, and using Bayesian optimization to explore the best hyperparameters for machine and deep learning models.

The study uses the developed software system for analyzing word frequency burst detection and stock price prediction. In particular, the proposed method is adopted to predict the price dynamics of Tesla and Samsung shares as case studies.

Keywords: data mining, technology forecast, stock price, Tesla, Bayesian optimization, machine learning, deep learning, patent analysis, cluster analysis, VOSviewer.

Acknowledgements. *The reported study was funded by RFBR according to the research project no. 20-37-90092.*

References

1. Kravets A.G., Salnikova N.A. Predictive modeling of technological development trends. *Bull. of St PbSIT (TU)*, 2020, vol. 55, no. 81, pp. 103–108 (in Russ.)
2. Xu M. The Impact of blockchain technology on stock price: An emprical study. *SHS Web of Conf*., 2021, vol. 96, art. 04008. DOI: 10.1051/SHSCONF/20219604008.
3. Lam H.K.S., Ding L., Cheng T. et al. The impact of 3D printing implementation on stock returns. *Int. J. of Operations and Production Management*, 2019, vol. 39, no. 6/7/8, pp. 935–961. DOI: 10.1108/ijopm-01-2019-0075.
4. Ballestra L.V., Fontana S., Scuotto V., Solimene S. A multidisciplinary approach for assessing open innovation model impact on stock return dynamics. *Management Decision*, 2018, vol. 56, no. 6, pp. 1430–1444. DOI: 10.1108/MD-05-2017-0481.
5. Vitt C.A., Xiong H. The impact of patent activities on stock dynamics in the high-tech sector. *Proc. IEEE Int. Conf. on Data Mining*, 2015, pp. 399–408. DOI: 10.1109/ICDM.2015.95.
6. Senarathne C.W., Wei J. The impact of patent citation information flow regarding economic innovation on common stock returns: Volume vs. patent citations. *Int. J. of Innovation Studies*, 2018, vol. 2, no. 4, pp. 137–152. DOI: 10.1016/J.IJIS.2019.02.001.
7. Grieco D. Innovation and stock market performance: A model with ambiguity-averse agents. *J. of Evolutionary Economics*, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 287–303. DOI: 10.1007/S00191-017-0537-1.
8. Lee B. The relationship between technology life cycle and Korean stock market performance. *Int. J. of Financial Studies*, 2018, vol. 6, no. 4, p. 88. DOI: 10.3390/IJFS6040088.
9. Dosso M., Vezzani A. Firm market valuation and intellectual property assets. *Industry and Innovation*, 2020, vol. 27, no. 7, pp. 705–729. DOI: 10.1080/13662716.2019.1685374.
10. Viet N.T., Gneushev V. Analyzing and forecasting emerging technology trends by mining web news. *CCIS*, 2021, pp. 55–69. DOI: 10.1007/978-3-030-87034-8_5.
11. Viet N.T., Kravets A., Duong Q.H.T. Data mining methods for analysis and forecast of an emerging technology trend: A systematic mapping study from SCOPUS papers. *LNAI*, 2021, pp. 81–101. DOI: 10.1007/978-3-030-86855-0_7.
12. Tormozov V.S., Zolkin A.L., Mentsiev A.U. An intelligent approach to online reporting and short-term forecasting of time series. *Software & Systems*, 2021, vol. 13, pp. 399–408. DOI: 10.15827/0236-235X.135.399-408 (in Russ.).
13. Ji X., Wang J., Yan Z. A stock price prediction method based on deep learning technology. *Int. J. of Crowd Science*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 55–72. DOI: 10.1108/IJCS-05-2020-0012.
14. Thu H.G.T., Thanh T.N., Quy T. Le. A Neighborhood deep neural network model using sliding window for stock price prediction. *Proc. IEEE Int. Conf. on BigComp*, 2021, pp. 69–74. DOI: 10.1109/BigComp 51126.2021.00022.

15. Nguyen T.-T., Yoon S. A novel approach to short-term stock price movement prediction using transfer learning. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 22, art. 4745. DOI: 10.3390/app9224745.

16. Vo N.N.Y., He X., Liu S., Xu G. Deep learning for decision making and the optimization of socially responsible investments and portfolio. *Decision Support Systems*, 2019, vol. 124, art. 113097. DOI: 10.1016/J.DSS.2019.113097.

17. Jiang W. Applications of deep learning in stock market prediction: Recent progress. *Expert Systems with Applications*, 2021, vol. 184, art. 115537. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115537.

18. Li A.W., Bastos G.S. Stock market forecasting using deep learning and technical analysis: a systematic review. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 185232–185242. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3030226.

19. Yang C., Zhai J., Tao G. Deep learning for price movement prediction using convolutional neural network and long short-term memory. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, pp. 1–13. DOI: 10.1155/2020/2746845.

20. Zhang J., Li L., Chen W. Predicting stock price using two-stage machine learning techniques. *Computational Economics*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 1237–1261. DOI: 10.1007/s10614-020-10013-5.

21. Weng B., Lu L., Wang X. et al. Predicting short-term stock prices using ensemble methods and online data sources. *Expert Systems with Applications*, 2018, vol. 112, pp. 258–273. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.06.016.

22. Göçken M., Özçalıcı M., Boru A., Dosdoğru A.T. Stock price prediction using hybrid soft computing models incorporating parameter tuning and input variable selection. *Neural Computing and Applications*, 2019, vol. 31, no. 2, pp. 577–592. DOI: 10.1007/s00521-017-3089-2.

23. Zhou F., Zhang Q., Sornette D., Jiang L. Cascading logistic regression onto gradient boosted decision trees for forecasting and trading stock indices. *Applied Soft Computing*, 2019, vol. 84, art. 105747. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105747.

24. Lu W., Li J., Li Y. at al. A CNN-LSTM-Based model to forecast stock prices. *Complexity*, 2020, vol. 2020, pp. 1–10. DOI: 10.1155/2020/6622927.

25. Wu J., Chen X., Xiong L.-D. et al. Hyperparameter optimization for machine learning models based on Bayesian optimization. *J. of Electronic Science and Technology*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 26–40.

26. van Eck N.J., Waltman L. Visualizing bibliometric networks. *Measuring Scholarly Impact*, 2014, pp. 285–320. DOI: 10.1007/978-3-319-10377-8_13.

27. Liu Y., Zhang R., Wang J., Wang Y. Current and future lithium-ion battery manufacturing. *iScience*, 2021, vol. 24, no. 4, art. 102332. DOI: 10.1016/j.isci.2021.102332.

Для цитирования

Нгуен Тхань Вьет, Кравец А.Г. Прогнозирование технологических тенденций на основе анализа разнородных данных // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 396–412. DOI: 10.15827/0236-235X.139.396-412.

For citation

Nguyen Thanh Viet, Kravets A.G. Forecasting technological trends based on the heterogeneous data analysis. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 396–412 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.396-412.

УДК 004.42
DOI: 10.15827/0236-235X.139.413-419
Дата подачи статьи: 03.02.22, после доработки: 06.06.22
2022. Т. 35. № 3. С. 413–419

Разработка генератора паролей с использованием GUI MATLAB

И.А. Щукарев [1], *к.ф.-м.н., доцент, blacxpress@gmail.com*
Е.В. Маркова [1], *к.э.н., доцент, morozova319@yandex.ru*

[1] *Институт авиационных технологий и управления, Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, 432027, Россия*

Пароли, защищающие аккаунты различных сайтов, порталов и облачных хранилищ, в большинстве случаев ненадежны. К тому же пароли, созданные самими пользователями, имеют недостаточную длину. Поэтому для обеспечения безопасности учетных записей прежде всего необходимо создавать достаточно сложные и длинные пароли.

Авторами данной статьи разработано графическое приложение для ЭВМ, которое позволяет автоматически генерировать пароли с пользовательскими настройками и выводить результат в соответствующее поле. Созданные пароли практически невозможно угадать, поскольку они являются комбинацией случайных букв английского алфавита верхнего и нижнего регистров, цифр и специальных служебных символов. Существует возможность менять длину пароля, выводить результат в окно программы и сохранять в отдельный текстовый файл с названием parol.txt.

Данное приложение и весь графический интерфейс пользователя написаны не на специализированном языке программирования, например Python или C++, что характерно для программ такого типа, а в среде технических расчетов MATLAB с помощью GUI MATLAB и MATLAB Compiler SDK. За счет использования только лишь возможностей MATLAB Compiler SDK удалось создать автономное приложение exe, а не m-файл, который является внутренним форматом программы MATLAB и работает только при наличии полностью установленной среды MATLAB. Для удобства конечного пользователя программа оформлена в виде автономного графического приложения, способного работать на любом компьютере с установленным MATLAB Runtime, позволяющим запускать скомпилированные приложения в системах без установленной версии MATLAB.

Данное приложение может быть использовано организациями, в которых существует отдел сетевой безопасности, поскольку оно облегчит создание множества новых случайных паролей для большого числа компьютеров и аккаунтов сотрудников.

Ключевые слова: *пароль, MATLAB, генерация паролей, генератор псевдослучайных чисел, генератор паролей, одноразовый пароль, информационная безопасность, изменяемая длина пароля, защита данных, уникальность пароля, надежный пароль*.

За безопасность на различных сайтах, порталах, в облачных хранилищах, а также на персональных компьютерах отвечают в большей степени пароли. Ненадежный пароль может быть легко подобран специальными программами или попросту угадан. Процедура угадывания состоит в переборе по словарю наиболее вероятных и распространенных паролей. Как правило, при выборе пароля пользователь ищет нечто среднее между надежностью и удобством запоминания.

В настоящее время практически все сайты так или иначе требуют создания учетной записи пользователя, а значит, и надежного пароля, который нужно придумать и запомнить, к тому же для каждого сайта он должен быть уникальным. Использование одинаковых паролей для большого количества учетных записей ставит под угрозу сохранность данных при взломе пароля на одном из сайтов или порталов, так как многие ресурсы сейчас связаны между собой с помощью e-mail, социальных сетей, например, ВКонтакте, Одноклассники или Twitter. Поэтому удобно использовать программу, которая для каждого конкретного случая сгенерирует случайный пароль необходимой длины. Иначе пользователю придется самому придумывать пароль, который можно просто запомнить и быстро набрать, и каждый раз на это будет уходить все больше и больше времени. Например, сайты-мошенники могут перехватывать доступ к персональным данным пользователя, в том числе и к банковским картам. Таким образом, надежности и сохранности пароля требуется уделять большое внимание, чтобы защитить себя от угроз в сети [1–3].

Важно не только придумать, но еще и не забыть пароль. Для этого можно использовать,

например, мнемоническую технику запоминания. Чтобы не заучивать пароли для каждой конкретной учетной записи, можно быстро вспоминать их на месте. Обычно такие пароли состоят из двух частей. Первая является универсальной, которую необходимо хорошо заучить. Вторая создается по определенному правилу для каждого конкретного ресурса. Придумывается первая часть, которая будет использоваться везде. Например, неочевидное слово «палка». В слово можно добавить спецсимволы, цифры и заглавные буквы для усложнения: «П@1k@». Придумывается вторая часть. В электронном адресе ресурса определенные буквы заменяются другими, например, «е» → «3», «а» → «@», «о» → «0». Части пароля необходимо соединить.

Таким образом, для создания надежного пароля стоит придерживаться следующих правил [4]:

– длина пароля должна быть не менее 8 символов;

– необходимо наличие букв верхнего и нижнего регистров и цифр (K8lM96HFqp);

– пароль должен включать специальные символы, разрешенные конкретным ресурсом (!, @, $, %);

– нужно избегать паролей, содержащих последовательно идущие буквы, цифры и шаблонные слова, например: 12345678, qwerty123, password, anton1991 и др., так как программы для взлома паролей чаще всего используют именно такие сочетания символов;

– не следует включать в пароль свое имя, возраст, год рождения, номер телефона, название сайта или города.

Исследования по созданию программ для генерации случайных паролей проводят и отечественные [5–7], и зарубежные [8–10] специалисты. Так, в работе [5] представлен анализ методов защиты пользовательских учетных записей и исследованы основные тенденции по защите аккаунтов. Описан новый метод генерации паролей с использованием парольных фраз, и предложена разработка усовершенствованного генератора с этими фразами. В работе [6] описаны алгоритм генерации надежных паролей и место их защищенного хранения. Программа реализована на языке программирования C#. Также создана программа хранения паролей, которая имеет базовые меры защиты данных, что позволяет надежно хранить пароли, не боясь их компрометации. Оригинальный метод для создания одноразового пароля, использующий особенности отпечатков пальцев конкретного пользователя, предложен в [10]. Создана программа генерации дополнительного пароля во время проверки подлинности пользователя в процессе допуска его к различным сайтам и приложениям на персональном компьютере, написанная на языке программирования C++ [11]. Также разработана программа на языке программирования C# для автоматической генерации паролей, представленных случайными комбинациями символов [12].

Сегодня существуют приложения для создания паролей, написанные практически на всех популярных языках программирования. В данной статье рассматривается способ создания приложения – генератора паролей [13], полностью написанного в среде технических расчетов MATLAB с помощью GUI MATLAB и MATLAB Compiler SDK. Созданное в MATLAB приложение для персонального компьютера может генерировать пароли различной длины, как меньше 10 символов, так и больше. Таким образом, с ростом цифровизации создание приложения с простым интерфейсом для автоматической генерации сложного пароля является актуальной задачей.

Среда разработки

Современные компьютерные технологии позволяют решать множество разнообразных задач. В большинстве случаев конкретную задачу можно упростить путем использования windows-приложений оконной категории, а не консольной. Вычислительная среда MATLAB позволяет создавать такие оконные приложения, используя широкий спектр компонентов, направленных на создание графического интерфейса, обладающего функциональными возможностями аналогичных систем визуального программирования. Высокоуровневый язык технических расчетов MATLAB дает возможность использовать встроенные решения для создания новых приложений. Задачей авторов являлось написание автономного приложения, полностью созданного в рамках одной программной среды, с графическим интерфейсом, генерирующим пароль заданной длины при нажатии конечным пользователем на соответствующую кнопку.

Программа написана на языке MATLAB с использованием MATLAB Compiler и MATLAB Compiler SDK и представляет собой отдельное приложение в формате exe. Процедура создания пароля выглядит следующим обра-

зом. После запуска программы появляется графический интерфейс, то есть окно программы, в котором можно задать желаемую длину пароля. Генерация самого пароля производится по нажатии кнопки «Сгенерировать». Интерфейс пользователя имеет максимально удобный минималистичный вид. Пользователь вводит в соответствующее поле число, равное необходимой длине пароля, а затем нажимает кнопку «Сгенерировать». В итоге в таблице ниже появляется пароль необходимой длины.

Опишем подробнее применяемые команды. После ввода числа, отвечающего за длину пароля, командой str2double преобразуем его в тип данных double. Далее создаем цикл от 1 до определенного числа, например *n*. Затем создаем два массива данных, которые имеют тип данных char. Первый включает в себя только латинские буквы верхнего регистра, второй – латинские буквы нижнего регистра. Также создаем еще два массива с данными: один из них включает цифры от 0 до 9, другой – специальные символы от ! до ~. В итоге получаем четыре массива с данными, которые в общем случае имеют разные типы данных. Затем командой randi выбирается по одному случайному символу из каждого массива. В итоге получается вектор-строка из четырех различных символов.

Чтобы команда randi корректно сработала, все символы в массиве должны иметь одинаковый тип данных. Поэтому предварительно создаем пустую вектор-строку размерностью 1×4 в формате cell. Затем также командой randi выбирается один символ из вектора, который и заносится в первую ячейку пароля. Далее осуществляется переход ко второй ячейке и цикл повторяется заново (рис. 1).

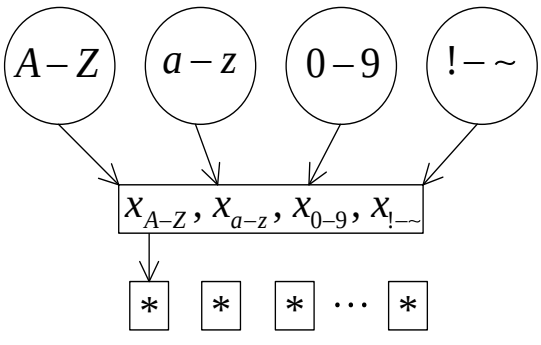


Рис. 1. Схема получения случайного символа для генерации пароля

Fig. 1. A scheme for obtaining a random character to generate a password

Создание графического интерфейса пользователя для программного кода генератора паролей

Для создания программы генератора паролей использован метод визуально-ориентированного программирования [14]. Данный метод представлен в MATLAB с помощью специального конструктора графического интерфейса GUIDE. Графический интерфейс разрабатываемого приложения создается путем перетаскивания в редактируемое графическое окно требуемых элементов интерфейса будущего приложения из панели инструментов, а в файле с расширением *.m прописываются необходимые действия при активации элементов GUI и при обработке событий элементов пользовательского интерфейса.

Поэтому для удобства использования генератора паролей был разработан графический интерфейс GUI [15], который включает в себя поле для ввода длины пароля (edit1), кнопку генерации пароля (pushbatton1) и поле вывода сгенерированного пароля (uitable1). Интерфейс GUI создавался с помощью инструмента GUI Layout Editor, который можно вызвать, набрав команду guide в консоли MATLAB (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/38.jpg).

Все элементы созданного интерфейса GUI для удобства использования имеют соответствующие обозначения: edit1, pushbatton1, uitable1и т.д. Из основных возможностей можно выделить следующие: замена стиля и размера шрифта вводимых и отображаемых данных, настройка размера самого диалогового окна и tag обращения к данной конкретной функции (например edit1). Нумерация тэгов имеет большое значение, так как именно на них ссылаются команды из основного тела программного кода.

В диалоговом окне GUIDE Quick Start выбираем Blank GUI (по умолчанию) (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/38.jpg), добавляем необходимые компоненты в рабочую область (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/3.jpg). Для созданного приложения потребовалось нарисовать окно с названием действия (text1), окно ввода данных (edit1), кнопку активации (pushbatton1) и окно вывода информации (uitable1) (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/3.jpg, http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/4.jpg). Все добавляемые компоненты

имеют возможность тонкой настройки многих параметров (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/5.jpg).

В результате разработки графического интерфейса в указанной папке с исполняемым файлом MATLAB, имеющим расширение *.m и содержащим основной код для генерации пароля, создается файл с графикой и элементами самого интерфейса, имеющий расширение *.fig [15].

Преобразование интерфейса GUI MATLAB в приложение с расширением .exe

Преобразуем полученный графический интерфейс GUI MATLAB (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/6.jpg), включающий код генератора пароля, в привычный автономный *.exe файл, то есть в отдельное приложение.

Для этого есть специальный набор инструментов MATLAB Compiler SDK, который расширяет функциональные возможности MATLAB, позволяя создавать автономные исполняемые файлы, совместно используемые библиотеки C/C ++, сборки Microsoft .NET, классы Java и пакеты Python из программ и m-файлов MATLAB. Полученные приложения могут быть интегрированы с другими пользовательскими программами, а затем использованы на любых компьютерах. Для этого необходимо набрать в командном окне MATLAB команду deploytool.

Чтобы при вводе данной команды не возникали ошибки, следует проверить, установлены ли необходимые компоненты, а именно MATLAB Compiler и MATLAB Compiler SDK. Далее в поле Addmainfile загружается исполняемый .m файл, содержащий основной код программы, остальные файлы (name.fig и icon.png) подхватываются автоматически, а в поле Application Name вводится имя будущего приложения. Для начала процесса сборки нажимаем кнопку Package (рис. 2). Для корректной работы созданного приложения на компьютере, содержащем исполняемый файл программы, должен быть установлен MATLAB Runtime версии R2020b (9.9) [16], позволяющий запускать скомпилированные приложения без установки самого пакета MATLAB.

При первоначальной инсталляции программы MATLAB устанавливаются не все компоненты, необходимые для ее работы, а только выбранные самим пользователем. Компоненты можно добавлять по мере надобности, устанавливая только их, без переустановки всего MATLAB заново. Такой подход экономит дисковое пространство, время установки и скорость запуска и работы программы в целом, так как MATLAB любую запускаемую функцию ищет по всем подпапкам всех установленных компонентов, а размер MATLAB со всеми установленными компонентами составляет порядка 29 Гб.

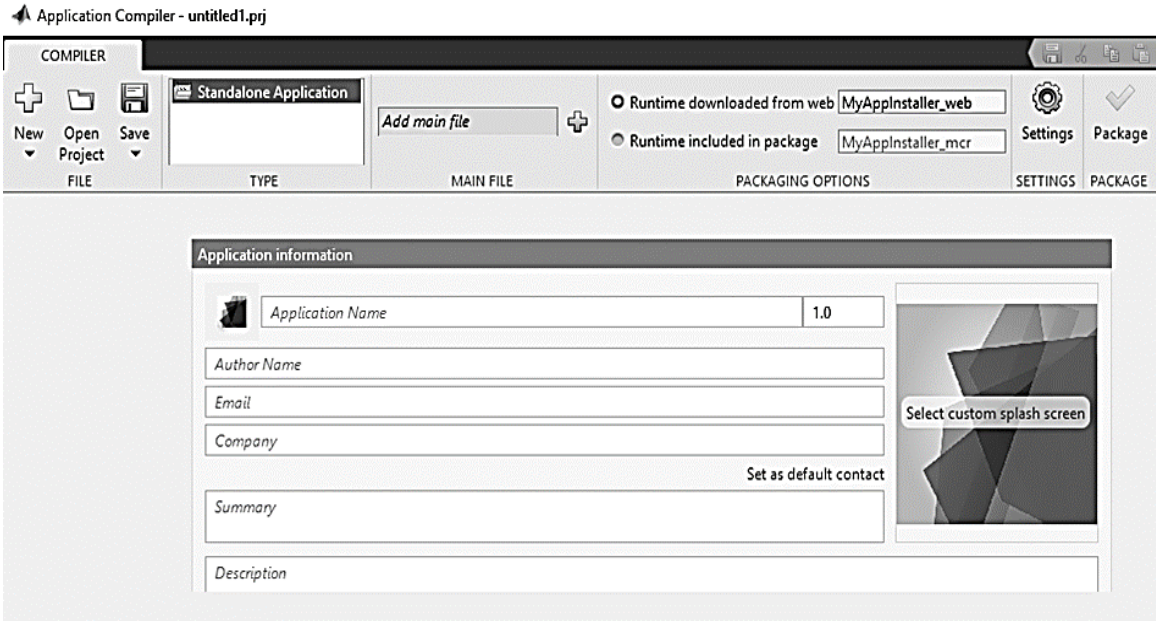


Рис. 2. Меню создания автономного приложения

Fig. 2. An offline application creation menu

Время подбора пароля можно оценить, используя официальный сайт проверки паролей на взлом лаборатории Касперского. Как показано в [17], если конечному пользователю понадобится надежный пароль, то его оптимальная длина должна составлять не менее 13 символов. Для проверки использовались пароли из 13 знаков, включающие в себя комбинацию прописных и строчных букв английского алфавита, цифр и спецсимволов. Один из них был составлен без использования приложения (@13$GoroD007@), а другой получен в программе MATLAB с помощью созданного генератора паролей (T~QoYOWJZcb?3). В лаборатории Касперского посчитали, что надежность пароля, придуманного пользователем без использования компьютерного приложения даже с учетом длины в 13 символов, является минимальной, а время, необходимое для взлома пароля, полученного в программе MATLAB, составляет 33 века.

Заключение

Итак, авторами данной статьи разработано приложение для генерации паролей различной длины, содержащих заглавные и строчные буквы латиницы, цифры, а также специальные символы, позволяющее сохранить сгенерированный пароль в отдельный текстовый файл. Для написания кода использовалась программная среда MATLAB. Для удобства пользования программа представлена в виде автономного приложения, способного запускаться на любом компьютере, отвечающем системным требованиям MATLAB. Благодаря возможности настраивать длину пароля, данное приложение можно использовать для широкого круга задач, связанных с безопасностью конфиденциальных данных в различных организациях, так как оно позволяет создавать в сжатые сроки множество паролей для большого числа пользователей.

Литература

1. Илюбаев А.С., Плескачев Д.В., Кусаинова У.Б. Рекомендации по обеспечению конфиденциальности в Интернете // Наука и реальность. 2021. № 1. С. 41–44.

2. Шурыгин И.А. Пароли в защите информационных данных // Актуальные проблемы науки и практики (Гатчинские чтения 2020): сб. науч. тр. по матер. VII Междунар. науч.-практич. конф. 2020. Т. 2. С. 313–317.

3. Итинсон К.С., Чиркова В.М. Обеспечение кибербезопасности в образовательных учреждениях: осведомленность, правила, стратегия // Балтийский гуманитарный журнал. 2021. Т. 10. № 4. С. 99–102.

4. Лим В.Б. Создание надежных паролей // Проблемы науки. 2021. № 3. С. 23–24.

5. Глотов А.И., Котилевец И.Д., Иванова И.А. Разработка усовершенствованных генераторов паролей // Ученые записки УлГУ. Сер.: Математика и информационные технологии. 2021. № 1. С. 13–21.

6. Иванов А.Н., Вычегжанина В.Ю., Суляндзига Е.П. Разработка и реализация алгоритма генерации надежных паролей и их защищенного хранения // Ученые заметки ТОГУ. 2019. Т. 10. № 1. С. 357–370. URL: https://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2019/TGU_10_60.pdf (дата обращения: 21.05.2022).

7. Абидарова А.А. Анализ надежности паролей для обеспечения информационной безопасности // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. № 8. С. 66–68.

8. Lone S.A., Mir A.H. A stable and secure one-time-password generation mechanism. JARDCS, 2019, vol. 11, no. 6, pp. 1187–1196.

9. Kävrestad J., Lennartsson M., Birath M., Nohlberg M. Constructing secure and memorable passwords. Information and Computer Security, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 701–717. DOI: 10.1108/ics-07-2019-0077.

10. Lone S.A., Mir A.H. A stable and secure one-time-password generation mechanism using fingerprint features. IJITEE, 2019, vol. 8, no. 9, pp. 2431–2438. DOI: 10.35940/ijitee.i8919.078919.

11. Емельянов А.А. Генератор временных паролей для персонального компьютера: Свид. о регистр. ПрЭВМ № 2021610022. Рос. Федерация, 2021.

12. Толстиков В.В. ANSecurity-генератор паролей: Свид. о регистр. ПрЭВМ № 2021612639. Рос. Федерация, 2021.

13. Щукарев И.А. Генератор паролей: Свид. о регистр. ПрЭВМ № 2022615777. Рос. Федерация, 2022.

14. Лебедь О.А. Возможности структурного программирования в среде MATLAB // Вопросы педагогики. 2021. № 6. С. 222–225.

15. Mathworks: Math. Graphics. Programming. URL: https://www.mathworks.com/products/matlab.html (дата обращения: 02.02.2022).

16. Mathworks: MATLAB Runtime. URL: https://www.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html (дата обращения: 02.02.2022).

17. Щукарев И.А. Оценка оптимальной длины надежного пароля // Проблемы и перспективы экономических отношений предприятий авиационного кластера: сб. науч. тр. VI Всерос. науч. конф. 2022. С. 218–222.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.413-419

Received 03.02.22, Revised 06.06.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 413–419

Developing a password generator using GUI MATLAB

I.A. Shchukarev [1], *Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, blacxpress@gmail.com*
E.V. Markova [1], *Ph.D. (Economics), Associate Professor, morozova319@yandex.ru*

[1] *Ulyanovsk State Technical University, Institute of Aviation Technology and Management, Ulyanovsk, 432027, Russian Federation*

Abstract. Nowadays, in most cases accounts of various sites, portals and cloud storages have weak passwords. In addition, the passwords created by users themselves are of insufficient length, which directly affects their reliability. Therefore, first of all it is necessary to create sufficiently complex and long passwords to ensure account security.

In this paper, the authors present a developed a graphical computer application that allows automatic generating of passwords with custom settings and displaying the result in the appropriate field. The created passwords are almost impossible to guess since they include a combination of random upper and lower case letters of the English alphabet, numbers and special service characters. The authors implement the ability to change the password length, to output the result to the program window and save it to a separate text file named parol.txt.

This application and the entire graphical user interface are not written in a specialized programming language, such as Python or C++, which is typical for programs of this type, but in the MATLAB technical calculation environment using the MATLAB GUI and MATLAB Compiler SDK. The MATLAB Compiler SDK capabilities made it possible to create a standalone exe application, not an m-file, which is the MATLAB program internal format and works only if there is fully installed MATLAB environment. To make it convenient for the end user, the program is designed as a stand-alone graphical application that can run on any computer with MATLAB Runtime installation that allows running compiled applications on systems without the installed MATLAB. The program is built using MATLAB GUI and MATLAB Compiler SDK. As a result, this application can be used by organizations with a network security department, as it can facilitate the creation of many new random passwords for a large number of computers and employee accounts.

Keywords: password, MATLAB, password generation, pseudo-random number generator, password generator, one-time password, information security, variable password length, data protection, password uniqueness, strong password.

References

1. Ilyubaev A.S., Pleskachev D.V., Kusainova U.B. Online privacy best practices. *Science and Reality*, 2021, no. 1, pp. 41–44 (in Russ.).

2. Shurygin I.A. Passwords in data protection. *Proc. VII Sci-Pract. Conf. Actual Problems of Science and Practice (Gatchina Readings 2020)*, 2020, vol. 2, pp. 313–317 (in Russ.).

3. Itinson K.S., Chirkova V.M. Ensuring Cybersecurity in educational institutions: Awareness, rules, strategy. *Baltic Humanitarian J.*, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 99–102 (in Russ.).

4. Lim V.B. Creating strong passwords. *Problems of Science*, 2021, no. 3, pp. 23–24 (in Russ.).

5. Glotov A.I., Kotilevec I.D., Ivanova I.A. Development of advanced password generators. *Scientific Notes of UlSU. Ser.: Mathematics and Information Technology*, 2021, no. 1, pp. 13–21 (in Russ.).

6. Ivanov A.N., Vychegzhanina V.U., Sulyandziga E.P. Development and implementation of the algorithm generation of reliable passwords and their protected storage. *Scientists Notes PNU*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 357–370. Available at: https://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2019/TGU_10_60.pdf (accessed May 23, 2022) (in Russ.).

7. Abidarova A.A. Analysis of password reliability to ensure information security. *Proc. of the TSU*, 2021, no. 8, pp. 66–68 (in Russ.).

8. Lone S.A., Mir A.H. A stable and secure one-time-password generation mechanism. *JARDCS*, 2019, vol. 11, no. 6, pp. 1187–1196.

9. Kävrestad J., Lennartsson M., Birath M., Nohlberg M. Constructing secure and memorable passwords. *Information and Computer Security*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 701–717. DOI: 10.1108/ics-07-2019-0077.

10. Lone S.A., Mir A.H. A stable and secure one-time-password generation mechanism using fingerprint features. *IJITEE*, 2019, vol. 8, no. 9, pp. 2431–2438. DOI: 10.35940/ijitee.i8919.078919.

11. Emelyanov A.A. *Temporary Password Generator for a Personal Computer*. Patent RF, no. 2021610022, 2021.

12. Tolstikov V.V. *ANSecurity–Password Generator*. Patent RF, no. 2021612639, 2021.

13. Shchukarev I.A. *Password Generator*. Patent RF, no. 2022615777, 2022.

14. Lebed O.A. Features of structured programming in MATLAB. *Issues of Pedagogy*, 2021, no. 6, pp. 222–225 (in Russ.).

15. *Mathworks: Math. Graphics. Programming*. Available at: https://www.mathworks.com/products/matlab.html (accessed February 02, 2022).

16. *Mathworks: MATLAB Runtime*. Available at: https://www.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html (accessed February 02, 2022).

17. Shchukarev I.A. Estimation of the optimum length of a strong password. *Proc. VI All-Russ. Sci. Conf. Problems and Prospects of Economic Relations of Aviation Cluster Enterprises*, 2022, pp. 218–222 (in Russ.).

Для цитирования

Щукарев И.А., Маркова Е.В. Разработка генератора паролей с использованием GUI MATLAB // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 413–419. DOI: 10.15827/0236-235X.139.413-419.

For citation

Shchukarev I.A., Markova E.V. Developing a password generator using GUI MATLAB. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 413–419 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.413-419.

УДК 004.891
DOI: 10.15827/0236-235X.139.420-427
Дата подачи статьи: 08.06.22
2022. Т. 35. № 3. С. 420–427

Автоматизированная система анализа ключевых терминов

С.А. Власова [1], *к.т.н., ведущий научный сотрудник, svlasova@jscc.ru*
Н.Е. Каленов [1], *д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, nkalenov@jscc.ru*

[1] *Межведомственный суперкомпьютерный центр (МСЦ) РАН – филиал ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований (НИИСИ) РАН, г. Москва, 119991, Россия*

В статье описан предложенный авторами метод формирования массива ключевых терминов, составляющих основу предметной онтологии Единого цифрового пространства научных знаний и перечня статей (слотов) энциклопедий по определенному научному направлению.

Метод основан на частотном анализе встречаемости ключевых терминов в статьях, опубликованных в ведущих научных журналах по данной тематике. Методика предполагает программную обработку метаданных статей, отраженных в различных БД, построение рейтинговых списков частоты встречаемости отдельных ключевых терминов и выделение ядер таких списков, что, в свою очередь, можно рассматривать как основу для наполнения предметной онтологии и формирования энциклопедических слотов.

Для реализации методики авторами данной статьи разработаны структура соответствующей БД, программные средства для ее наполнения, обработки и анализа данных. В статье представлены БД и результаты практической реализации методики на основе обработки нескольких тысяч статей из ведущих российских журналов по математике, информатике и физике (выявлены и проанализированы термины на русском и английском языках).

Проведенная оценка соответствия частот распределения ключевых терминов и составляющих их отдельных слов закону Брэдфорда показала значительные расхождения с этим законом в случае ключевых терминов, но определенные сближения при рассмотрении отдельных слов и их пермутации внутри ключевых терминов.

Ключевые слова: *ключевой термин, метаданные статей, частотный анализ, БД, автоматизированная система.*

В число наиболее важных направлений, связанных с сохранением и распространением достижений науки в России, входят развитие *Большой российской энциклопедии* (БРР) (https://bigenc.ru), создание на ее основе портала «Знание» и формирование *единого цифрового пространства научных знаний* (ЕЦПНЗ) как интегратора разнородных научных информационных ресурсов [1, 2].

Основу любой энциклопедии составляют статьи (слоты), посвященные персонам, событиям, научным направлениям и т.п. Определение перечня слотов является одной из важных проблем при формировании энциклопедий. Подобная же проблема, но в несколько другом ракурсе, возникает при создании ЕЦПНЗ, терминологической основой которого являются предметные онтологии, описывающие конкретное научное направление в виде структурированных терминов и их связей. Совокупность предметных онтологий и поддерживающая их программная оболочка ЕЦПНЗ должны обеспечивать развитый многоаспектный поиск разнородной информации, ее удобную визуализацию и навигацию по связанным ресурсам. Проблема формирования предметных онтологий тесно связана с традиционными задачами формирования тематических тезаурусов [3, 4]. Основой тезауруса, предметной онтологии, а также «сырьем» для определения перечня энциклопедических слотов в научной области должны стать словники, включающие перечень терминов, описывающих то или иное научное направление.

Соответственно, возникает задача формирования таких словников, включающих, с одной стороны, наиболее важные широко распространенные термины, а с другой – термины, описывающие новые перспективные направления, определяющие развитие конкретной научной области. Эту задачу было предложено решать с помощью *ключевых терминов* (КТ), используемых авторами в своих научных статьях (далее – авторские КТ) [5, 6].

Анализ современных публикаций, связанных с понятием «ключевой термин», показал, что ни в одной из них не исследуется задача анализа массива КТ по определенному научному направлению. Авторы предлагают различные методы извлечения КТ из текстовых документов [7–9], исследуют этимологию и историю становления ключевых понятий в определенной области [10, 11], анализируют возникновение и введение в научный оборот новых терминов [11, 12], проводят исследования по использованию и сравнению определенных терминов разных языков [13, 14].

Многоаспектный анализ авторских КТ предполагает возможность выявления общего ядра – перечня наиболее часто употребляемых КТ, анализ временной динамики частоты появления тех или иных КТ, возможность связывать их с определенными журналами и статьями и т.п. Для решения этих задач необходимо иметь БД, содержащую соответствующие элементы, и программный инструментарий, позволяющий обрабатывать их и визуализировать результаты обработки.

Структура БД

Поддерживаемая Microsoft SQL Server БД системы содержит семь видов объектов: тематика, журнал, статья, КТ на русском и английском языках, *ключевые слова* (КС) (отдельные слова, входящие в состав терминов) на русском и английском языках. Объект каждого вида имеет следующие атрибуты.

Тематика: идентификатор записи, наименование тематики журнала, рубрика ГРНТИ журнала.

Журнал: идентификатор записи, название журнала на русском (английском) языке.

Статья: идентификатор записи, название статьи на русском (английском) языке, идентификатор журнала, год издания, выпуск (том, номер), адрес сайта статьи.

КТ на русском (английском) языке: идентификатор записи, КТ на русском (английском) языке, идентификатор статьи, идентификатор журнала.

КС на русском (английском) языке: идентификатор записи, КС на русском (английском) языке, идентификатор КТ.

Программная оболочка, обеспечивающая работу с БД, создана на основе технологии Microsoft ASP.NET на платформе Microsoft .NET Framework в среде разработки Microsoft Visual Studio 2019.

Отбор материалов для анализа

Для получения устойчивых результатов, отражающих реальное распределение КТ, необходимо иметь репрезентативную выборку статей по рассматриваемому научному направлению и, соответственно, достаточно большой массив журналов, содержащих в цифровом виде информацию о КТ.

Для проведения соответствующих расчетов, касающихся русскоязычных терминов, наиболее рационально было бы использовать БД РИНЦ или RSCI. Однако РИНЦ не дает возможности выгрузки статей в структурированном виде и анализа HTML-файлов, выдаваемых по запросам статей. За предоставление возможности анализа массива данных РИНЦ самим пользователям администрация eLibrary требует постатейную достаточно высокую плату. БД RSCI, представленная на платформе Web of Science и содержащая, как утверждается, наиболее важные российские журналы, в национальной подписке для российских пользователей недоступна, для работы с ней необходимо коммерческое соглашение с компанией Clarivate.

Поэтому для проведения модельных расчетов авторами данного исследования была выбрана отечественная система MathNet, которая позволяет анализировать поддерживаемую ею информацию программно. В дополнение к этому были проанализированы сайты журналов, не отражаемых в MathNet, на предмет возможности программного выделения КТ из метаданных опубликованных в них статей.

В результате были отобраны перечисленные далее журналы по математике, физике и информатике.

Математика: «Известия Российской академии наук. Серия математическая», «Математический сборник», «Дискретная математика», «Успехи математических наук», «Функциональный анализ и его приложения», «Алгебра и анализ», «Алгебра и логика», «Труды Математического института им. В.А. Стеклова РАН».

Физика: Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки», «Теоретическая и математическая физика».

Информатика: «Вычислительные методы и программирование», «Программные продукты и системы», «Информатика и ее применения».

По математике было выбрано для анализа более 6 000 статей, по физике – около 3 500, по

информатике – более 3 500. Временной охват статей по каждому направлению составил в среднем 16 лет.

Загрузка информации в БД системы

На портале Math-Net.Ru представлен список названий журналов (http://www.mathnet.ru/ej.phtml?option_lang=rus), из которого и был сделан выбор для загрузки в систему. Названия журналов являются активными ссылками, переход по которым приводит к странице выбранного журнала. Войдя в раздел «Архив», получаем список всех выпусков (номеров) журнала с указанием тома и года. Для получения статей переходим по ссылке соответствующего номера. Названия статей являются активными ссылками, которые приводят к странице с ее данными. Например, на рисунке 1 отображены все данные, необходимые для загрузки в систему: название журнала, название статьи, год выпуска, КС. Для получения этих данных на английском языке нужно в адресе статьи изменить значение параметра option_lang на eng. Параметр papered определяет идентификатор конкретной статьи. Для загрузки данных статей в БД системы была разработана специальная программа, выполняющая следующие действия.

Название журнала на русском и английском языках загружается в БД системы. Последовательно, изменяя значение параметра papered, определяется наличие страницы со статьей на портале Math-Net.Ru (на русском языке option_lang=rus, на английском – option_lang=eng). Для каждой найденной статьи проводится анализ ее HTML-кода: определяются год, название статьи, КС.

Год публикации отделен запятой от названия журнала после тега <a title='. Например,

```
<a title='Дискретая математика, 2017,
том 29,
```

Название журнала заключено в теги </size>. Например,

```
<span class=red><font size=+1>
Линейно реализуемые автоматы</font>
</span>
```

КС находятся после тега Ключевые слова: в тегах . Например,

```
<b>Ключевые слова:</b>
<i>теория автоматов, переходные систе-
мы, подстановка, кодирование, слож-
ность.</i>
```

В HTML-коде страницы с данными статьи на английском языке ее название заключено в те же теги, что и на русском. Например,

```
<span class=red><font size=+1>Linearly
realizable automata</font></span>
```

КС находятся после тега Keywords: в тегах . Например,

```
<b>Keywords:</b>
<i>automata theory, automata, semiau-
tomata, transition systems, permuta-
tion, substitution function, assign-
ment, state encoding, complexity.</i>
```

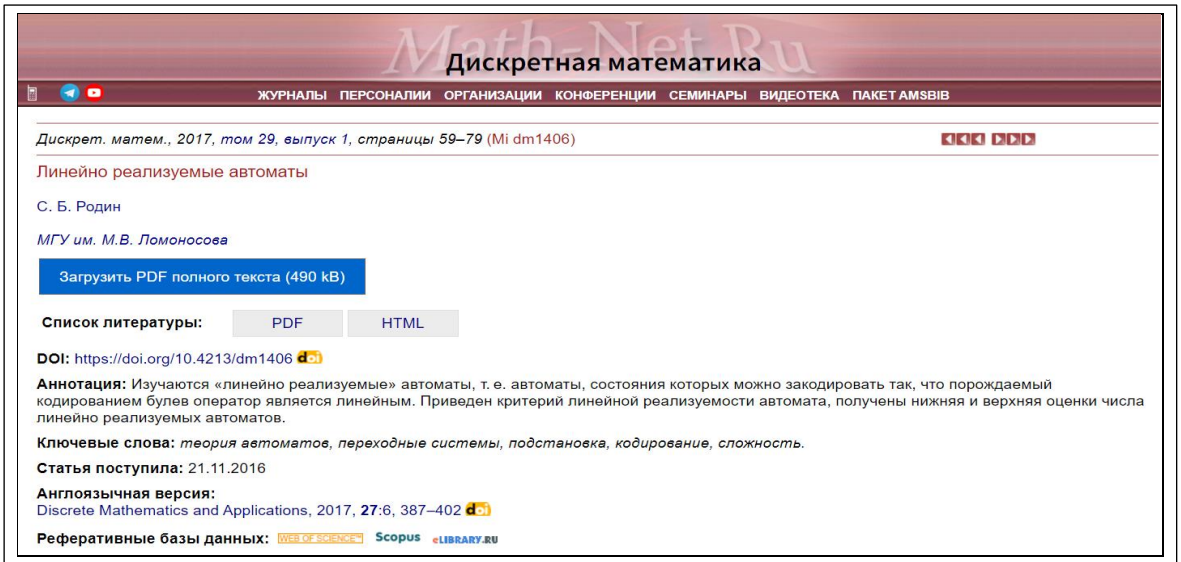


Рис. 1. Пример статьи на портале Math-Net.Ru

Fig. 1. An example of an article on the portal Math-Net.Ru

Разработанная программа реализует алгоритм выбора необходимых метаданных и загружает их в БД описанной выше структуры.

После окончания загрузки данных всех статей выбранного журнала программа из загруженных записей объектов «Ключевой термин на русском языке» и «Ключевой термин на английском языке» формирует данные для объектов «Ключевое слово на русском языке» и «Ключевое слово на английском языке» соответственно.

Алгоритм анализа данных

Для формирования словника, принимаемого в качестве основы предметной онтологии, из массива КТ, содержащего тысячи элементов, необходимо определить критерии отнесения к нему того или иного термина. В качестве основы для такого критерия можно принять частоту встречаемости КТ в выделенном массиве (в данном случае в журналах определенной тематики). Для реализации этого критерия на первом этапе необходимо построить и проанализировать рейтинговый список КТ, упорядоченный по частоте их встречаемости. На следующем этапе нужно определить, по какому принципу из рейтингового списка отбирать КТ для включения в словник. Одним из возможных критериев включения КТ в словник может служить его принадлежность к ядру рейтингового списка, включающего КТ, на которые приходится 80 % общей встречаемости. В соответствии с принципом Парето (который называют еще законом 20/80) [15], ядро должно включать 20 % КТ, находящихся в верхней части рейтингового списка. К числу функций описываемой системы относятся построение ядер массивов КТ и КС и оценка уровня соответствия их распределения принципу Парето.

Интерфейс системы

Система размещена в свободном доступе по адресу http://dirsmsc.ru/keyterms/ и предоставляет пользователю следующие возможности:

– анализ общего частотного распределения КТ и КС;

– хронологический анализ распределения КТ и КС по журналам – по выбранным из ядра КТ или КС можно получить их частотное распределение по годам, а также список журналов, в которых они встречаются (с указанием количества по годам);

– анализ КТ и КС, относящихся к конкретным журналам, – по выбранным журналам можно получить списки ядра КТ и КС (с указанием их встречаемости).

Рассмотрим подробнее возможность проведения анализа в каждом разделе.

Анализ общего частотного распределения КТ и КС. Для проведения данного анализа система предлагает заполнить форму запроса. Из предложенных списков необходимо выбрать тематику и атрибуты, по которым проводится анализ; можно указать временной интервал (по умолчанию все годы), порядок сортировки результирующих списков (по встречаемости или по алфавиту) и выбрать количество КТ (КС) из ядра, необходимое для показа пользователю (по умолчанию 50).

По составленному запросу система выдаст следующие данные: количество всех найденных элементов (КТ или КС), соответствующих запросу, количество различных терминов, количество терминов в ядре, количество повторяющихся терминов ядра, частота встречаемости терминов ядра (процент повторяющихся терминов ядра). Также система выдаст список элементов с указанием частоты встречаемости.

На рисунке 2 приведен пример результата выполнения запроса для анализа КТ в статьях журналов, относящихся к тематике «Математика», опубликованных в период 2000–2021 гг.

Хронологический анализ распределения КТ и КС по журналам. Для проведения данного анализа в предложенной системой форме необходимо выбрать тематику, указать атрибут «Ключевые термины» или «Ключевые слова», выбрать атрибут «Русские» или «Английские», указать количество КТ (КС) из ядра, необходимое для показа пользователю. В соответствии с запросом система выдаст на экран пользователя список КТ (КС), отсортированных в порядке частоты встречаемости. На рисунке 3 приведен пример запроса на поиск русских КТ по тематике «Информатика».

Пользователь из предоставленного списка выбирает нужные КТ. Для каждого выбранного КТ система выдаст его частотное распределение по годам, а также список журналов, в которых он встречается. Для каждого журнала также будет выдано частотное распределение термина по годам (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/7.jpg).

Анализ КТ и КС в выбранных журналах. В данном разделе система предлагает выбрать тематику, после чего выдает список журналов

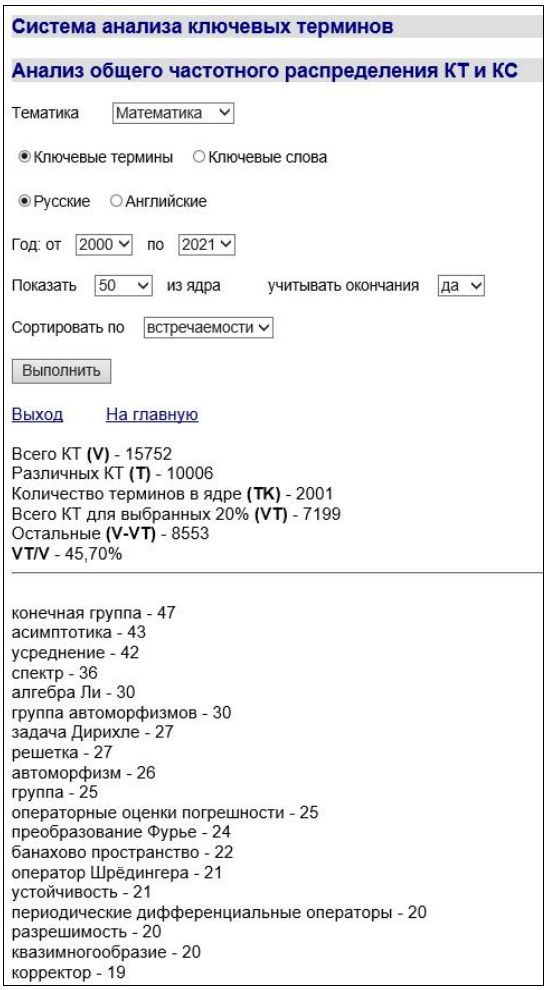


Рис. 2. Пример анализа частотного распределения КТ

Fig. 2. An example of analyzing the frequency distribution of key terms

по указанной тематике. В этом списке пользователю нужно отметить интересующие его журналы и задать необходимые данные для выбора и показа результатов (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/8.jpg). Система, обработав запрос, выдаст список найденных КТ с указанием их встречаемости в журнале (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/9.jpg).

Результаты проведенного анализа

В рамках разработанной автоматизированной системы были получены данные по всем загруженным в БД КТ и КС, отдельно проанализированы русскоязычные и англоязычные КТ для тематических направлений математика, физика, информатика. Результаты анализа приведены в таблице 1. График (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/10.jpg) демонстрирует распределение частоты встречаемости русских КТ в математических журналах.

Результаты анализа русскоязычных и англоязычных КС для различных тематических направлений приведены в таблице 2. На рисунке (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/11.jpg) показан график распределения частоты встречаемости русских КС в математических журналах.

В списке КТ, выделенных в русскоязычных журналах по информатике (его фрагмент приведен в таблице (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/12.jpg), термин «параллельные алгоритмы» встречается 29 раз, «параллельный алгоритм» – 22 раза. Аналогично в списке англоязычных терминов по информатике КТ parallel algorithms встречается 23 раза, a parallel algorithm – 21 раз.

Если исключить из рассмотрения такие общие понятия, как алгоритм, вычисления, компьютеры и т.п., то, анализируя ядро перечня КТ по информатике, можно сделать вывод, что наиболее актуальные проблемы связаны со следующими направлениями:

– моделирование (в списке из 200 наиболее часто используемых КТ термины, связанные с этой проблемой, встречаются 436 раз:

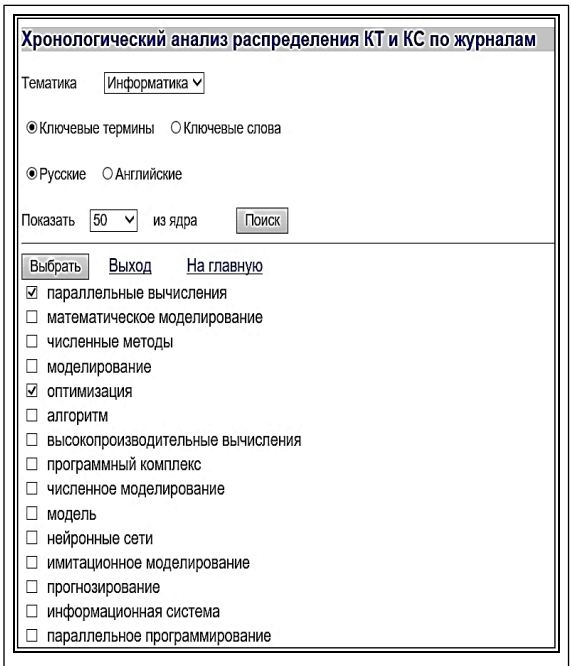


Рис. 3. Пример запроса на поиск русских КТ

Fig. 3. An example of a query to search for Russian key terms

Таблица 1

Анализ КТ

Table 1

The analysis of key terms

КТ	Математика		Физика		Информатика	
	рус.	англ.	рус.	англ.	рус.	англ.
Всего	15 752	22 969	14 095	14 013	19 031	16 684
Различных	9 928	13 533	8 047	7 975	11 230	9 535
20 % из них (наиболее повторяющихся)	1 985	2 706	1 609	1 595	2 246	1 907
Всего для выбранных 20 % (с повторениями)	7 281	11 377	6 868	6 889	9 813	8 476
Остальные	8 471	11 592	7 227	7 124	9 218	8 208
Процент повторяющихся из 20 % от всех	46,2	49,5	48,7	49,2	51,6	50,8

Таблица 2

Анализ КС

Table 2

The analysis of keywords

КС	Математика		Физика		Информатика	
	рус.	англ.	рус.	англ.	рус.	англ.
Всего	35 422	49 514	31 021	31 535	40 856	36 325
Различных	6 900	5 610	6 296	4 132	9 220	5 315
20 % из них (наиболее повторяющихся)	1 380	1 122	1 259	8 26	1 844	1 063
Всего для выбранных 20 % (с повторениями)	27 248	41 128	23 518	25 243	30 682	28 862
Остальные	8 174	8 386	7 503	6 292	10 174	7 463
Процент повторяющихся КС из 20 % от всех	76,9	83	75,8	80	75,1	79,5

математическое моделирование – 104 раза, моделирование – 96 раз, численное моделирование – 46 раз, модель – 45 раз, имитационное моделирование – 44 раза, математическая модель – 32 раза, компьютерное моделирование – 22 раза, модель данных – 10 раз, суперкомпьютерное моделирование – 10 раз, информационная модель – 9 раз, имитационная модель – 9 раз, аналитическое моделирование – 9 раз);

– параллельные вычисления (в списке из 200 наиболее часто используемых КТ термины, связанные с этой проблемой, встречаются 221 раз: параллельные вычисления – 132 раза, параллельные алгоритмы – 51 раз, параллельное программирование – 38 раз);

– оптимизация (в списке из 200 наиболее часто используемых КТ термины, связанные с этой проблемой, встречаются 68 раз: оптимизация – 50 раз, глобальная оптимизация – 10 раз, многокритериальная оптимизация – 8 раз).

Заключение

Результаты анализа показывают, что распределение КТ в том виде, как они представлены авторами, достаточно далеко от распределения Парето, в то время как распределение КС вполне ему соответствует. Более подробный анализ рейтингового списка КТ объясняет причину этого, которая в значительной степени обусловлена разной последовательностью одних и тех же слов, входящих в состав КТ.

Очевидно, что для более точной картины при обработке КТ необходимо применять методы лингвистического анализа, что на данном этапе в задачу авторов не входило. Однако сформированная БД и простой «ручной» анализ полученного ядра КТ позволяет сформировать список наиболее значимых терминов для их последующего включения в Энциклопедию и ЕЦПНЗ.

Работа выполнена в МСЦ РАН в рамках государственного задания по теме FNEF-2022-0014.

Литература

1. Антопольский А.Б., Каленов Н.Е., Серебряков В.А., Сотников А.Н. О едином цифровом пространстве научных знаний // Вестн. Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 7. С. 728–735. DOI: 10.31857/S0869-5873897728-735.

2. Савин Г.И. Единое цифровое пространство научных знаний: цели и задачи // Информационные ресурсы России. 2020. № 5. С. 3–5. DOI: 10.51218/0204-3653-2020-5-3-5.

3. Антопольский А.Б., Белоозеров В.Н., Каленов Н.Е., Маркарова Т.С. О развитии терминологической базы данных в виде комплекса отраслевых информационно-поисковых тезаурусов // Информационные ресурсы России. 2018. № 5. С. 22–30.

4. Антопольский А.Б., Белоозеров В.Н., Маркарова Т.С. О разработке онтологии на основе классификаторов научной информации и терминологических словарей // Информационные ресурсы России. 2017. № 5. С. 2–7.

5. Каленов Н.Е. Об одном подходе к формированию предметных онтологий различных областей науки // Научный сервис в сети Интернет: тр. XXII Всерос. науч. конф. 2020. С. 276–285. DOI: 10.20948/abrau-2020-14.

6. Каленов Н.Е. Технология наполнения предметных онтологий пространства научных знаний // Электронные библиотеки. 2021. Т. 24. № 1. С. 101–115. DOI: 10.26907/1562-5419-2021-24-1-100-115.

7. Светлов Н.Н. Алгоритм поиска ключевых терминов ВЕБ-страницы // Теория и практика современной науки. 2021. № 6. С. 438–440.

8. Гринева М., Гринев М. Анализ текстовых документов для извлечения тематически сгруппированных ключевых терминов // Тр. ИСП РАН. 2009. Т. 16. С. 155–165.

9. Барахнин В.Б., Ткачев Д.А. Классификация математических документов с использованием составных ключевых терминов // ЗОНТ: матер. Междунар. конф. 2009. С. 16–23.

10. Осипова И.А. Моделирование понятийного потенциала термина «Ключевые слова» // Вестн. ОГУ. 2010. № 11. С. 117–122.

11. Никулина М.А. К вопросу об истории становления ключевых терминов в сфере информационных технологий // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 3-2. С. 57–60.

12. Попова Л.А. Ключевые слова современности: проблема термина // Ученые записки Петрозаводского гос. ун-та. 2017. № 5. С. 93–97.

13. Писарев И.И. Сопоставительный анализ использования ключевых англоязычных и русскоязычных терминов политики групп интересов // Вестн. МГИМО-Университета. 2018. № 6. С. 212–241. DOI: 10.24833/2071-8160-2018-6-63-212-241.

14. Квасова М.А. Сравнительный анализ ключевых русских и французских терминов в области информационных технологий // Вестн. МГЛУ. 2014. № 9. С. 64–76.

15. Koch R. The 80/20 Principle: The Secret of Achieving More with Less. London, Nicholas Brealey publ., 1998, 302 p.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.420-427

Received 08.06.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 420–427

An automated system for key terms analysis

S.A. Vlasova [1], *Ph.D. (Engineering), Leading Researcher, svlasova@jscc.ru*
N.E. Kalenov [1], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher, nkalenov@jscc.ru*

[1] *Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences – JSCC, Moscow, 119334, Russian Federation*

Abstract. The paper describes the method proposed by the authors for forming an array of key terms that form the basis of subject ontology of the Common Digital Space of Scientific Knowledge and encyclopedias list of articles (slots) in a certain scientific direction.

The method is based on a frequency analysis of the occurrence of key terms in the articles published in leading scientific journals on this topic. The technique involves program processing of metadata of articles reflected in various databases, constructing rating lists of the frequency of occurrence of individual key terms and selecting the cores of such lists, which, in turn, can be considered as the basis for filling a subject ontology and forming encyclopedic slots.

To implement the methodology, the authors developed the corresponding database structure, software tools for filling it, processing and analyzing data. The paper presents the database description and the results of the practical implementation of the methodology based on processing several thousand articles from leading Russian journals in mathematics, informatics and physics (terms in Russian and English were identified and analyzed).

An assessment of the correspondence of key terms distribution frequencies and their constituent individual words to the Bradford law has shown significant discrepancies with this law in the case of key terms, but there was certain convergence when considering individual words and their permutation within key terms.

Keywords: key terms, article metadata, frequency analysis, database, automated system.

Acknowledgements. *The work was carried out at the JSC RAS within the framework of the state assignment on the topic FNEF-2022-0014.*

References

1. Antopolskii A.B., Kalenov N.E., Serebryakov V.A., Sotnikov A.N. Common digital space of scientific knowledge. *Vestn. Rossijskoj Akademii Nauk*, 2019, vol. 89, no. 7, pp. 728–735. DOI: 10.31857/S0869-5873897728-735 (in Russ.).
2. Savin G.I. Common digital space of scientific knowledge: Goals and tasks. *Information Resources of Russia*, 2020, no. 5, pp. 3–5. DOI: 10.51218/0204-3653-2020-5-3-5 (in Russ.).
3. Antopolskii A.B., Beloozerov V.N., Kalenov N.E., Markarova T.S. About development of terminological database in the form of a complex of branch information retrieval thesauruses. *Information Resources of Russia*, 2018, no. 5, pp. 22–30 (in Russ.).
4. Antopolskii A.B., Beloozerov V.N., Markarova T.S. On the development of ontology on the basis of classifiers of scientific information and terminological dictionaries. *Information Resources of Russia*, 2017, no. 5, pp. 2–7 (in Russ.).
5. Kalenov N.E. About one approach to the formation of subject ontologies for science various fields. *Proc. Sci. Conf. Scientific Service on the Internet*, 2020, pp. 276–285. DOI: 10.20948/abrau-2020-14 (in Russ.).
6. Kalenov N.E. Technology for filling subject ontologies of the scientific knowledge space. *RDLJ*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 101–115. DOI: 10.26907/1562-5419-2021-24-1-100-115 (in Russ.).
7. Svetlov N.N. Search algorithm for web-page keywords. *Theory and Practice of Modern Science*, 2021, no. 6, pp. 438–440 (in Russ.).
8. Grineva M., Grinev M. Parsing text documents to extract thematically grouped key terms. *Proc. of ISP RAS*, 2009, vol. 16, pp. 155–165 (in Russ.).
9. Barakhnin V.B., Tkachev D.A. Classification of mathematical documents using compound key terms. *Proc. Int. Conf. KONT*, 2009, pp. 16–23 (in Russ.).
10. Osipova I.A. Modeling the conceptual potential of the term Keywords. *Vestn. OSU*, 2010, no. 11, pp. 117–122 (in Russ.).
11. Nikulina M.A. On the issue of the history of key terms formation in the field of information technology. *Relevant Problems of the Humanities and Natural Sciences*, 2014, no. 3-2, pp. 57–60 (in Russ.).
12. Popova L.A. Key words of modern times: the issue of the term. *Proceedings of Petrozavodsk State University*, 2017, no. 5, pp. 93–97 (in Russ.).
13. Pisarev I.I. Comparative analysis of the key English and Russian language terms in studies of interest group politics. *MGIMO Review of International Relations*, 2018, no. 6, pp. 212–241. DOI: 10.24833/2071-8160-2018-6-63-212-241 (in Russ.).
14. Kvasova M.A. Comparative analysis of Russian and French key IT terms. *Vestn. of MSLU*, 2014, no. 9, pp. 64–76 (in Russ.).
15. Koch R. *The 80/20 Principle: The Secret of Achieving More with Less*. London, Nicholas Brealey Publ., 1998, 302 p.

Для цитирования

Власова С.А., Каленов Н.Е. Автоматизированная система анализа ключевых терминов // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 420–427. DOI: 10.15827/0236-235X. 139.420-427.

For citation

Vlasova S.A., Kalenov N.E. An automated system for key terms analysis. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 420–427 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.420-427.

УДК 519.688
DOI: 10.15827/0236-235X.139.428-437
Дата подачи статьи: 29.04.22
2022. Т. 35. № 3. С. 428–437

Автоматическое детектирование аудиодефектов с применением параллельных вычислений

А.А. Рыбаков [1], *к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, rybakov@jscc.ru*
С.А. Фрейлехман [1], *к.т.н., научный сотрудник, freysa@jscc.ru*

[1] *Межведомственный суперкомпьютерный центр (МСЦ) РАН – филиал ФНЦ Научно-исследовательский институт системных исследований (НИИСИ) РАН, г. Москва, 117218, Россия*

Работа посвящена исследованиям, направленным на автоматическое детектирование дефектов и аномалий, возникающих в цифровом сигнале аудиозаписи. Методы определения дефектов применяются, главным образом, при оцифровке аналоговых аудиозаписей и восстановлении поврежденных сигналов. Методы поиска аномалий имеют широкий спектр применения, включая разработку охранных систем и систем мониторинга окружающей обстановки, определение искусственно смонтированных записей, реставрацию и восстановление архивных аудиозаписей, имеющих культурную ценность для определенного временного промежутка развития и становления социального общества, борьбу с так называемыми дип-фейками, шифровку и расшифровку закодированной в аудиоданных секретной информации и многое другое.

Современные технологии и методики позволяют с высокой эффективностью устранять найденные дефекты путем математических манипуляций аудиоинженера с сигналом или с применением умных и адаптивных инструментов редактирования цифрового сигнала, однако для этого дефект должен быть точно детектирован и локализован, а также должны быть определены его тип и возможная природа возникновения.

Для решения задачи автоматического детектирования дефектов в цифровом сигнале аудиозаписи в рамках данной работы разработано специальное ПО, верифицированное на оцифрованных аудиозаписях различного качества. Так как цифровые медиаданные, к которым относятся аудиозаписи, характеризуются большим размером, при проведении анализа особую важность приобретает параллельная распределенная обработка. Разработанный программный код определения дефектов был модернизирован с учетом необходимости запуска на массивно-параллельных микропроцессорах Intel Xeon Phi Knights Landing и продемонстрировал высокую эффективность масштабирования.

Ключевые слова*: аудиозапись, дефект, аномалия, спектрограмма, Intel Xeon Phi.*

Большинство аудиозаписей используются не на аналоговых носителях, а в цифровом виде, представляя собой дискретные последовательности амплитуд звука, зафиксированные в отдельные моменты времени. Существует большое количество моделей и форматов кодирования звука в цифровом виде, отличающихся друг от друга точностью воспроизведения и размером аудиозаписи, среди них наиболее известны такие форматы, как MP3, WMA, FLAC и другие [1]. Основным методом обработки аудиосигналов является применение различных фильтров (фильтры ограничения полосы частот, присутствия, высоких и низких частот, плавного подъема/спада амплитудно-частотной характеристики и другие), которые используются для изменения частотных и фазовых характеристик, сужения или расширения динамического диапазона, применения амплитудной, частотной или фазовой модуляции, удаления шумов и многих других действий [2]. Использование цифровых форматов открыло широкие возможности по защите аудиозаписей, например, с помощью стеганографического метода, заключающегося в добавлении специальных цифровых зашифрованных меток в аудиозапись, которые невозможно обнаружить без специального ПО [3]. Также широко используется обработка звука в художественных целях – в современной музыке активно применяется наложение различных эффектов: искусственное эхо, компрессия звука, специальные искажения, дребезжание, замедление или ускорение звучания и многие другие [4]. Отдельной широкой областью обработки звука является распознавание звуковой информации, в основном человеческой речи [5], однако данная задача может быть применена к определению любых звуковых событий (звуки животного, разбитого стекла, оружейные выстрелы и прочее).

Кроме специально смоделированных и наложенных эффектов в аудиозаписях могут встречаться случайно появившиеся помехи и

нежелательные искажения. Наиболее частым источником искажений звука и аномалий являются оцифровка аналоговых записей либо дефекты записывающей аппаратуры (если запись ведется в изначально цифровом формате). Для борьбы с такими дефектами и аномалиями используется специальное ПО. Реализующее функционал по работе со звуком ПО широко распространено во всем мире, ярким примером являются продукты Adobe Audition, Audacity и многие другие. Данные инструменты позволяют редактировать и восстанавливать аудиозаписи, устранять повреждения. С их помощью профессиональный звукоинженер может качественно восстанавливать исходный цифровой сигнал [6] или изменять его объективные характеристики. Например, метод удаления шума из аудиосигнала [7] эффективно справляется с поставленной задачей, но лишь в том случае, когда заведомо известно о наличии данного дефекта, при этом проверка методом грубой силы каждого файла из архива может привести к значительным временным и ресурсным затратам. Для достижения положительного результата инженеру необходимо четко детектировать местонахождение дефекта и примерный вид повреждения сигнала, после чего он сможет приступить к работе по реставрации. При поиске аномалий, например, следов вмешательства в цифровой аудиосигнал [8] или необычных событий при работе систем мониторинга окружающей обстановки, также необходимо выполнять автоматическую проверку большого количества входных данных.

Данные потребности специалистов в области работы с цифровыми аудиофайлами демонстрируют актуальность исследований и разработок, направленных на автоматическое детектирование дефектов и аномалий в массиве данных большого объема (либо в режиме обработки аудиопотоков) за приемлемое время.

В рамках настоящего исследования было создано ПО, позволяющее автоматически определять наличие дефектов в цифровом сигнале (место их нахождения и тип) при анализе большого количества данных за разумное время и с допустимой точностью.

Выполнялись следующие задачи: анализ существующих исследований в области обработки цифровых сигналов, разработка программного кода по существующим и проверенным алгоритмам, разработка и тестирование собственных алгоритмов детектирования дефектов, формирование комплексного программного решения для детектирования аудиодефектов, применение параллельных вычислений для ускорения анализа аудиоданных при выполнении на массивно-параллельных микропроцессорах Intel Xeon Phi.

Исследуемые дефекты

Рассматривались дефекты следующих видов:

– щелчок (click) – короткий импульс интенсивности звука, возникший из-за некачественной склейки, статических щелчков, звуковых артефактов, чаще всего встречающихся, когда источником цифрового сигнала являются виниловые пластинки; также к ним относятся соприкосновение губ, цоканье языком и другие звуки, возникающие при работе с микрофоном и негативно влияющие на качество записи;

– глухая запись (muted) – эффект глухой записи, вызванный некорректной настройкой, режимом записи звука, неподходящим или дефектным устройством для снятия звука;

– эхо и реверберация (echo) – эффект, возникающий при попадании в приемник звука, отраженного от твердой и упругой поверхности, или созданный искусственно при обработке цифрового сигнала;

– рассинхронизация каналов звука (asnc) – нарушение синхронности стереозаписи, смещение фазы в одном из каналов;

– различия в силе звука в каналах (diff) – контроль за резкими изменениями в одном из каналов, выпадение звука, определение неестественных скачков силы звука;

– высокочастотный и низкочастотный гул, вызванный различными шумами, помехами и неполадками в электросети (hum, dense);

– перегрузка (overload) – превышение предела напряжения выходного усилителя питания, выражающееся в ограничении амплитуды сигнала;

– наличие цифровых копий фрагментов сигнала (dbl) – искусственное наложение сегмента сигнала или непроизвольное копирование данных на магнитной ленте.

Методы анализа дефектов

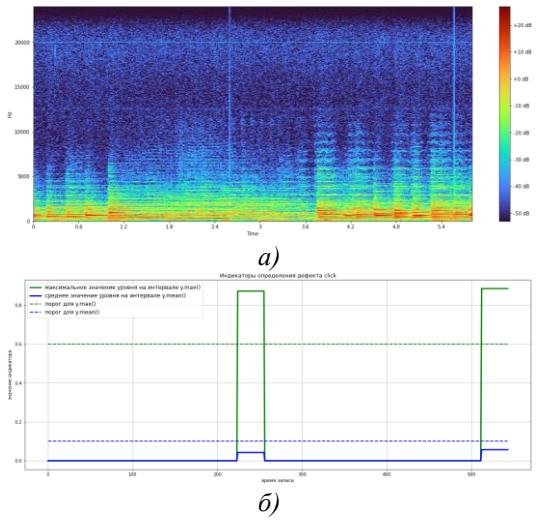
В рамках данного исследования разработано комплексное ПО, позволяющее пользователю обрабатывать массивы аудиоданных с целью детектирования дефектов. Входными данными являются коллекции аудиозаписей в формате wav [9], выходными – список описаний дефектов, каждое из которых состоит из

названия файла, номера канала, названия дефекта (если он был найден в этой записи), времени начала и конца дефекта, соответствующему примерному положению дефекта на временной шкале цифрового сигнала.

Во время работы программный комплекс последовательно выполняет поиск каждого дефекта и распараллеливает обработку аудиозаписи путем дробления файла аудиосигнала. Детектирование дефекта каждого из типов осуществляется отдельным методом. Ядро детектирования реализовано с использованием библиотеки librosa [10, 11] для языка программирования pyhton.

Метод **click** предназначен для поиска кратковременных забросов звука примерно одного уровня по всему спектру частот. На спектрограмме частот это выражается в виде тонких вертикальных полос (рис. 1а). Дефект может возникать из-за некачественной склейки, статических щелчков, артефактов звуков и по другим причинам.

Для поиска дефекта спектрограмма нормализуется таким образом, чтобы уровень звука изменялся в пределах [0.0, 1.0]. Далее для анализа берется только верхняя часть спектрограммы (так как она более разрежена в плане полезного звука) и с помощью оператора Собеля [12] на ней выделяются вертикальные границы.



а)

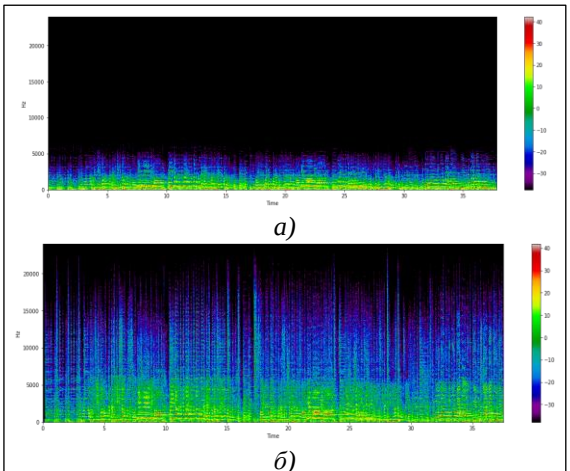
б)

Рис. 1. Цифровой сигнал с дефектом «треск, щелчок»: а) частотная спектрограмма сигнала, б) визуализация индикаторов детектирования дефекта

Fig. 1. Digital signal with a “crack, click” defect: a) a signal frequency spectrogram, б) visualization of defect detection indicators

Вывод о присутствии дефекта в записи делается на основании двух фактов: во-первых, максимальное значение уровня звука в некотором интервале, длина которого определяется настройками, превышает определенный порог (y.max() > Thr); во-вторых, среднее значение уровня звука в этом же интервале находится ниже второго порога (y.mean() < MeanThr). На рисунке 1б продемонстрирован факт регистрации двух щелчков, представленных на спектрограмме записи из рисунка 1а.

Метод **muted** предназначен для детектирования дефекта глухой записи, в которой на протяжении всего (или значительного) времени по каким-либо причинам отсутствуют верхние диапазоны частот (хотя они должны быть). То есть данный дефект характеризуется наличием пустых частот в верхнем диапазоне спектрограммы цифрового сигнала. Для сравнения глухой записи и исходного цифрового сигнала (не глухой записи) представлены две спектрограммы: глухой записи (рис. 2а) и исходного сигнала (рис. 2б).



а)

б)

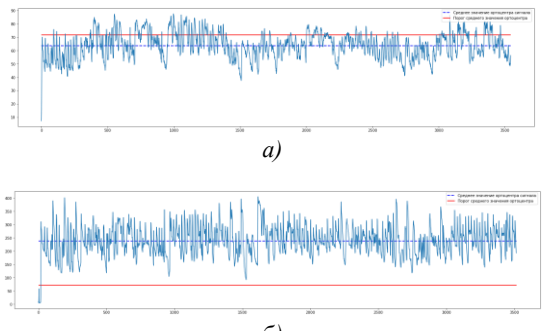
Рис. 2. Демонстрация частотной спектрограммы глухой записи: а) глухая запись, б) исходная запись

Fig. 2. Demonstration of a deaf recording frequency spectrogram: a) a deaf recording, б) the original recording

Обнаружение дефекта с использованием данного метода происходит по следующему алгоритму: решение о детектировании дефекта принимается на основе среднего значения ортоцентра нормализованной спектрограммы, при этом ортоцентр спектрограммы дает адекватное решение для участков тишины (ортоцентр на абсолютной тишине находится на уровне 50 %, что позволяет не трактовать

тишину как глухую запись), ортоцентр вычисляется из нормализованной спектрограммы прямым счетом. Причина глухоты записи не определяется.

Если ортоцентр цифрового сигнала ниже порогового значения, детектируется глухая запись, если выше – делается вывод об отсутствии исследуемого дефекта (рис. 3).



а)

б)

Рис. 3. Среднее значение ортоцентра: а) глухая запись, б) нормальная запись

Fig. 3. The orthocenter average value: a) a deaf recording, б) not a deaf recording

Метод **echo** предназначен для детектирования наличия эффекта эха в цифровом сигнале, содержащем голосовую активность человека, которое характеризуется как частичное последовательное повторение фрагмента цифрового сигнала, накладывающегося поверх основного сигнала.

Чтобы при анализе музыкальных композиций избежать ложных срабатываний, алгоритм данного модуля анализирует глобальное значение автокорреляционной функции для темпограммы цифрового сигнала, где высокое значение полученной средней величины свидетельствует о наличии сохранения темпа в записи (рис. 4). Это позволяет сделать вывод, что запись содержит музыку и велика вероятность ложного срабатывания, особенно в тех местах, где автор композиции намеренно использует эхо. Если был обнаружен данный устойчивый темп, делается вывод, что это музыка и запись не исследуется на наличие эха.

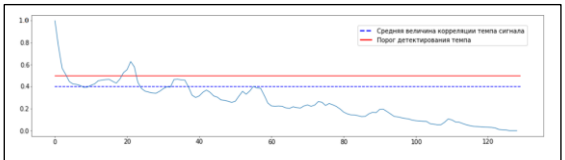


Рис. 4. Визуализация корреляции темпограммы

Fig. 4. Visualization of the terpogram correlation

Процесс детектирования исследуемого дефекта сводится к сканированию цифрового сигнала записи небольшими окнами для детектирования высокого уровня корреляции, и при его наличии фиксируется место обнаружения признаков наличия эффекта эха (рис. 5).

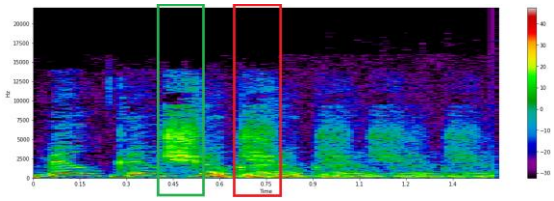


Рис. 5. Демонстрация двух окон на частотной спектрограмме с высоким значением корреляции (близким к единице)

Fig. 5. Demonstration of two windows on a frequency spectrogram with a high correlation value (close to unity)

Метод **asnc** предназначен для детектирования рассинхронизации двух каналов цифрового сигнала со смещением сигнала в одном из каналов (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/1.jpg). Исключением для этого метода являются записи, имеющие один канал – моно. Исследуемый дефект характеризуется несовпадением фаз воспроизведения каналов в цифровом сигнале.

Методом детектирования рассинхронизации решается задача определения дефекта на основе анализа коэффициента корреляции Пирсона [13]. На основании данного коэффициента могут быть приняты следующие решения: если коэффициент близок к 1.0, то имеет место дефект ложного стерео (данное событие не фиксируется, так как практически все аудиозаписи таковы); если коэффициент слишком низкий и положительный, то имеют место эффект сильного расхождения, плывущий звук, ощутимые выпадения звука, запись на слух явно дефектная; отрицательный коэффициент означает сдвиг по фазе между каналами.

Метод **diff** ориентирован на детектирование дефектов, связанных с расхождениями в каналах цифрового сигнала, которые можно обнаружить по среднему значению силы сигнала на нормализованной спектрограмме.

Метод позволяет детектировать резкое выпадение звука на одном из каналов (рис. 6), рассинхронизацию и другие значительные отклонения в звучании каналов.

Метод **hum** определяет наличие гула в сигнале. Источником гула чаще всего являются

различные шумы, наводки, помехи и неполадки в электросети. Подобный шум проявляется в низкочастотном диапазоне.

Увидеть гул на спектре можно при увеличении спектра в районе низких частот. Подобный негативный шум проявляется в виде серии горизонтальных линий, ярко выраженных в районе 50–60 Гц.

Детектирование дефекта гула с использованием данного метода на некоторой частоте определяется на достаточно продолжительном участке записи (в качестве эмпирической настройки была выбрана продолжительность 15 секунд) и характеризуется отношением 10-го и 55-го квантилей отсортированного сигнала на спектрограмме [14]. Скачок разности оригинального и сглаженного отношений сигнализирует о гуле (рис. 7).

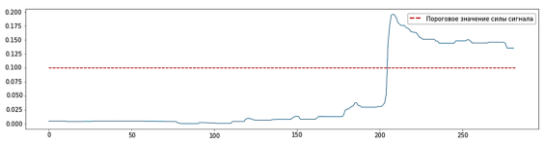


Рис. 6. Детектирование расхождения каналов записи

Fig. 6. Detecting the divergence of recording channels

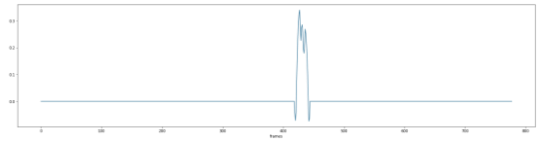


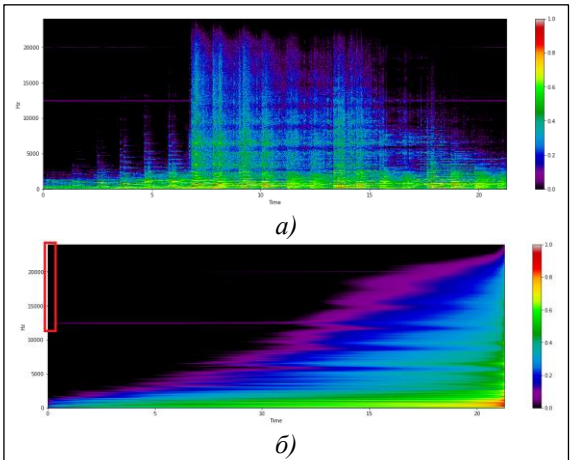
Рис. 7. Всплеск отфильтрованного значения интенсивности сигнала, характеризующий наличие hum-эффекта

Fig. 7. A spike in the filtered signal intensity value that characterizes the presence of the hum effect

Метод **dense** предназначен для детектирования высокочастотного гула в диапазоне частот от 12 000 Гц и выше (в основном в исследовании встречались записи с частотой гула до 20 000 Гц). Источником таких дефектов могут быть люминесцентные и флуоресцентные лампы, генераторы и микрофоны видеокамер, подключенных к той же электрической цепи, что и студийное оборудование.

На частотной спектрограмме такой гул проявляется в виде ровной и тонкой горизонтальной линии, проходящей в районе высоких частот на протяжении всей аудиозаписи (рис. 8а).

Данный метод работает с нормализованной частотной спектрограммой по верхним и нижним частотам: спектрограмма сортируется по интенсивности вдоль частот, это приводит к тому, что в верхних частотах остается ярко выраженная линия, характеризующая данный дефект. Детектирование дефекта происходит путем анализа отсортированной спектрограммы в верхних частотах на предмет наличия горизонтальных линий (рис. 8б), которые возникают там лишь в двух случаях – при наличии ярко выраженного высокочастотного гула или слишком короткой по времени записи, из-за чего после сортировки частот не произошло отсеивание всех прочих частот.



а)

б)

Рис. 8. Пример визуализации гула на частотной спектрограмме аудиозаписи: а) оригинальная спектрограмма записи, б) спектрограмма с отфильтрованными интенсивностями частот

Fig. 8. The example of hum visualization on the audio recording frequency spectrogram: a) the original recording spectrogram, б) a spectrogram with filtered frequency intensities

Метод **overload** предназначен для детектирования избыточной насыщенности интенсивности сигнала, вследствие чего возникает эффект перегрузки – срез амплитудных значений волны сигнала.

Основная идея алгоритма детектирования данного дефекта сводится к поиску самых высоких забросов интенсивности – громкости звука (рис. 9) и последующему анализу формы сигнала в этом месте: если будет найден срез амплитуды сигнала, то есть наклон касательной на всем исследуемом участке будет стремиться к нулю, то это перегрузка в явном виде.

Метод **dbl** предназначен для детектирования участков цифровой копии в сигнале. Дан-

ный дефект характеризуется наличием идентичной копии фрагмента цифрового сигнала (рис. 10).

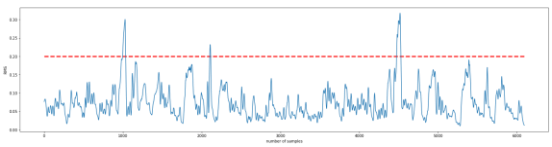


Рис. 9. Визуализация громкости цифрового сигнала тестовой записи с визуализацией порога детектирования высокого уровня интенсивности сигнала

Fig. 9. A volume visualization of the digital signal of the test recording with visualization of the threshold for detecting a high level of signal intensity

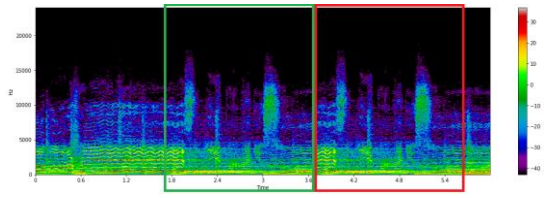
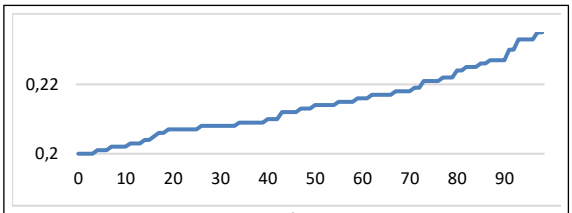
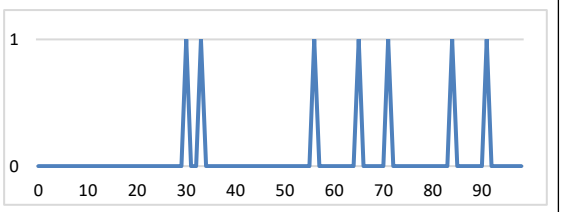


Рис. 10. Демонстрация двух идентичных фрагментов цифрового сигнала записи

Fig. 10. Demonstration of two identical fragments of the digital recording signal



а)



б)

Рис. 11. Визуализация маркеров детектирования дефекта: а) сто самых высоких амплитуд тестовой записи, б) пики, демонстрирующие наличие совпадающих последовательных амплитуд из списка ста высоких амплитуд записи

Fig. 11. A visualization of defect detection markers: a) one hundred highest amplitudes of the test recording, б) peaks demonstrate the presence of coincident consecutive amplitudes from the list of one hundred high amplitudes of the recording

Детектирование дефекта происходит следующим образом: если в цифровом сигнале присутствует идентичная копия фрагмента сигнала, то значения амплитуд в этих копиях фрагментов имеют значение корреляции, равное единице. Для минимизации числа проверок анализируются только часть амплитуд (самые большие амплитуды) – в отсортированном массиве самых высоких амплитуд (рис. 11а) ищется общее количество совпадений соседних пар (рис. 11б), а при слишком большом количестве таких пар принимается решение о наличии дефекта – цифровой копии.

ПО, реализующее вышеописанные методы обнаружения дефектов, тестировалось на коллекции аудиоданных оцифрованных записей. По результатам тестирования была собрана следующая статистика по потреблению ресурсов каждым из методов: muted – 39 %, echo – 17 %, hum – 10 %, click – 8 %, dense – 8 %, overload – 7 %, diff – 6 %, dbl – 4 %, asnc – 1 %. Данная статистика показывает, что наиболее требовательны к вычислительному времени дефекты обнаружения глухих записей, а также поиск эха.

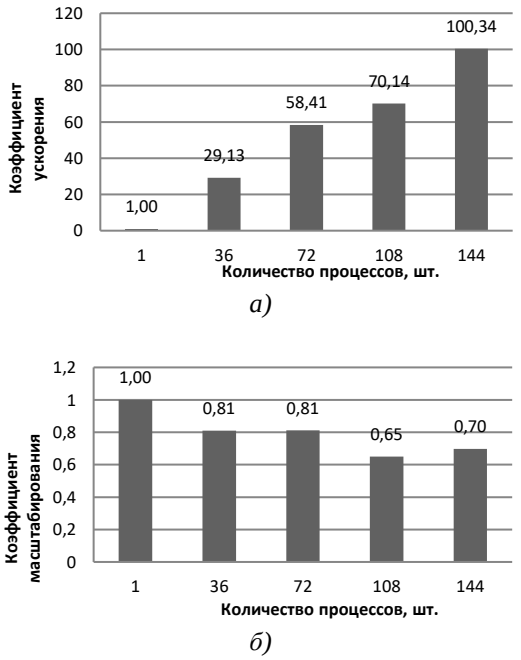
Для работы с архивами аудиоданных, суммарная длительность которых исчисляется часами или даже днями, важнейшее значение имеет параллельная реализация. Поэтому для работы с большими массивами данных было выполнено распараллеливание всех описанных выше методов определения дефектов для запуска на массивно-параллельных микропроцессорах Intel Xeon Phi.

Параллельные вычисления

Для реализации параллельных вычислений был разработан дополнительный функционал по распараллеливанию обработки с помощью библиотеки mpi4py [15, 16]. После считывания аудиозапись разделялась на отдельные фрагменты, каждый из которых анализировался в своем MPI процессе. Результаты анализа всех фрагментов комплексировались в единую структуру описания дефектов. Задача по поиску дефектов не является сильно связной (в процессе проведения анализа нет необходимости обмениваться данными между отдельными процессами), поэтому при распараллели-

вании вычислений ожидания от масштабирования задачи были высоки.

Параллельные запуски выполнялись на вычислительных ресурсах МСЦ РАН. Для тестирования параллельной версии кода были выбраны массивно-параллельные микропроцессоры с максимальным количеством вычислительных ядер, а именно вычислительные узлы сегмента МВС-10П МП2 KNL на базе микропроцессоров Intel Xeon Phi Knights Landing [17]. Каждый такой процессор содержит 72 вычислительных ядра, что позволяет использовать массивную параллельность вычислений. Были выполнены запуски на 36, 72, 108, 144 процессах при использовании одного или двух вычислительных узлов (для данной задачи межпроцессные обмены не имеют значения, поэтому большее количество узлов не рассматривалось). Во время запусков на одно вычислительное ядро не распределялось более одного процесса. Результаты запусков представлены на рисунке 12.



а)

б)

Рис. 12. Результаты тестирования программного комплекса: а) коэффициент ускорения, б) коэффициент масштабирования

Fig. 12. Software package testing results: a) an acceleration coefficient, б) a scaling factor

Во время запусков измерялись коэффициенты ускорения и масштабируемости вычислений относительно эталонного запуска на одном процессе (версия без распараллеливания). Данные коэффициенты вычислялись следующим образом. Если время анализа программным комплексом фиксированного множества входных данных при распараллеливании на n процессов обозначить через $T(n)$, то под коэффициентом ускорения понимается величина $s(n) = T(1)/T(n)$, а под коэффициентом эффективности масштабирования – величина $e(n) = s(n)/n$. Коэффициент эффективности масштабирования вычислений является удобной характеристикой, так как для идеального распараллеливания данный коэффициент точно равен единице [18]. Для рассмотренной задачи определения дефектов в аудиосигналах коэффициент эффективности масштабирования оказался достаточно высоким (0,7 для 144 MPI процессов), что позволяет применять разработанный программный комплекс на больших массивах данных.

Заключение

В результате анализа предметной области был выявлен ряд научных и профессиональных работ, посвященных нахождению и устранению аудиодефектов в цифровом сигнале.

Для детектирования исследуемых дефектов реализованы существующие алгоритмы и разработан ряд новых для повышения качества детектирования и снижения процентного соотношения ложного срабатывания различных методов детектирования при наличии или отсутствии в цифровом сигнале нескольких дефектов.

Результатом данной работы стало ПО, которое позволяет оперативно оценивать качество больших массивов оцифрованных аудиоданных, выявляя такие дефекты, как щелчок, глухая запись, эхо, рассинхронизация каналов звука и отдельных фрагментов в каналах звука, высокочастотный и низкочастотный гул, перегрузка, цифровые копии сигнала.

Для разработанного программного комплекса было выполнено распараллеливание, что позволило осуществлять параллельную обработку аудиоданных на массивно-параллельных микропроцессорах Intel Xeon Phi с высоким показателем эффективности масштабирования вычислений.

Работа выполнена в МСЦ РАН в рамках государственного задания по теме FNEF-2022-0016. В исследованиях использовался суперкомпьютер МВС-10П.

Литература

1. Nowak N., Zabierowski W. Methods of sound data compression – Comparison of different standards. Proc. XI Int. Conf. CADSM, 2011, pp. 431–434.

2. Абдуллаев У.М. Методы и алгоритмы обработки звуковых сигналов // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 20. № 6. С. 25–30. DOI: 10.33619/2414-2948/55/03.

3. Коробейников А.Г., Даурских А.Г., Павлова Н.В. Встраивание цифровых водяных знаков в аудиосигнал методом расширения спектра // Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО. 2009. № 1. С. 82–88.

4. Kot V. Digital sound effects echo and reverb based on non-exponentially decaying comb filter. Proc. XIV EUSIPCO, 2006, pp. 1–5.

5. Гаврилович Н.В., Сейтвелиева С.Н. Методы распознавания речи и их классификация // Таврический научный обозреватель. 2016. № 6. С. 206–212. URL: http://tavr.science/stat/2016/06/30-Gavrilovich.pdf (дата обращения: 01.04.2022).

6. Smith S.W. The Scientist and Engineer's Guide to DSP. CA, San Diego, California Technical Publ., 1999, 650 p.

7. Zoican S. Audio signals noise removal real time system. Proc. VIII Int Conf. on Communications, 2010, pp. 25–28. DOI: 10.1109/ICCOMM.2010.5509098.

8. Галяшина Е.И. Диагностика аутентичности цифровых фонограмм в фоноскопической экспертизе: возможности и пределы исследования // Вестн. экономической безопасности. 2018. № 1. С. 34–41.

9. Melnyk A., Shevchuk R., Sapozhnyk H. Multichannel mixing of speech signals accordant with the method of multistage mixing. Proc. Int. Conf. IEEE Cat. no. 02EX542, 2006, pp. 169–172. DOI: 10.1109/TCSET.2006.4404484.

10. McFee B., Raffel C., Liang D., Ellis D.P.W., McVicar M. et al. Librosa: Audio and music signal analysis in Python. Proc. XIV SCIPY, 2015, pp. 18–24. DOI: 10.25080/MAJORA-7B98E3ED-003.

11. Raguraman P., Mohan R., Vijayan M. Librosa based assessment tool for music information retrieval systems. Proc. II IEEE Conf. MIPR, 2019, pp. 109–114. DOI: 10.1109/MIPR.2019.00027.

12. Мартьянова А.В. Сравнительный анализ градиентных методов выделения границ для распознавания лиц // Безопасность информационного пространства: матер. Всерос. научн.-практич. конф. 2014. С. 39–45.

13. Наследов А.Д. Математические методы психологического исследования. Анализ и интерпретация данных. СПб: Речь, 2012. 392 с.

14. Brandt M., Bitzer J. Automatic detection of hum in audio signals. J. of the AES, 2014, vol. 62, no. 9, pp. 584–595. DOI: 10.17743/jaes.2014.0034.

15. Fink Z., Liu S., Choi J., Diener M., Kale L.V. Performance evaluation of Python parallel programming models: Charm4Py and mpi4py. Proc. IEEE/ACM VI Int. Workshop ESPM2, 2021, pp. 38–44. DOI: 10.1109/ESPM254806.2021.00010.

16. Smith R. Performance of MPI Codes written in Python with NumPy and mpi4py. Proc. VI Workshop PyHPC, 2016, pp. 45–51. DOI: 10.1109/PyHPC.2016.010.

17. Jeffers J., Reinders J., Sodani A. Intel Xeon Phi Processor High Performance Programming. Morgan Kaufmann Publ., 2016, 632 p.

18. Shabanov B.M., Rybakov A.A., Shumilin S.S., Vorobyov M.Yu. Scaling of supercomputer calculations on unstructured surface computational meshes. Lobachevskii J. of Math., 2021, vol. 42, no. 11, pp. 2571–2579. DOI: 10.1134/S1995080221110202.

Software & Systems Received 29.04.22
DOI: 10.15827/0236-235X.139.428-437 2022, vol. 35, no. 3, pp. 428–437

Automatic detection of audio defects using parallel computing

A.A. Rybakov [1], *Ph.D. (Physics and Mathematics), rybakov@jscc.ru, lead researcher*
S.A. Freylekhman [1], *Ph.D. (Engineering), freysa@jscc.ru, researcher*

[1] *JSCC RAS – Branch of SRISA RAS, Moscow, 117218, Russian Federation*

Abstract. The paper is devoted to research aimed at automatic detection of defects and anomalies that occur in the audio record digital signal. Defect detection methods are mainly used in digitizing analog audio records

and restoring damaged signals. Anomaly detection methods have a wide range of applications including the development of security and environmental monitoring systems, the identification of artificially edited records, restoration of archival audio recordings of cultural value for a certain time period of society development and formation, the fight against so-called deepfakes, encryption and decryption of classified information encoded in audio data and much more.

Modern technologies and techniques make it possible to efficiently eliminate the found defects by mathematical manipulation of the signal by an audio engineer or using smart and adaptive digital signal editing tools. However, for this purpose, the defect must be accurately detected and localized, its type and the possible origin must also be determined.

There is special software developed within the framework of this work to solve the problem of automatic detection of defects in a digital signal of an audio record. It was verified on digitized audio records of various quality. Since digital media data including audio records have a large size, the aspect of parallel distributed processing is of particular importance during the analysis. Due to this fact, the developed defect detection code was upgraded to take into account the need to run on Intel Xeon Phi Knights Landing massively parallel microprocessors and demonstrated high scaling efficiency.

Keywords: audio record, defect, anomaly, spectrogram, Intel Xeon Phi.

Acknowledgements. *The work has been done in the Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences within the framework of the state assignment on the topic FNEF-2022-0016.*
The research involved using the MVS-10P supercomputer.

References

1. Nowak N., Zabierowski W. Methods of sound data compression – Comparison of different standards. *Proc. XI Int. Conf. CADSM*, 2011, pp. 431–434.
2. Abdullayev U. Methods and algorithms sound signals processing. *Bull. of Science and Practice*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 25–30. DOI: 10.33619/2414-2948/55/03 (in Russ.).
3. Korobeynikov A., Daurskikh A., Pavlova N. Integration of digital watermarks into audio signal using the method of spectrum expansion. *Sci.Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.*, 2009, no. 1, pp. 82–88 (in Russ.).
4. Kot V. Digital sound effects echo and reverb based on non-exponentially decaying comb filter. *Proc. XIV EUSIPCO*, 2006, pp. 1–5.
5. Gavrilovich N.V., Seytvelieva S.N. Speech recognition methods and their classification. *Tauride Scientific Observer*, 2016, no. 6, pp. 206–212. Available at: http://tavr.science/stat/2016/06/30-Gavrilovich.pdf (accessed April 01, 2022) (in Russ.).
6. Smith S.W. *The Scientist and Engineer's Guide to DSP*. CA, San Diego, California Technical Publ., 1999, 650 p.
7. Zoican S. Audio signals noise removal real time system. *Proc. VIII Int Conf. on Communications*, 2010, pp. 25–28. DOI: 10.1109/ICCOMM.2010.5509098.
8. Galyashina E.I. Diagnostics of digital phonogram authenticity in phonoscopic examination: capabilities and limits of research. *Vestn. of Economic Security*, 2018, no. 1, pp. 34–41 (in Russ.).
9. Melnyk A., Shevchuk R., Sapozhnyk H. Multichannel mixing of speech signals accordant with the method of multistage mixing. *Proc. Int. Conf. IEEE Cat. no. 02EX542*, 2006, pp. 169–172. DOI: 10.1109/TCSET.2006.4404484.
10. McFee B., Raffel C., Liang D., Ellis D.P.W., McVicar M. et al. Librosa: Audio and music signal analysis in Python. *Proc. XIV SCIPY*, 2015, pp. 18–24. DOI: 10.25080/MAJORA-7B98E3ED-003.
11. Raguraman P., Mohan R., Vijayan M. Librosa based assessment tool for music information retrieval systems. *Proc. II IEEE Conf. MIPR*, 2019, pp. 109–114. DOI: 10.1109/MIPR.2019.00027.
12. Mart'yanova A.V. Comparative analysis of gradient methods of border selection for face recognition. *Proc. Sci-Pract. Conf. Information Space Security*, 2014, pp. 39–45 (in Russ.).
13. Nasledov A.D. *Mathematical Methods of Psychological Research. Data Analysis and Interpretation*. St. Petersburg, 2012, 392 p. (in Russ.).
14. Brandt M., Bitzer J. Automatic detection of hum in audio signals. *J. of the AES*, 2014, vol. 62, no. 9, pp. 584–595. DOI: 10.17743/jaes.2014.0034.
15. Fink Z., Liu S., Choi J., Diener M., Kale L.V. Performance evaluation of Python parallel programming models: Charm4Py and mpi4py. *Proc. IEEE/ACM VI Int. Workshop ESPM2*, 2021, pp. 38–44. DOI: 10.1109/ESPM254806.2021.00010.
16. Smith R. Performance of MPI Codes written in Python with NumPy and mpi4py. *Proc. VI Workshop PyHPC*, 2016, pp. 45–51. DOI: 10.1109/PyHPC.2016.010.

17. Jeffers J., Reinders J., Sodani A. *Intel Xeon Phi Processor High Performance Programming*. Morgan Kaufmann Publ., 2016, 632 p.

18. Shabanov B.M., Rybakov A.A., Shumilin S.S., Vorobyov M.Yu. Scaling of supercomputer calculations on unstructured surface computational meshes. *Lobachevskii J. of Math*., 2021, vol. 42, no. 11, pp. 2571–2579. DOI: 10.1134/S1995080221110202.

Для цитирования

Рыбаков А.А., Фрейлехман С.А. Автоматическое детектирование аудиодефектов с применением параллельных вычислений // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 428–437. DOI: 10.15827/0236-235X.139.428-437.

For citation

Rybakov A.A., Freylekhman S.A. Automatic detection of audio defects using parallel computing. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 428–437 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.428-437.

УДК 004.942
DOI: 10.15827/0236-235X.139.438-443
Дата подачи статьи: 05.07.22, после доработки: 11.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 438–443

Метод испытания радиолокационных станций с использованием беспилотного летательного аппарата и бортового оборудования

А.Л. Калабин [1], *д.ф.-м.н., зав. кафедрой программного обеспечения, akalabin@yandex.ru*
А.К. Морозов [1], *аспирант, yerdnavozorom@gmail.com*

[1] *Тверской государственный технический университет, г. Тверь, 170026, Россия*

Описанный в статье метод испытания радиолокационных станций с использованием беспилотного летательного аппарата и бортового оборудования разработан для управления движением беспилотного летательного аппарата (носителя) и сигналом с выхода бортового генератора таким образом, чтобы излучаемый сигнал соответствовал реальным условиям эксплуатации радиолокатора. Тестирование радиолокатора выполняется так же, как при облетном методе, но без использования реальных целей. Цифровое представление тестового сигнала рассчитывается бортовым вычислителем, и с помощью генератора и антенны излучается радиосигнал, соответствующий текущему режиму работы станции. Изменяя координаты и структуру излучаемого сигнала, можно контролировать угловые координаты, дальность и количество целей для испытываемого радиолокатора.

Предложенным методом можно проводить тестирование для определения различных характеристик локаторов. В работе приводятся результаты моделирования по определению характеристик программной модели локатора. Для моделирования также используется программная модель носителя. Моделирование заключается в том, что при изменении модельного времени изменяются координаты носителя и моделируемых целей, а программная модель локатора выполняет процедуру обнаружения в соответствии с заданными характеристиками. По окончании моделирования координаты носителя и моделируемых целей сопоставляются с координатами обнаруженных целей. По результатам сопоставления можно определить функциональные характеристики локатора.

Предлагаемый метод может быть полезен при проведении работ по подготовке к натурным испытаниям, а также для оценки характеристик, которые оценить традиционными методами затруднительно, например, при оценке разрешающей способности по дальности, предполагающей использование двух воздушных средств, расстояние между которыми должно уменьшаться, что потенциально увеличивает риск столкновения.

Ключевые слова: *программная модель, компьютерное моделирование, имитирование радиолокационной цели, беспилотный летательный аппарат, тестирование радиолокатора.*

Для испытания и подтверждения характеристик радиолокаторов часто используются испытательные стенды [1–3]. Они позволяют при приемлемых затратах ресурсов получать необходимую информацию об изделии [4, 5]. Например, при испытании датчиков автомобилей используются тестовые камеры с имитаторами, взаимодействующими с оборудованием автомобиля [2]. Требуемое воздействие на датчики определяется моделируемой дорожной ситуацией. Задача стенда – сформировать условия функционирования, приближенные к реальным для испытываемого изделия, путем генерации тестовых сигналов.

Подобным образом можно проводить испытания для наземных *радиолокационных станций* (РЛС). При испытании отдельно только приемников РЛС тестовые сигналы формируются на основе математической модели, учитывающей основные факторы [6]. Но есть факторы, для учета которых требуются значительные вычислительные мощности, например, отражения от земли, особенности рельефа, влияние погодных условий, электромагнитная обстановка в точке развертывания и другие. Поэтому для испытания наземных импульсных РЛС аппаратуру имитирования сигнала целей предлагается размещать на *беспилотном летательном аппарате* (БПЛА). В таком случае сигнал, излучаемый с борта носителя, принимается антенной РЛС с влиянием всех присутствующих факторов.

Суть разработанного метода заключается в том, чтобы с борта БПЛА излучать тестовый сигнал, соответствующий требуемым условиям испытаний. Контроль условий испытаний

выполняется за счет изменения координат носителя и структуры излучаемого сигнала. На рисунке 1 представлена схема проведения испытаний указанным методом.

Угловые координаты моделируемой цели определяются положением носителя:

$$\alpha_{мц} = \alpha_{н}, \varphi_{мц} = \varphi_{н}, \quad (1)$$

где $\alpha_{мц}$ – азимут моделируемой цели; $\varphi_{мц}$ – угол места моделируемой цели; $\alpha_{н}$ – азимут носителя; $\varphi_{н}$ – угол места носителя.

Дальность имитируемой цели складывается из расстояния проведения измерений и дальности, которую добавляет бортовое оборудование. Применительно к ситуации, представленной на рисунке 1, дальность имитируемой цели рассчитывается следующим образом [7]:

$$r_{мц} = r_{мц\,min} + \frac{t_{зг}c}{2}, \quad (2)$$

где $r_{мц}$ – дальность моделируемой цели; $r_{мцmin}$ – минимально возможная дальность моделируемой цели; $t_{зг}$ – время задержки, формируемое бортовым генератором; c – скорость света.

Минимально возможная дальность моделируемой цели складывается из текущего расстояния, на котором находится носитель с бортовым оборудованием, а также паузы, которую вносят вычислитель и схема синхронизации бортового оборудования с излучателем РЛС, и рассчитывается по формуле

$$r_{мц\,min} = r_{н} + \frac{t_{п}c}{2}, \quad (3)$$

где $r_{н}$ – текущее удаление носителя от РЛС; $t_{п}$ – пауза, вносимая запаздыванием сигнала синхронизации и работой вычислителя.

Таким образом, из выражений (2, 3) следует, что контроль дальности имитируемой цели можно осуществлять, добавляя время задержки для импульса, излучаемого бортовым генератором:

$$t_{зг} = \frac{2\left(r_{мц} - r_{н}\right)}{c} - t_{п}. \quad (4)$$

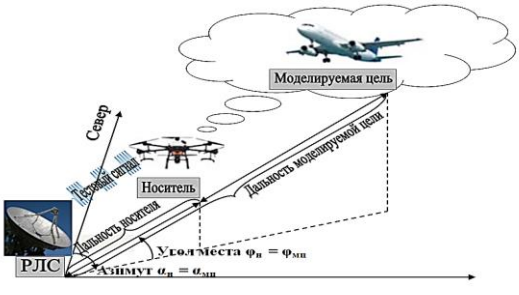


Рис. 1. Координаты имитируемой цели

Fig. 1. The coordinates of the simulated target

Указанным методом можно реализовать испытания по самым разнообразным сценариям в зависимости от того, какие характеристики необходимо измерить. Например, можно выполнить испытания для оценки возможностей по обнаружению целей для РЛС кругового обзора. Данный эксперимент иллюстрирует рисунок 2. Темным цветом обозначена траектория носителя, более светлым – траектории моделируемых целей.

Рис. 2. Схема проведения испытаний на оценку дальности с использованием нескольких моделируемых целей с изменением их угловых координат

Fig. 2. A scheme of testing for range estimation using several simulated targets with a change in their angular coordinates

В процессе испытаний носитель останавливается в заданной точке траектории и ждет прохождения луча РЛС на этих координатах, затем перемещается в следующее положение и опять ожидает. Таким способом носитель перемещается во все указанные точки траектории. Во время полета бортовое оборудование излучает сигнал, количество импульсов в котором соответствует требуемому количеству моделируемых целей, а время задержки каждого импульса требуемой дальности. По окончании испытаний на РЛС формируется файл с указанием координат обнаруженных целей, а оборудование носителя фиксирует в файл ожидаемые координаты моделируемых целей. Далее эти два файла сопоставляются и определяется адекватность функционирования РЛС. Было выполнено компьютерное моделирование с использованием разработанного приложения для планирования испытаний описываемым методом.

На рисунке 3 приведен снимок экрана приложения с изображением траектории облета БПЛА при проведении испытаний. В соответствии с заданной траекторией носитель будет перемещаться по дуге окружности радиуса 2 км.

На рисунке 4 изображены траектории моделируемых целей. Они, как и траектория носителя, являются дугами окружности, но с гораздо большим радиусом – от 40 до 180 км с шагом 2 км. Дальность целей во время испытаний будет определяться временем задержки излучаемых импульсов, а в приложении отображаются ожидаемые траектории целей.

На рисунке 5 представлено увеличенное изображение области карты, приведенной на рисунке 4. Здесь более четко видны траектории каждой из моделируемых целей (серые линии изображают ожидаемую траекторию каждой цели).

Ожидается, что при использовании БПЛА с программируемым генератором и приведенными траекториями облета можно измерить некоторые функциональные характеристики РЛС. Например, максимальную дальность обнаружения, разрешающую способность по дальности, ошибку определения азимута, угла места, дальности. Для оценки возможностей метода было выполнено моделирование для программной модели РЛС. Цель его – определение характеристик программной модели РЛС предлагаемым методом. В таблице приведены результаты моделирования.

Характеристики программной модели РЛС, полученные после обработки данных моделирования

Characteristics of the radar software model obtained after processing simulation data

Показатель	Значение	
	Заданное	Измеренное
СКО координаты азимут	0,25 ˚	0,25˚
СКО координаты угол места	0,25 ˚	0,24˚
СКО координаты дальность	100 м	101 м
Минимальная зафиксированная дальность	40 000 м	39 800 м
Максимальная зафиксированная дальность	180 000 м	179 500 м
СКО расстояния между соседними целями	2 000 м	2 020 м

По полученным результатам можно сделать вывод, что измеренные показатели достаточно близки к заданным. Это свидетельствует о целесообразности применения указанного метода для определения характеристик РЛС. Воз-

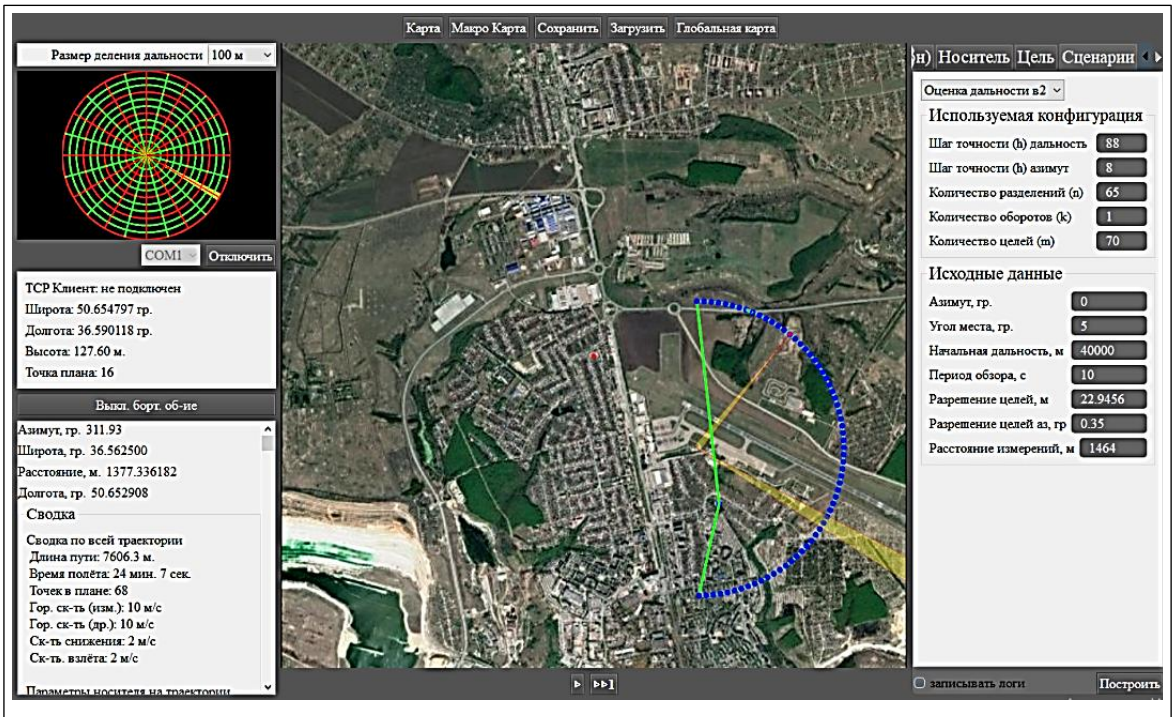


Рис. 3. Траектория полета носителя

Fig. 3. A carrier flight path

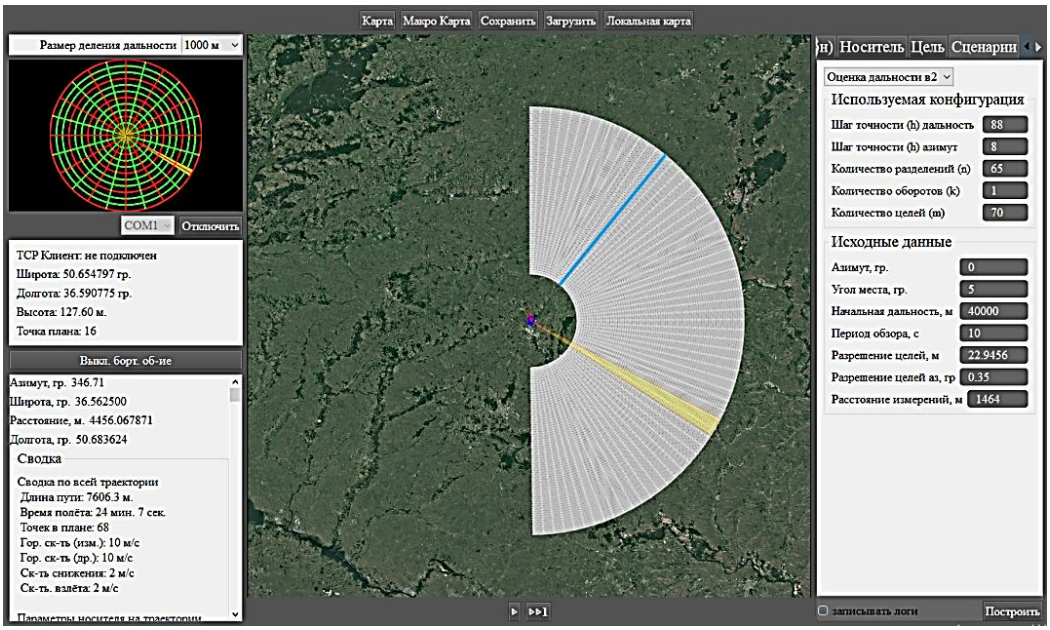


Рис. 4. Траектории полета для моделируемых целей

Fig. 4. Flight paths for simulated targets

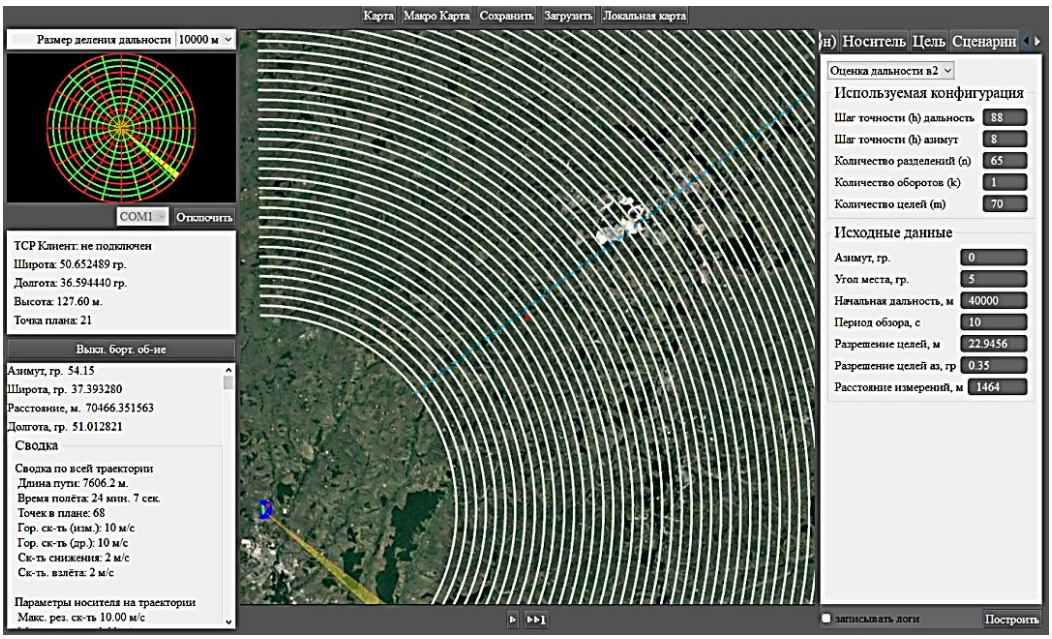


Рис. 5. Увеличенное изображение траекторий облета для моделируемых целей

Fig. 5. An enlarged image of flyby trajectories for simulated targets

можно измерение и других характеристик, например, разрешающая способность по дальности, по угловым координатам, точность определения координат.

Литература

1. Chan C.C., Kurnia F.G., Al-Hournani A. et al. Open-source and low-cost test bed for automated 5G channel measurement in mmWave band. J. Infrared Milli Terahz Waves, 2019, vol. 40, no. 5, pp. 535–556. DOI: 10.1007/S10762-019-00587-Z.

2. Gadringer M.E., Schreiber H., Gruber A. et al. Virtual reality for automotive radars. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 2018, vol. 135, no. 4-5, pp. 335–343. DOI: 10.1007/s00502-018-0620-9.

3. Vorderderfler M., Gadringer M.E., Schreiber H. et al. Frequency dividers in radar target stimulator applications. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, 2018, vol. 135, no. 4-5, pp. 344–351. DOI: 10.1007/s00502-018-0626-3.

4. Jarrar A., Balouki Y. Formal modeling of a complex adaptive air traffic control system. Complex Adaptive Systems Modeling, 2018, vol. 6, no. 1, art. 6. DOI: 10.1186/s40294-018-0056-4.

5. Merkulov V.I., Sadovskii P.A. Estimation of the range and its derivatives in an active two-position radar system. J. of Communications Technology and Electronics, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 346–353. DOI: 10.1134/S1064226918040083.

6. Costanzo S., Spadafora F., Borgia A., Moreno O.H., Costanzo A., Di Massa G. High resolution software defined radar system for target detection. In: Advances in Intelligent Systems and Computing, 2013, vol. 206, pp. 997–1005. DOI: 10.1007/978-3-642-36981-0_94.

7. Сколник М. Справочник по радиолокации. Ч. 1. М.: Техносфера, 2014. 672 с.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.438-443

Received 05.07.22, Revised 11.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 438–443

A method for testing radar stations using an unmanned aerial vehicle and airborne equipment

A.L. Kalabin [1], *Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department "Software", akalabin@yandex.ru*
A.K. Morozov [1], *Postgraduate Student, yerdnavozorom@gmail.com*

[1] *Tver State Technical University, Tver, 170026, Russian Federation*

Abstract. The paper proposes the modernization of the laboratory test method using an unmanned aerial vehicle, which houses a programmable generator with an on-board computer and other necessary auxiliary equipment. Radar testing is performed as in the flyby method but without using real targets. The essence of the method is to control the carrier's movement and the signal from the onboard generator output in such a way that the emitted signal corresponds to the actual radar operating conditions. The on-board computer calculates the test signal digital representation; a radio signal corresponding to the current operating mode of the station is emitted using a generator and an antenna. It is possible to control the angular coordinates, range and number of targets for the tested radar by changing the coordinates and structure of the emitted signal.

The proposed method can be used to test various characteristics of radars. The paper presents the results of modeling from determining the locator software model characteristics. The carrier's software model is also used for modeling. Modeling consists in the fact that when the model time changes, the coordinates of the carrier and the simulated targets change; the locator software model performs the detection procedure according to the specified characteristics. At the end of the simulation, the coordinates of the carrier and the simulated targets are compared with the detected target coordinates. Based on the comparison results, it is possible to determine the functional characteristics of the locator.

The proposed method can be useful in preparing for full-scale tests, as well as for evaluating characteristics that are difficult to evaluate by traditional methods, for example, when evaluating the range resolution, which involves the use of two aircrafts, the distance between which should decrease, which potentially increases the risk of collision.

Keywords: software model, computer simulation, radar target simulation, unmanned aerial vehicle, radar testing.

References

1. Chan C.C., Kurnia F.G., Al-Hournani A. et al. Open-source and low-cost test bed for automated 5G channel measurement in mmWave band. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2019, vol. 40, no. 5, pp. 535–556. DOI: 10.1007/S10762-019-00587-Z.

2. Gadringer M.E., Schreiber H., Gruber A. et al. Virtual reality for automotive radars. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2018, vol. 135, no. 4-5, pp. 335–343. DOI: 10.1007/s00502-018-0620-9.

3. Vorderderfler M., Gadringer M.E., Schreiber H. et al. Frequency dividers in radar target stimulator applications. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2018, vol. 135, no. 4-5, pp. 344–351. DOI: 10.1007/s00502-018-0626-3.

4. Jarrar A., Balouki Y. Formal modeling of a complex adaptive air traffic control system. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 2018, vol. 6, no. 1, art. 6. DOI: 10.1186/s40294-018-0056-4.

5. Merkulov V.I., Sadovskii P.A. Estimation of the range and its derivatives in an active two-position radar system. *J. of Communications Technology and Electronics*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 346–353. DOI: 10.1134/S1064226918040083.

6. Costanzo S., Spadafora F., Borgia A., Moreno O.H., Costanzo A., Di Massa G. High resolution software defined radar system for target detection. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2013, vol. 206, pp. 997–1005. DOI: 10.1007/978-3-642-36981-0_94.

7. Skolnik M. *Radiolocation Reference Guide*. *P. 1*. 2014, 672 p. (in Russ.).

Для цитирования

Калабин А.Л., Морозов А.К. Метод испытания радиолокационных станций с использованием беспилотного летательного аппарата и бортового оборудования // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 438–443. DOI: 10.15827/0236-235X.139.438-443.

For citation

Kalabin A.L., Morozov A.K. A method for testing radar stations using an unmanned aerial vehicle and airborne equipment. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 438–443 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.438-443.

УДК 004.89 : 531.31
DOI: 10.15827/0236-235X.139.444-451
Дата подачи статьи: 05.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 444–451

Компьютерное моделирование для интеллектуальной оценки динамического взаимодействия твердых тел

В.В. Мешков [1], *д.т.н., профессор, декан машиностроительного факультета, msf-tgtu@yandex.ru*
Н.Н. Филатова [1], *д.т.н., профессор кафедры информационных систем, nfilatova99@mail.ru*
Ю.А. Федосов [2], *к.т.н., старший научный сотрудник*

[1] *Тверской государственный технический университет, г. Тверь, 170026, Россия*
[2] *Центральный научно-исследовательский институт Воздушно-космических сил Минобороны России, НИЦ, г. Тверь, 170026, Россия*

В статье рассмотрена задача интегрирования результатов компьютерного моделирования с экспериментальными результатами динамического взаимодействия твердых тел с использованием цифровой обработки оптических и рентгеновских изображений для последующего анализа в информационной интеллектуальной системе.

Новизна заключается в способе оценки различий между результатами натурного и вычислительного экспериментов, основанного на использовании аппарата нечеткой логики и нечетких множеств, а также в процедуре перехода к индексной шкале при формировании общей оценки различий для множества точек соответствующих изображений. Предложена концепция и разработан алгоритм совместного кластерного анализа результатов рентгеновских и оптических исследований и результатов моделирования динамического взаимодействия тел.

Предложена верифицированная компьютерная модель оценки зоны динамического взаимодействия твердых тел. Обсуждены результаты моделирования гиперзвукового удара антропогенных частиц по модельным образцам и натурным элементам гибридной оболочки космического аппарата.

Компьютерная модель взаимодействия твердых тел позволяет изучать особенности сложных физических процессов, протекающих при ударе гиперзвуковой частицы в элемент космического аппарата, обосновывать состав и конструкцию реальных элементов космического аппарата и в определенных пределах прогнозировать его повреждение в зависимости от параметров элементов и антропогенных частиц. На основе результатов моделирования может быть сформирован банк данных, который расширит ограниченный набор результатов расчетно-экспериментального моделирования и натурных экспериментов. В целом результаты компьютерного моделирования позволяют подготовить научно-обоснованные исходные данные и рекомендации для разработки конструкции защиты и системы управления защитой перспективных космических аппаратов.

***Ключевые слова*:** *информационная система, кластерный анализ, верификация, компьютерное моделирование, динамическое взаимодействие*.

Значительная доля перспективной техники эксплуатируется в экстремальных условиях, в связи с этим возрастает роль изучения и оценки быстропротекающих процессов, в том числе динамического взаимодействия твердых тел при обеспечении функционирования летательных и *космических аппаратов* (КА).

Одной из актуальных проблем функционирования КА на низкой околоземной орбите является стойкость его элементов к повреждению при ударе антропогенными частицами, скорость которых может достигать нескольких км/с. Для изучения стойкости элементов КА к удару частиц используют экспериментальные и расчетные методы [1–3].

С целью повышения достоверности информации, используемой для повышения стойкости элементов КА, представляет интерес оценка возможности объединения результатов компьютерного моделирования процесса и экспериментов для последующего анализа с использованием методов искусственного интеллекта. Объединение информации о сложных физических процессах, полученной с помощью разных инструментальных средств, может быть реализовано при создании *информационной интегрированной системы моделирования* (ИИСМ) [4, 5].

Основная цель данной работы – интегрирование результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований для последующей интеллектуальной оценки процесса динамического взаимодействия твердых тел.

Задачи исследования состоят в оценке различий цифровых экспериментальных рентгеновских и оптических изображений процесса и результатов моделирования процесса с помощью методов нечеткой логики, а также в разработке компьютерной модели для оценки параметров зоны гиперзвукового взаимодействия тела с элементами, в ее верификации и анализе результатов моделирования.

Основными функциями ИИСМ являются аккумулирование и анализ информации, полученной с помощью различных видов моделирования (расчетно-экспериментального и компьютерного), которые будут использоваться при формировании формализованных гипотез о взаимосвязи входных и выходных переменных [5]. В состав ИИСМ входят три программно-методических комплекса, каждый из которых имеет свою БД: ПМК-1, ориентированный на решение задач расчетно-экспериментального моделирования; ПМК-2, решающий задачи компьютерного моделирования в программных средах; ПМК-3, осуществляющий обработку, сравнение и анализ результатов расчета и прогнозирования, полученных в ПМК-1 и ПМК-2, с помощью алгоритмов нечеткой логики. Задачи обработки результатов экспериментов, полученных расчетно-экспериментальным и компьютерным моделированием, решаются в комплексе ПМК-3, в состав которого входят БД с векторными моделями, построенными по результатам расчетно-экспериментального и компьютерного моделирования, а также расчетные модули, позволяющие анализировать результаты натурного и вычислительного экспериментов.

В данной работе рассмотрены особенности компьютерного моделирования динамического взаимодействия тел в комплексе ПМК-2 с учетом экспериментальных данных. Программный комплекс ПМК-2 представляет собой информационную интегрированную систему компьютерного моделирования и содержит модули расчета параметров процессов динамического взаимодействия твердых тел, модуль анализа результатов импульсной рентгенографии, модуль верификации модели, генератор отчетов и модуль формирования обучающих выборок (рис. 1). Основное назначение информационной системы компьютерного моделирования заключается в объединении результатов моделирования в программной среде с результатами эксперимента и генерации структур знаний.

Важным параметром компьютерной модели является достоверность описываемого ею сложного процесса динамического взаимодействия твердых тел.

Одной из главных целей совместного анализа результатов, полученных с помощью натурного и вычислительного экспериментов, является верификация компьютерной модели, реализуемой в программных средах. Моделирование взаимодействия твердых тел целесообразно осуществлять в программном продукте ANSYS, позволяющем решать сложные задачи нелинейной динамики [6, 7].

Для повышения достоверности результатов верификации компьютерных моделей сопоставляются форма и размеры облака частиц,

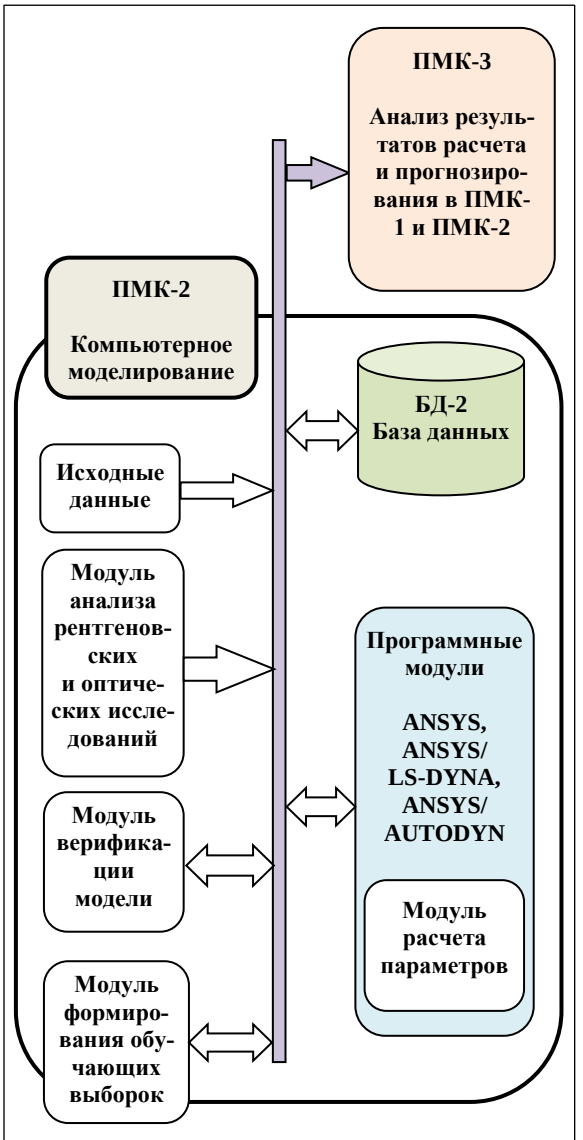


Рис. 1. Структура программного комплекса ПМК-2

Fig. 1. The structure of the PMK-2 software package

возникающего в процессе повреждения элементов и экранов, а также размеры и форма пробитых отверстий и повреждений, полученных экспериментально с помощью рентгеновского и оптического методов с количественными оценками этих параметров в компьютерной модели. Для оценки переменных величин использована лингвистическая шкала, включающая несколько нечетких значений [8–10].

Учитывая, что различия в результатах моделирования определяются с использованием множества точек соответствующих изображений, для формирования общей оценки использована процедура преобразования нечетких оценок в оценки по новой, так называемой индексной шкале [11]. Анализ показывает, что при переходе в индексную шкалу в числовом представлении сохраняется вся информация из лингвистической шкалы.

В качестве объекта анализа рассмотрена интегральная структура, объединяющая четыре элемента: $S = <R, F, D, T>$, где S – сцена, ситуация; $R = \{R(t_j), R(t_k)\}$ – рентгеновские изображения, полученные в ходе натурного эксперимента; $F = \{F\_Left, F\_Right\}$ – оптические изображения двух проекций одного фрагмента сцены; D – диаграммы, иллюстрирующие поведение объектов на сцене, полученные при компьютерном моделировании; T – параметры, определяющие условия постановки эксперимента и результирующие характеристики.

Для обобщения результатов и выбора наиболее перспективных областей в пространстве T использованы методы кластерного анализа [12, 13], позволяющие автоматизировать процесс выделения признаков, которые можно использовать как основания классификации. В качестве инструментального средства использован пакет Statgraphics Plus [14], реализующий иерархические методы кластерного анализа. Для анализа экспериментальных данных рентгенографических и оптических исследований применены методы Nearest Neighbor [12] и Ward'smethod [13], а также общая формула оценки расстояния между отдельными объектами – евклидово расстояние.

Сформированные в ходе анализа специальные диаграммы (дендрограммы и скатерограммы) позволяют визуально оценить характер распределения экспериментов в многомерном пространстве признаков. Пакет Statgraphics Plus позволяет регулировать размерность признакового пространства и формировать различные варианты кластеризации.

Применение кластерного анализа позволило перейти к планированию вычислительных экспериментов с учетом выявленных областей в многомерном пространстве, которые представлены кластерами малой размерности или иллюстрируют большой разброс в оценках целевых показателей. Он позволяет получить количественные оценки для обоснования предпочтения признаков, автоматизировать процесс их выделения и классификации, а также обосновать стратегию планирования компьютерного моделирования динамического взаимодействия тел.

Сравнение размеров произвольных отверстий или повреждений в элементе, зарегистрированных оптическим методом (рис. 2) и полученных при компьютерном моделировании, производится в комплексе ПМК-3.

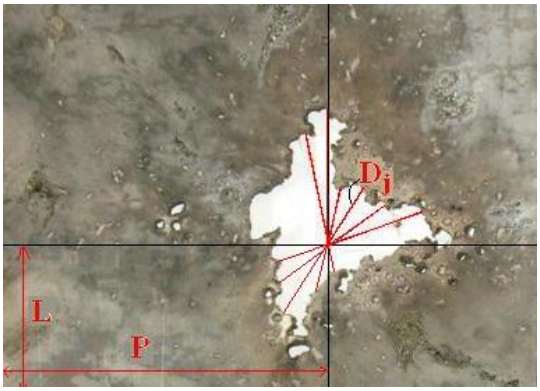


Рис. 2. Оптическое изображение элемента с пробитым отверстием сложной формы

Fig. 2. Optical image of an element with a punched complex shape hole

Для решения этой задачи используется новый алгоритм, основанный на нечетком логическом выводе. Основные этапы алгоритма сравнения параметров отверстий:

– приведение оптического изображения и изображения, полученного при компьютерном моделировании, к одному масштабу и формирование условной системы координат;

– оценка различий параметров отверстия для эксперимента и моделирования;

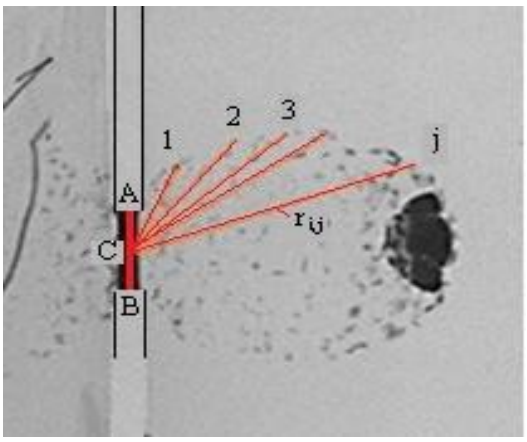
– выполнение процедуры фазификации, с помощью которой осуществляется переход к нечетким переменным;

– на основе анализа экспериментов с программой Fuzzy Logic Toolbox формулирование набора правил, с помощью которых делается качественная оценка различий отверстий, по-

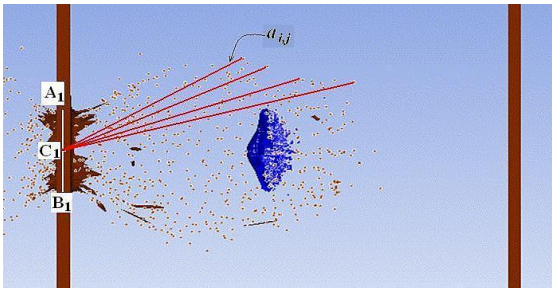
лученных в эксперименте и при моделировании.

Окончательный результат оценки различия отверстий формируется путем логического вывода с помощью алгоритма Мамдани [8].

Рассмотрим особенности алгоритма анализа облака осколков на примере сравнения изображений на рентгенограмме и изображения, полученного при компьютерном моделировании (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Сравнение изображений облака частиц при динамическом взаимодействии твердых тел, полученных а) методом рентгеновского анализа, б) путем компьютерного моделирования

Fig. 3. Comparing images of a cloud of particles during the dynamic interaction of solid bodies a) obtained by X-ray analysis, б) by computer simulation

Вследствие отсутствия четких границ изображений рентгеновских снимков использован аппарат нечетких множеств [8]. Контуры рентгеновского (R_i) и компьютерного (A_i) изображений приводятся к единому масштабу. Контур R_i разбивается метками на одинаковые сегменты (j = 1, 2, …, m). Каждая метка соединяется с центром пробитого отверстия (C). Таким образом, получаем множество векторов $\{r_{i,j}\}$, выходящих из общей точки C и покрывающих весь контур анализируемой фигуры. Совместив контуры R_i и A_i в точках $C = C_1$, можно получить соответствующее разбиение контура A_i на m сегментов и соответствующее множество векторов $\{a_{i,j}\}$. Сумма индексных оценок на множестве принята за общую оценку различия в размерах и форме двух анализируемых изображений.

Для анализа сравнения изображений использован следующий алгоритм:

– построение векторной сегментной диаграммы точек облака осколков в сечении в едином масштабе при одинаковых фиксированных значениях времени и пространственных координат;

– формирование множества индексных оценок, сумма которых принята за общую оценку различия в размерах и форме двух анализируемых изображений, при выполнении процедуры фазификации и переходе к индексной шкале;

– формулирование в программе основных правил оценки различия в размерах и форме изображений облака частиц.

В целом анализ результатов сравнения параметров экспериментальных оптических, рентгеновских и компьютерных изображений позволяет сделать вывод об удовлетворительном соответствии параметров сравниваемых изображений и возможности использования этой методики для описания динамического взаимодействия твердых тел.

Новизну представляет способ оценки различия между результатами натурного и вычислительного экспериментов, выполненных с использованием одинакового набора исходных данных. Способ основан на использовании аппарата нечетких множеств и нечеткой логики. Главное преимущество нечетких алгоритмов связано с переходом от количественных данных (оценки физических переменных по базовой шкале) к лингвистическим переменным. Интерпретация результатов исследования с использованием лингвистических переменных позволяет создавать структуры знаний, которые в дальнейшем будут востребованы при создании интеллектуальных систем анализа результатов моделирования.

Таким образом, предложена концепция и разработан алгоритм совместного кластерного анализа результатов рентгеноимпульсных и оптических исследований, а также результатов компьютерного моделирования динамического взаимодействия твердых тел. Анализ позволяет

получить количественные оценки для обоснования предпочтения признаков, автоматизировать процесс их выделения и классификации, а также обосновать стратегию планирования моделирования.

Динамическое взаимодействие твердых тел в условиях нестационарной нелинейной динамики характеризуется рядом параметров, изменяющихся во времени: высокой скоростью процессов, превышающей скорость распространения в телах упругих волн; сложным напряженно-деформированным состоянием тел; существенным изменением свойств материалов в зависимости от скорости деформации и температуры; подвижными границами контакта; фазовыми переходами и другими.

Для описания процесса динамического взаимодействия твердых тел использована известная модель сжимаемого упругопластического тела [1–3]. Основные соотношения, описывающие движение сжимаемой упругопластической среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются соотношениями Прандтля–Рейсса с учетом условия текучести Мизеса.

Для оценки взаимодействия тел по математической модели на основе определяющего уравнения Купера–Саймондса в программных средах ANSYS/LS-DYNA и ANSYS/AUTODYN использован метод конечных элементов.

Алгоритм вычислений в модели следующий:

– определение координат нового расположения каждого узла с учетом узловых скоростей с интегрированием по времени внутри шага;

– расчет плотности новых элементов и скорости деформации элементов, напряжений, деформаций, гидростатических напряжений, полей девиаторных напряжений, узловых сил на основе внутренних напряжений в элементе;

– приложение граничных условий и контактных сил к узлам;

– повторение процедуры до достижения заданного времени или предельного цикла.

В качестве модели разрушения и пластичности принята модель Джонсона–Кука, в которой динамический предел текучести варьируется в зависимости от деформации, скорости деформации и температуры, модель ударной адиабаты (ShockEOS) и осколочная модель разрушения Грэйди (GradySpall).

Как критерий разрушения используется сопряженная модель на базе кумулятивного закона накопления поврежденности, учитывающая исходные условия и условия разрушения в зависимости от температуры, скорости нагружения, прочностных свойств материалов и других факторов.

Для решения задач динамического взаимодействия твердых тел использован метод Лагранжа, выражающий дифференциальные уравнения сохранения массы, импульса и энергии процесса динамического взаимодействия твердых тел в лагранжевых координатах. При описании разрушения материала использована близкая к известному методу SPH функция эрозии конечных элементов с сохранением инерции, что предполагает моделирование процесса разрушения фрагмента материала на более мелкие частицы [15, 16].

Для описания контактного взаимодействия тел использована модель Trajectory, характеризующая относительную скорость поверхностей контакта и скорость изменения коэффициента трения.

Верификация модели проведена на основе серии экспериментов (более 100) для ряда модельных систем и натурных образцов КА. Так, для системы разнесенных металлических и композитных слоистых стенок (на основе углепластика и алюминиевого или титанового сплавов) она показала удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными: различие составило от 6,7 % до 21,3 % в зависимости от параметров динамического взаимодействия. Верифицированная модель позволяет изучать кинетику и стадии пробития стенок, разрушения ударного элемента и образования облака осколков при гиперзвуковом ударе, что является важным аспектом фундаментальной научной проблемы изучения механизма динамического взаимодействия твердых тел.

Наблюдаются деформация частицы и образование облака осколков из материалов стенок и частицы. Анализ кинетики этого процесса позволил сделать выводы:

– о существенных различиях в параметрах и механизме разрушения как металлических и композитных разнесенных преград, так и твердой частицы;

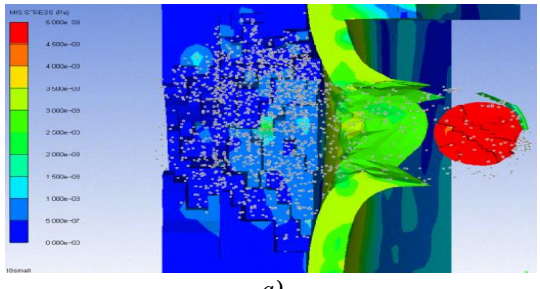
– о различиях в кинетике изменения кинетической энергии системы стенки – тело для разнесенных стенок: металлических и композитных (из углепластика и металла); увеличение скорости удара приводит к увеличению объема разрушений в стенках; наличие слоя углепластика, наоборот, способствует снижению разрушения частицы тела в процессе пробития и после пробития стенок.

На рисунке 4 в программной среде ANSYS/AUTODYN представлены фрагменты оценки

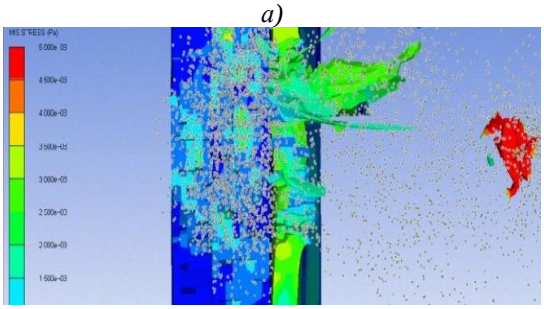
кинетики возникновения и распространения эквивалентных напряжений в теле и гибридном натурном элементе обшивки КА, представляющем собой конструкцию из последовательно расположенных двух слоев стеклопластика и армирующего слоя из алюминиевого сплава.

При увеличении скорости удара антропогенной частицы, моделируемой сферическим телом виз сплава ШХ15, максимальные эквивалентные напряжения в ударяющем теле достигают $\sigma_{экв}$ = 5 000 МПа, что в 2–3 раза превышает прочность сплава ШХ15 (рис. 4а). В результате происходит его интенсивное разрушение, начиная со второго слоя стеклопластика, путем дробления и образования облака с большим количеством осколков. Этот процесс интенсифицируется с ужесточением параметров взаимодействия, например, с увеличением скорости взаимодействия (рис. 4б).

При этом возникают температурные поля, которые изменяются в зависимости от параметров взаимодействия, например, максимальная температура тела может достигать 700 °С и выше. Анализ результатов показал, что температурный фактор оказывает существенное влияние на деформирование и разрушение тела.



а)



б)

Рис. 4. Кинетика возникновения и распространения эквивалентных напряжений в теле из сплава ШХ15 и элементе КА при скоростях взаимодействия: а) V=1465 м/с, б) V=2961 м/с

Fig. 4. Kinetics of the emergence and propagation of equivalent stresses in a ShKh15 alloy body and the spacecraft element at interaction velocities: a) V=1465 m/s, б) V=2961 m/s

Изучение особенностей сложных физических процессов, протекающих при ударе гиперзвуковой частицы в элемент КА, позволяет обосновать состав и конструкцию реальных элементов КА и в определенных пределах прогнозировать повреждение КА в зависимости от изменения материала, размеров и скорости антропогенных частиц и сформировать банк данных, который может уточняться и дополняться новыми данными.

Компьютерное моделирование позволяет также расширить ограниченный набор результатов расчетно-экспериментального моделирования и натурных экспериментов. В свою очередь, это позволяет разработать основы использования банка данных при создании защиты и систем управления защитой перспективных КА.

Заключение

В рамках информационной интегрированной интеллектуальной системы разработана структура и описаны функции программно-методического комплекса для компьютерного моделирования динамического взаимодействия твердых тел.

Предложены способ оценки различий между результатами натурного и вычислительного экспериментов, основанный на использовании аппарата нечеткой логики и нечетких множеств, а также оригинальная процедура перехода к индексной шкале при формировании общей оценки различий для множества точек соответствующих изображений. Применение аппарата нечеткой логики позволяет формировать обобщающие высказывания с оценками результатов моделирования, переходить от структур данных к структурам знаний, то есть к интеллектуальным технологиям анализа результатов экспериментов. Результаты могут быть использованы для разработки теоретических и прикладных основ построения интеллектуальной системы управления защитой перспективных КА от ударов антропогенных частиц.

В программной среде ANSYS в лагранжевой постановке на основе уравнений состояния, прочности и разрушения с применением опции сохранения импульса и учета контактных процессов разработана верифицированная компьютерная модель для оценки параметров зоны динамического взаимодействия твердых тел. Компьютерная модель может быть использована для изучения фундаментальных основ

динамического взаимодействия тел, а также для оценки и прогнозирования последствий динамического воздействия частиц в диапазоне скоростей и масс, недоступных в экспериментах, и проектирования перспективных систем защиты различных объектов, в том числе КА.

Литература

1. Герасимов А.В., Барашков В.Н., Глазырин В.П., Коняев А.А. и др. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2007. 572 с.

2. Schonberg W.P. Studies of hypervelocity impact phenomena as applied to the protection of spacecraft operating in the MMOD environment. Procedia Engineering, 2017, vol. 204, pp. 4–42. DOI: 10.1016/J.PROENG.2017.09.723.

3. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of debris particles on space structures modeling. Acta Astronautica, 2010, vol. 67, no. 3, pp. 333–343. DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.03.003.

4. Palyukh B.V., Meshkov V.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G. Fundamentals of intelligent system for estimation of dynamical interaction of space debris with spacecrafts. In: AISC, 2017, vol. 658, pp. 248–257. DOI: 10.1007/978-3-319-67349-3_23.

5. Meshkov V.V., Fedosov Yu.A., Filatova N.N. An integrated system for modeling hypervelocity interaction of solids. Acta Astronautica, 2021, vol. 178, pp. 606–615. DOI: 10.1016/J.ACTAASTRO.2020.09.047.

6. ANSYS/LS-DYNA User's Guide. 2011, 247 p. URL: https://bajatutor.net/wp-content/uploads/2017/04/ans_lsd.pdf (дата обращения: 14.05.2022).

7. LS-DYNA Theory Manual. 2006, 884 p. URL: https://lsdyna.ru/wp-content/uploads/2018/10/LS-DYNA-Theory-Manual.pdf (дата обращения: 14.05.2022).

8. Zimmermann H.-J. Fuzzy Set Theory and Its Applications. NY, Springer Dordrecht Publ., 2001, 315 p. DOI: 10.1007/978-94-010-0646-0.

9. Palyukh B.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G., Kozhukhin I.V. Forecasting of results of dynamic interaction between space debris and spacecrafts on the basis of soft computing methods. Proc. III Int. Sci. Conf. IITI, AISC, 2019, pp. 293–302. DOI: 10.1007/978-3-030-01818-4_29.

10. Amza C.G., Cicic D.T. Industrial image processing using fuzzy-logic. Procedia Engineering, 2015, vol. 100, pp. 492–498. DOI: 10.1016/J.PROENG.2015.01.404.

11. Миловидов А.А., Филатова Н.Н. Программный комплекс для лингвистической интерпретации графических зависимостей с нечеткими координатами // Программные продукты и системы. 2011. № 3. С. 110–114.

12. Kaufman L., Rousseeuw P.J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. Biometrics, 1991, vol. 47, no. 2, p. 788. DOI: 10.2307/2532178.

13. Everitt B.S., Landau S., Leese M. Cluster Analysis. London, John Wiley Publ., 2011, 357 p. DOI: 10.1002/9780470977811.

14. Пен Р. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion; [пер. с англ.]. Красноярск: Изд-во Сибирского гос. технологического ун-та, 2014. 291 с.

15. Liu M.B., Liu G.R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): An overview and recent developments. Arch. Comput. Methods Eng., 2010, vol. 17, pp. 25–76. DOI: 10.1007/S11831-010-9040-7.

16. Зеленцов В.В., Маханьков А.В. Численное моделирование методом SPH взаимодействия фрагментов космического мусора с элементами конструкций космических аппаратов // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 05. С. 42–56. DOI: 10.7463/0517.0001164.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.444-451

Received 05.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 444–451

Computer modeling for intelligent evaluation of dynamic interaction of solids

V.V. Meshkov [1], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, Dean of Mechanical Engineering Department, msf-tgtu@yandex.ru*
N.N. Filatova [1], *Dr.Sc. (Engineering), Professor of Information Systems Chair, nfilatova99@mail.ru*
Yu.A. Fedosov [2], *Ph.D. (Engineering), Senior Researcher*

[1] *Tver State Technical University, Tver, 170026, Russian Federation*
[2] *Tver Research Center of Central Science Research Institute of Aerospace Forces of the Ministry of Defense of Russia, Tver, 170026, Russian Federation*

Abstract. The paper considers the problem of integrating the computer modeling results with experimental results of dynamic interaction of solids using digital processing of optical and X-ray images for subsequent analysis in an information intelligent system.

The novelty is in the method of assessing the differences between the results of field and computational experiments based on use the fuzzy logic and fuzzy sets, as well as the procedure of switching to an index scale when

forming a general assessment of differences for a set of the corresponding image points. The authors propose a concept and a developed algorithm for the joint cluster analysis of the results of X-ray and optical studies and the results of modeling the dynamic interaction of bodies.

A computer model of solids interaction makes it possible to study the features of complex physical processes that occur when a hypersonic particle hits a spacecraft element, to substantiate the composition and design of real spacecraft elements, and to predict its damage depending on the parameters of elements and anthropogenic particles within certain limits. The simulation results can become a base for forming a data bank that will expand the limited set of results of computational and experimental modeling and field experiments. In general, the computer simulation results make it possible to prepare scientifically based initial data and recommendations for developing a protection design and a protection control system for an advanced spacecraft.

Keywords: information system, cluster analysis, verification, computer modeling, dynamic interaction.

References

1. Gerasimov A.V., Barashkov V.N., Glazyrin V.P., Konyaev A.A. et al. *Theoretical and Experimental Study of High-speed Interaction of Bodies*. Tomsk, 2007, 572 p. (in Russ.).

2. Schonberg W.P. Studies of hypervelocity impact phenomena as applied to the protection of spacecraft operating in the MMOD environment. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 204, pp. 4–42. DOI: 10.1016/J.PROENG.2017.09.723.

3. Smirnov N.N., Kiselev A.B., Kondratyev K.A., Zolkin S.N. Impact of debris particles on space structures modeling. *Acta Astronautica*, 2010, vol. 67, no. 3, pp. 333–343. DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.03.003.

4. Palyukh B.V., Meshkov V.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G. Fundamentals of intelligent system for estimation of dynamical interaction of space debris with spacecrafts. In: *AISC*, 2017, vol. 658, pp. 248–257. DOI: 10.1007/978-3-319-67349-3_23.

5. Meshkov V.V., Fedosov Yu.A., Filatova N.N. An integrated system for modeling hypervelocity interaction of solids. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 178, pp. 606–615. DOI: 10.1016/J.ACTAASTRO.2020.09.047.

6. *ANSYS/LS-DYNA User's Guide*. 2011, 247 p. Available at: https://bajatutor.net/wp-content/uploads/2017/04/ans_lsd.pdf (accessed May 05, 2022).

7. *LS-DYNA Theory Manual*. 2006, 884 p. Available at: https://lsdyna.ru/wp-content/uploads/2018/10/LS-DYNA-Theory-Manual.pdf (accessed May 05, 2022).

8. Zimmermann H.-J. *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. NY, Springer Dordrecht Publ., 2001, 315 p. DOI: 10.1007/978-94-010-0646-0.

9. Palyukh B.V., Kemaykin V.K., Kozlova Yu.G., Kozhukhin I.V. Forecasting of results of dynamic interaction between space debris and spacecrafts on the basis of soft computing methods. *Proc. III Int. Sci. Conf. IITI, AISC*, 2019, pp. 293–302. DOI: 10.1007/978-3-030-01818-4_29.

10. Amza C.G., Cicic D.T. Industrial image processing using fuzzy-logic. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 492–498. DOI: 10.1016/J.PROENG.2015.01.404.

11. Milovidov A.A., Filatova N.N. A software package for linguistic interpretation of graphical dependencies with fuzzy coordinates. *Software & Systems*, 2011, no. 3, pp. 110–114 (in Russ.).

12. Kaufman L., Rousseeuw P.J. Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. *Biometrics*, 1991, vol. 47, no. 2, p. 788. DOI: 10.2307/2532178.

13. Everitt B.S., Landau S., Leese M. *Cluster Analysis*. London, John Wiley Publ., 2011, 357 p. DOI: 10.1002/9780470977811.

14. Pen P. *Experiment Planning: Implementation in Statgraphics Environment*. Laplambert Academic Publ., 2014, 355 p. (Russ. ed.: Krasnoyarsk, 2014, 291 p.).

15. Liu M.B., Liu G.R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): An overview and recent developments. *Arch. Comput. Methods Eng*., 2010, vol. 17, pp. 25–76. DOI: 10.1007/S11831-010-9040-7.

16. Zelentsov V.V., Makhankov A.V. A SPH method-based numerical simulation of the space debris fragments interaction with spacecraft structure components. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2017, no. 05, pp. 42–56. DOI: 10.7463/0517.0001164. (in Russ.).

Для цитирования

Мешков В.В., Филатова Н.Н., Федосов Ю.А. Компьютерное моделирование для интеллектуальной оценки динамического взаимодействия твердых тел // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 444–451. DOI: 10.15827/0236-235X.139.444-451.

For citation

Meshkov V.V., Filatova N.N., Fedosov Yu.A. Computer modeling for intelligent evaluation of dynamic interaction of solids. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 444–451 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.444-451.

УДК 004.896, 519.876.5
DOI: 10.15827/0236-235X.139.452-457
Дата подачи статьи: 05.07.22, после доработки: 11.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 452–457

Применение искусственных нейронных сетей в системах автоматического управления магнитной левитацией

А.Г. Коробейников [1], *д.т.н., профессор, зам. директора по науке, Korobeynikov_A_G@mail.ru*

[1] *Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия*

В данной работе рассмотрена задача нейросетевой идентификации в системе автоматического управления магнитной левитацией (нейросетевой регулятор).

При проектировании систем автоматического управления сложными техническими динамическими объектами достаточно часто используют математический аппарат на базе искусственных нейронных сетей. Такие сети обладают уникальными преимуществами: возможностями проведения параллельных вычислений, нахождения ранее неизвестных взаимосвязей между входными и выходными последовательностями цифровых сигналов, обеспечения более эффективного управления нелинейными системами за счет применения нелинейных функций активации. Кроме того, применение искусственных нейронных сетей иногда снимает сложности, возникающие при описании некоторых задач в виде аналитических математических моделей.

Решение поставленной задачи осуществлялось на базе методов искусственного интеллекта – хорошо известных рекуррентных искусственных нейронных сетей NARX и LSTM. Обучение этих сетей производилось при помощи алгоритма обратного распространения и метода Левенберга–Марквардта, имеющих хорошую сходимость. Для данной задачи применение обученных искусственных нейронных сетей к тестовым данным показало некоторое преимущество сети NARX по сравнению с LSTM. Причем среднеквадратичная ошибка RSME для сети NARX с 50 скрытыми слоями для данной задачи меньше, чем для сети, имеющей 100 скрытых слоев.

Инструментальным средством для задания архитектуры нейронных сетей, их построения, обучения и тестирования являлась система MATLAB R2021b. Полученные результаты были применены при проектировании автоматических систем управления левитирующими объектами. В настоящее время большинство таких систем разрабатывают и применяют для осуществления перевозок товаров различного назначения, используя эффект магнитной левитации.

Ключевые слова: *искусственные нейронные сети, LSTM, NARX, машинное обучение, САУ, магнитная левитация, MATLAB*.

Сложности, возникающие при описании некоторых задач в виде аналитических математических моделей и при их решении, вызвали практический и теоретический интерес в предметной области, связанной с развитием методов и систем, которые взаимосвязаны с разными особенностями, возникающими при использовании методов искусственного интеллекта. К ним относят системы нечеткой логики, экспертных оценок, *искусственных нейронных сетей* (ИНС) и/или их интеграции [1, 2]. Возникающие в этих предметных областях задачи имеют ряд свойств, определяющих сложность их решения, таких как нелинейность математических моделей, неполнота знаний в протекающих процессах, сложность прогнозирования и ситуационного управления, случайный характер внешних воздействий.

При проектировании *систем автоматического управления* (САУ) *сложными техническими динамическими объектами* (СТДО) используют хорошо зарекомендовавший себя мощный математический аппарат на базе ИНС. Нейроуправление СТДО является одним из перспективных направлений, развивающихся на стыке теорий САУ и искусственного интеллекта.

По сравнению с классическими методами, применяемыми при разработке САУ СТДО, можно выделить следующие уникальные для используемых ИНС преимущества:

– проведение параллельных вычислений;

– нахождение ранее неизвестных взаимосвязей между входными и выходными последовательностями цифровых сигналов;

– обеспечение более эффективного управления нелинейными системами за счет применения нелинейных функций активации.

Такие преимущества вызывают большой научный интерес к постановке задач, связан-

ных с практическим применением нейроконтроллеров в САУ СТДО. Тем не менее необходимо отметить и основные недостатки ИНС:

– при обучении ИНС необходимо учитывать эффект переобучения, который может привести к нежелательному результату;

– применение немасштабированных данных на входе ИНС достаточно часто вызывает эффект насыщения, что приводит к нечувствительности ИНС;

– при использовании большого количества переменных ИНС, как правило, возникает эффект «проклятия размерности».

Однако правильный учет этих недостатков даст возможность успешно решить поставленную задачу.

Данная работа базируется на подражающем нейроуправлении [3–5]. Основная идея такого управления заключается в обучении нейроконтроллера на примере динамики обычного контроллера с обратной связью, а в качестве обучающей выборки берутся значения на входе и выходе контроллера. Выход является ожидаемой реакцией нейроконтроллера. Для оценки вектора состояния СТДО будут использованы ИНС модели нелинейной авторегрессии с экзогенными входами NARX (Nonlinear Autoregressive with Exogenous Inputs) и модели с долгой краткосрочной памятью LSTM (Long Short-Term Memory) [6, 7].

ИНС LSTM – разновидность архитектуры рекуррентных ИНС, предложенная в 1997 г. З. Хохрайтером и Ю. Шмидхубером [6]. Выбор для исследования LSTM-сети обусловлен ее способностью хорошо прогнозировать временные ряды в ситуациях разделения их значений временными лагами с точно неизвестной продолжительностью ключевых событий.

ИНС NARX тоже имеет архитектуру рекуррентных ИНС, называемых также динамическими моделями NARX [7]. Эти модели хорошо зарекомендовали себя при моделировании нелинейных систем. Кроме того, одним из основных приложений применения моделей NARX являются различные САУ. Анализ использования сетей NARX показывает, что наибольший эффект достигается в случаях, когда имеется зависимость прогнозируемых результатов от входных данных, существующих в предыдущие моменты времени [8].

В качестве объекта управления выбрана система магнитной левитации, являющаяся СТДО. Выбор обусловлен мировым трендом развития транспортных технологий [9–10]. Вычислительные эксперименты были проведены под управлением Windows 11 при помощи системы MATLAB, позволяющей решать задачи в различных предметных областях [11–13].

Постановка задачи

Целью данной работы является анализ результатов на предмет эффективности использования вышеназванных ИНС для случая САУ левитирующим телом, математическая модель которого имеет следующий вид [14]:

$$\dot{X} = \begin{pmatrix} \frac{dx_1(t)}{dt} \\ \frac{dx_2(t)}{dt} \\ \frac{dx_3(t)}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L}x_1(t) + \frac{1}{L}u(t) \\ x_3(t) \\ g - \frac{k_m}{m}\left(\frac{x_1(t)}{x_2(t)}\right)^2 - \frac{k_D}{m}x_3(t) \end{pmatrix},$$

где $x_1(t)$ – ток; $x_2(t)$ – вертикальное расстояние от центра левитирующего тела до подложки; $x_3(t)$ – вертикальная скорость левитирующего тела; $u(t)$ – управление; t – время; g – ускорение свободного падения; k_D – коэффициент демпфирования; m – масса левитирующего тела; k_m – постоянный коэффициент, зависящий от параметров катушки; L и R – соответственно индуктивность и сопротивление катушки.

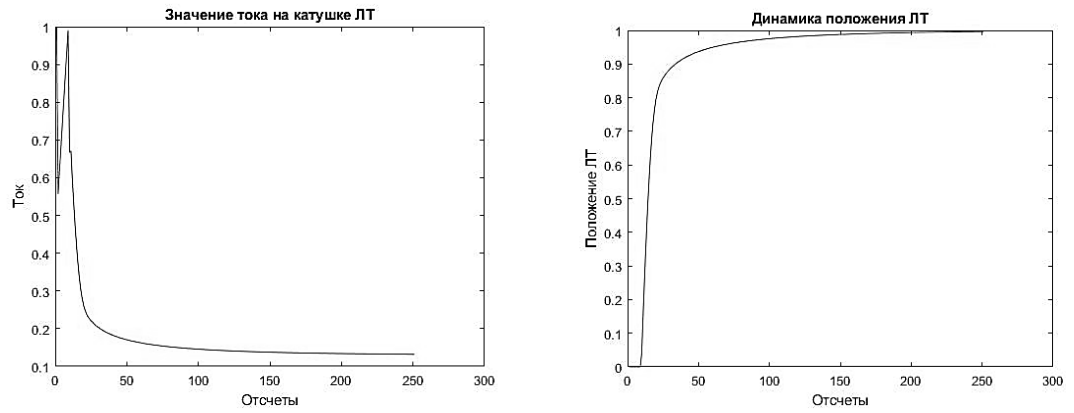
В результате компьютерного моделирования рассчитаны нормализованные значения тока и положения левитирующего тела, графики которых представлены на рисунке 1.

На этих данных необходимо произвести обучение ИНС NARX и LSTM, а затем сравнить результаты.

Создание, обучение и результаты применения обученных нейронных сетей

Сначала создадим и обучим ИНС LSTM с числом скрытых слоев, равным 50 и 100. Кроме этого, зададим величины для прогноза и учета предыдущих значений. В системе MATLAB это можно сделать, например, при помощи следующих операторов:

```
my_Maglev_numFeatures = 1;
my_Maglev_numResponses = 1;
my_Maglev_numHiddenUnits = 50; %100
my_Maglev_layers = [ ...
    sequenceInputLayer(my_Maglev_numFea-
tures)
    lstmLayer(my_Maglev_numHiddenUnits)
    fullyConnectedLayer(my_Maglev_numRe-
sponses)
    regressionLayer];
```



а) *б)*

Рис. 1. Нормализованные значения в зависимости от отсчета: а) величины тока на катушке, б) положения левитирующего тела

Fig. 1. Normalized values depending on the reading: a) the magnitude of the current on the coil, б) the levitating body position

Далее проведем обучение этой сети на 250 эпохах (итерациях) с числом скрытых слоев numHiddenUnits = 50 и numHiddenUnits = 100. Результаты моделирования для numHiddenUnits = 100 представлены на рисунке 2.

Результаты моделирования показали, что при numHiddenUnits = 100 сеть обучается лучше. Для этих данных обученная ИНС LSTM на тестовых данных выдает среднеквадратичную ошибку RSME = 0.0597, для numHiddenUnits = 50, RSME = 0.0728.

Теперь создадим и обучим ИНС NARX с числом скрытых слоев, равным 50 (100). В системе MATLAB это можно сделать, например, при помощи следующих операторов:

```
my_MagLev_net = narxnet(1:5,1:5,
my_Maglev_numHiddenUnits);
[my_MagLev_net,my_MagLev_tr]=train(my_Mag-
Lev_net,my_MagLev_Xs,my_MagLev_Ts,…
          my_MagLev_Xi,my_MagLev_Ai);
```

Структура ИНС NARX с 50 скрытыми слоями и результаты обучения этой ИНС представлены на рисунке 3.

Обучение проводилось при помощи алгоритма оптимизации Левенберга–Марквардта, являющегося модификацией стандартного ал-

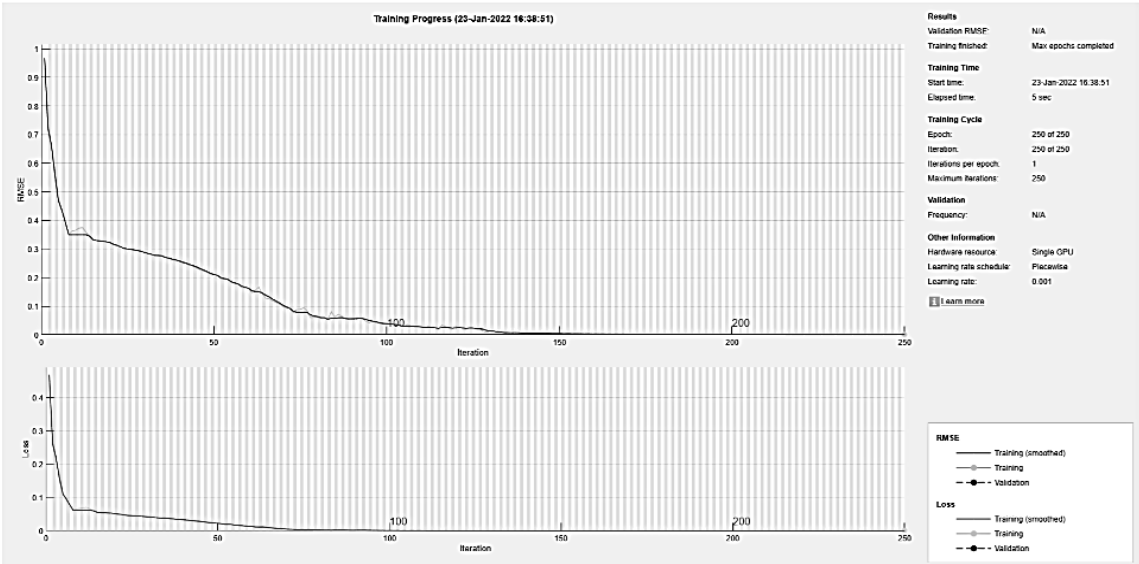


Рис. 2. Обучение ИНС LSTM с числом скрытых слоев, равным 100

Fig. 2. Training LSTM artificial neural network with 100 hidden layers

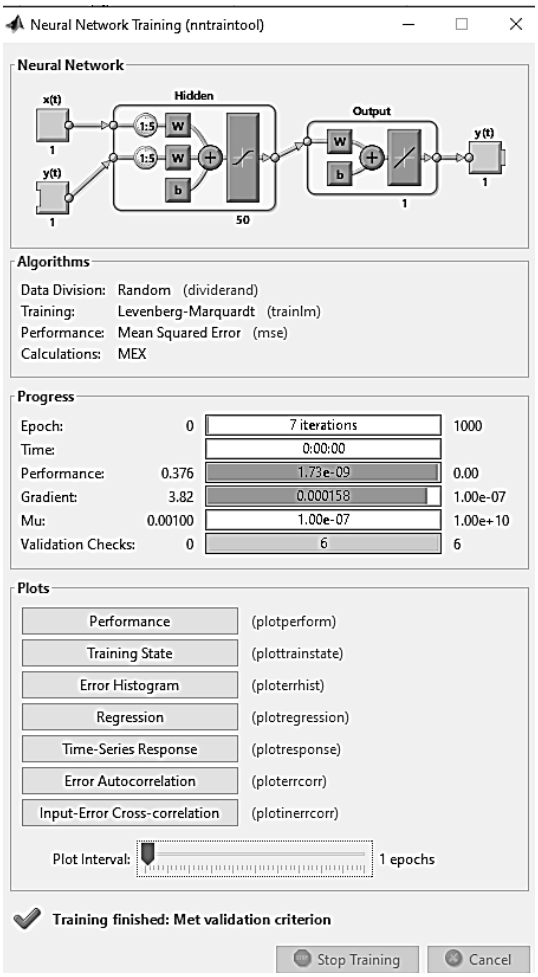


Рис. 3. Результаты обучения ИНС NARX с 50 скрытыми слоями

Fig. 3. The training results of NARX artificial neural network with 50 hidden layers

горитма обратного распространения [15]. Результат в виде графика применения обученной ИНС NARX с числом скрытых слоев, равным 50 (рис. 4), можно получить при помощи оператора plotresponse(my_MagLev_Ts,my_MagLev_Y).

В ходе проведения компьютерного моделирования получены следующие результаты: для ИНС LSTM при количестве скрытых слоев 50 RSME равно 7.28e-02, при 100 – 5.97e-02, для

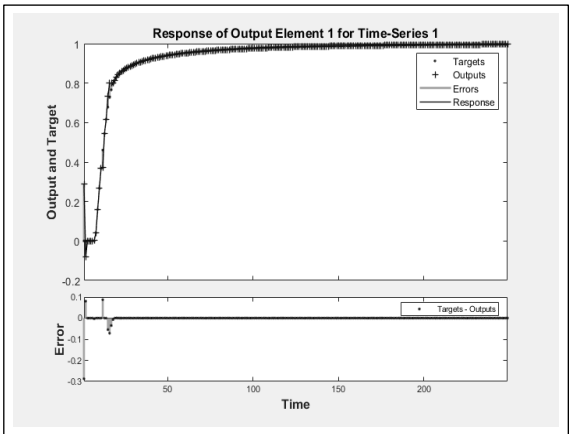


Рис. 4. Результаты применения обученной ИНС NARX, имеющей 50 скрытых слоев

Fig. 4. The results of using the trained NARX artificial neural network with 50 hidden layers

ИНС NARX при количестве слоев 50 RSME равно 4.2559e-04, при 100 – 5.6e-03.

Выводы

Анализ представленных результатов показал, что ИНС NARX лучше подходит для САУ магнитной левитации. Кроме того, величина среднеквадратичной ошибки и время обучения для ИНС NARX с 50 скрытыми слоями меньше, чем у ИНС NARX, имеющей 100 скрытых слоев. Поэтому рекомендуется выбирать для рассмотренной задачи ИНС NARX с 50 скрытыми слоями.

В заключение следует отметить, что в данной работе решалась конкретная задача, связанная с нейроуправлением. В общем же случае существует множество нерешенных в этой области задач, например, отсутствие универсальной процедуры анализа устойчивости нелинейных нейроконтроллеров. Известны лишь частные решения для некоторых видов нейроконтроллеров, причем с известной математической моделью объекта управления. Таким образом, можно сделать вывод об актуальности исследований в данной области.

Литература

1. Мунтян Е.Р. Использование нечетких GH-моделей для представления сложных технических систем // Информатизация и связь. 2021. № 3. С. 55–60. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-55-60.

2. Колоденкова А.Е., Верещагина С.С., Мунтян Е.Р. Разработка единой интеллектуальной системы поддержки принятия решений для диагностирования электротехнического оборудования промышленности // Сб. тр. XIII ВСПУ. 2019. С. 1874–1878.

3. Zhang Y., Wang J. Recurrent neural networks for nonlinear output regulation. Automatica, 2001, vol. 37, no. 8, pp. 1161–1173. DOI: 10.1016/S0005-1098(01)00092-9.

4. Omidvar O., Elliott D.L. Neural Systems for Control. NY, Academic Press Publ., 1997, 358 p. DOI: 10.1016/b978-0-12-526430-3.x5000-4.

5. Sigeru O., Marzuki K., Rubiyah Y. Neuro-control and its Applications. Springer Publ., 1996, 255 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-3058-1.

6. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. Neural Computation, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.

7. Diaconescu E. The use of NARX neural networks to predict chaotic time series. WSEAS Trans. Comp. Research, 2008, vol. 3, no. 3, pp. 182–191.

8. Boussaada Z., Curea O., Remaci A., Camblong H., Bellaaj N.M. A nonlinear autoregressive exogenous (NARX) neural network model for the prediction of the daily direct solar radiation. Energies, 2018, vol. 11, no. 3, art. 620. DOI: 10.3390/en11030620.

9. Зайцев А.А., Соколова Я.В., Фиронов А.Н. Магнитная левитация – мировой тренд транспортных технологий // Железнодорожный транспорт. 2019. № 3. С. 54–58.

10. Лапидус Б.М., Мачерет Д.А. Перспективная топология высокоскоростной транспортной системы с использованием вакуумно-левитационных технологий // Транспорт Российской Федерации. 2018. № 1. С. 15–21.

11. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Y., Velichko E.N., Aleksanin S.A. et al. Calculation of regularization parameter in the problem of blur removal in digital image. Optical Memory and Neural Networks, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 184–191. DOI: 10.3103/S1060992X16030036.

12. Коробейников А.Г., Кутузов И.М. Алгоритм обфускации // Кибернетика и программирование. 2013. № 3. С. 1–8. DOI: 10.7256/2306-4196.2013.3.9356.

13. Korobeynikov A.G., Fedosovsky M.E., Zharinov I.O., Shukalov A.V., Gurjanov A.V. Development of conceptual modeling method to solve the tasks of computer-aided design of difficult technical complexes on the basis of category theory. Int. J. of Applied Engineering Research, 2017, vol. 12, no. 6, pp. 1114–1122.

14. Коробейников А.Г. Проектирование математической модели системы автоматического управления магнитной левитации // Междунар. журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 12-2. С. 15–26.

15. Rubio J.d.J. Stability analysis of the modified Levenberg–Marquardt algorithm for the artificial neural network training. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, vol. 32, no. 8, pp. 3510–3524. DOI: 10.1109/TNNLS.2020.3015200.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.452-457

Received 05.07.22, Revised 11.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 452–457

Applying artificial neural networks in automatic control systems for magnetic levitation

A.G. Korobeynikov [1], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director on Scientific, Korobeynikov_A_G@mail.ru*

[1] *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences St.-Petersburg Filial, 199034, Russian Federation*

Abstract. This paper considers the problem of neural network identification in the automatic control system for magnetic levitation (neural network controller). This problem is due to the fact that at present, it is typical to use a mathematical apparatus based on artificial neural networks when designing automatic control systems for complex technical dynamic objects. Such networks have the following unique advantages: the possibility of parallel computing; finding previously unknown relationships between input and output sequences of digital signals; more efficient control of nonlinear systems using nonlinear activation functions. In addition, the use of artificial neural networks sometimes removes the difficulties that arise when describing some problems in the form of analytical mathematical models.

This paper describes the solution for the problem based on artificial intelligence methods – well-known recurrent artificial neural networks NARX and LSTM. These networks were trained using the backpropagation algorithm and the Levenberg–Marquardt method, which have good convergence. For this problem, the application of trained artificial neural networks to test data has shown some advantage of the NARX network compared to LSTM. Moreover, the RSME rms error for the NARX network with 50 hidden layers for this problem is less than for the network with 100 hidden layers.

The MATLAB R2021b system was a tool for setting the architecture of neural networks, their construction, training and testing. The obtained results are applied in designing automatic control systems for levitating objects. Currently, most of these systems are being developed and used to transport goods for various purposes using the effect of magnetic levitation.

Keywords: artificial neural networks, LSTM, NARX, machine learning, ACS, magnetic levitation, MATLAB.

References

1. Muntyan E.R. Using fuzzy GH-models to represent the complex technical systems. *Informatization and Communication*, 2021, no. 3, pp. 55–60. DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-3-55-60 (in Russ.).
2. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S., Muntyan E.R. Development of a unified intelligent decision support system for diagnosing electrical equipment in the industry. *Proc. XIII All-Russ. Conf. on Management Problems*, 2019, pp. 1874–1878 (in Russ.).
3. Zhang Y., Wang J. Recurrent neural networks for nonlinear output regulation. *Automatica*, 2001, vol. 37, no. 8, pp. 1161–1173. DOI: 10.1016/S0005-1098(01)00092-9.
4. Omidvar O., Elliott D.L. *Neural Systems for Control*. NY, Academic Press Publ., 1997, 358 p. DOI: 10.1016/b978-0-12-526430-3.x5000-4.
5. Sigeru O., Marzuki K., Rubiyah Y. *Neuro-control and its Applications*. Springer Publ., 1996, 255 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-3058-1.
6. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
7. Diaconescu E. The use of NARX neural networks to predict chaotic time series. *WSEAS Trans. Comp. Research*, 2008, vol. 3, no. 3, pp. 182–191.
8. Boussaada Z., Curea O., Remaci A., Camblong H., Bellaaj N.M. A nonlinear autoregressive exogenous (NARX) neural network model for the prediction of the daily direct solar radiation. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 3, art. 620. DOI: 10.3390/en11030620.
9. Zaitsev A.A., Sokolova Ya.V., Fironov A.N. Magnetic levitation as a global trend in transport technologies. *Railway Transport*, 2019, no. 3, pp. 54–58 (in Russ.).
10. Lapidus B.M., Macheret D.A. Perspective topology of a high-speed transport system using vacuum levitation technologies. *Transport of the Russian Federation*, 2018, no. 1, pp. 15–21 (in Russ.).
11. Korobeynikov A.G., Grishentsev A.Y., Velichko E.N., Aleksanin S.A. et al. Calculation of regularization parameter in the problem of blur removal in digital image. *Optical Memory and Neural Networks*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 184–191. DOI: 10.3103/S1060992X16030036.
12. Korobeinikov A.G., Kutuzov I.M. Obfuscation algorithm. *Cybernetics and Programming*, 2013, no. 3, pp. 1–8. DOI: 10.7256/2306-4196.2013.3.9356 (in Russ.).
13. Korobeynikov A.G., Fedosovsky M.E., Zharinov I.O., Shukalov A.V., Gurjanov A.V. Development of conceptual modeling method to solve the tasks of computer-aided design of difficult technical complexes on the basis of category theory. *Int. J. of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 6, pp. 1114–1122.
14. Korobeynikov A.G. Designing a mathematical model of a magnetic levitation automatic control system. *Int. J. of Humanities and Natural Sciences*, 2021, no. 12-2, pp. 15–26 (in Russ.).
15. Rubio J.d.J. Stability analysis of the modified Levenberg–Marquardt algorithm for the artificial neural network training. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, vol. 32, no. 8, pp. 3510–3524. DOI: 10.1109/TNNLS.2020.3015200.

Для цитирования

Коробейников А.Г. Применение искусственных нейронных сетей в системах автоматического управления магнитной левитацией // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 452–457. DOI: 10.15827/0236-235X.139.452-457.

For citation

Korobeynikov A.G. Applying artificial neural networks in automatic control systems for magnetic levitation. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 452–457 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.452-457.

УДК 632.151+630*587+004
DOI: 10.15827/0236-235X.139.458-465
Дата подачи статьи: 26.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 458–465

Контрольно-пиксельно-кластерный алгоритм оценки воздействия химических загрязнений на лесные массивы по спутниковым фотоизображениям

В.П. Мешалкин [1,2], *академик РАН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой логистики и экономической информации, clogist@muctr.ru*
О.Б. Бутусов [1,2], *д.ф.-м.н., профессор, butusov-1@mail.ru*
Р.Р. Кантюков [3], *к.т.н., докторант*
Т.Б. Чистякова [4], *д.т.н., профессор, зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования и управления*

[1] *Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, 125480, Россия*
[2] *Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, 119071, Россия*
[3] *Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ, Московская обл., г.о. Ленинский, п. Развилка, 142717, Россия*
[4] *Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, 190013, Россия*

В статье предложен оригинальный контрольно-пиксельно-кластерный алгоритм оценки воздействия химических загрязнений на лесные массивы по спутниковым фотоизображениям. В нем использована адаптивная процедура модифицированного классического алгоритма К-средних для уточнения информации о расположении контрольных пикселей на фотоизображениях различных зон химических загрязнений. Информация представлена в виде адаптивно изменяющихся наборов расположения контрольных пикселей, что позволяет получать более точное расположение зон химических загрязнений лесных массивов.

Разработка контрольно-пиксельно-кластерного алгоритма основана на предпосылке о возможности использования дополнительной априорной информации о контрольных пикселях на спутниковых фотоизображениях, расположенных в различных экологических зонах, что позволяет корректировать мозаичные структуры и площади экологических зон с учетом дополнительной информации.

Алгоритм основан на модифицированном классическом алгоритме К-средних, в который в качестве параметров дополнительно введены весовые коэффициенты и контрольные пиксели, что обеспечивает более точную привязку результатов кластеризации к экологическим зонам.

Объектом практического применения предложенного алгоритма являются многоканальные спутниковые изображения земных ландшафтов, каждый пиксель которых представляет собой вектор яркостей элементов ландшафта в различных спектральных каналах. Комбинируя эти каналы, можно получать специализированные изображения земной поверхности, характеризующие конкретные эколого-биологические свойства растительного покрова. Например, комбинируя красный и ближний инфракрасный спектральные каналы, можно преобразовать многоканальное изображение в одноканальное, известное как NDVI (нормализованный разностный индекс растительности). Большинство аналогичных комбинаций, предназначенных для выделения специализированных эколого-биологических характеристик растительного покрова, называются вегетационными индексами.

Преобразование исходных спектральных каналов в вегетационные индексы приводит к изображениям, в которых каждый пиксель является вектором вегетационных индексов. При этом в алгоритмах кластеризации используются различные метрики для вычисления расстояний между пикселями.

Предложенный алгоритм позволяет более точно вычислять суммарные площади экологических зон лесных массивов, что может быть предложено в качестве основы для оценки степени экологической деградации лесов и величины экологических ущербов, нанесенных лесным массивам химическими загрязнениями промышленных предприятий.

Ключевые слова: *вегетационный индекс, контрольный пиксель, лесной массив, многоканальность фотоизображения, кластер, спектральный канал, предприятие, металлургический комплекс, химическое загрязнение.*

При разработке методов комплексной оценки воздействия химических загрязнений промышленных предприятий на окружающую среду, в частности, на лесные массивы, как комплексные индексы состояния окружающей среды считается, что наиболее эффективной является оценка в виде величины ущерба, нанесенного биомассе лесной растительности выбросами промышленных предприятий [1–3].

Под воздействием химических загрязнений нарушаются сложные биологические циклы в лесных массивах, в результате чего происходят явные физиономические изменения, такие как дехромация, дефолиация и изреживание древостоя. Существует возможность дистанционной дешифровки физиономических нарушений состояния лесных массивов по *спутниковым фотоизображениям* (СФИ) [4, 5]. Для дешифровки СФИ применяются методы кластерного анализа, результаты которого зависят от количества информации, используемой при кластеризации. Для увеличения количества информации применяются методы объединения информации из разных источников, получившие название data fusion [6–10]. При этом необходимо учитывать, что разные виды лесных массивов по-разному реагируют на химические загрязнения [2, 3]. Это обусловливает необходимость использования для оценки экологического ущерба лесным массивам от химических загрязнений нечетких методов [8, 9, 11, 12] теории «доза–эффект» зависимостей и экологического зонирования [1–3].

Для выделения экологических зон предлагается вариант метода data fusion, основанный на использовании дополнительной информации в виде весовых коэффициентов и контрольных пикселей [6–10]. Контрольные пиксели представляют собой точки на СФИ, принадлежность которых экологическим зонам известна заранее либо в результате наземных исследований, либо из анализа статистических данных или данных лесоустройства [1, 2].

В работе [1] систематизированы алгоритмы на основе использования следующих современных методов цифровизации: фрактально-статистические методы анализа кластерной структуры СФИ, методы вейвлет-преобразования СФИ лесных массивов, текстурные методы анализа СФИ, нейросетевые методы анализа, нечетко-логические алгоритмы, алгоритмы генерализации и интегральной оценки экологического состояния лесных массивов, алгоритмы определения «доза–эффект» зависимостей, алгоритмы экологического зонирования лесных массивов. Данные методы и основанные на них интеллектуально-вычислительные алгоритмы позволяют получать в результате пиксельного анализа СФИ более точную конфигурацию мозаики экологических зон и, как следствие, более точные экономические оценки ущербов, нанесенных химическими загрязнениями окружающей среды [1, 2].

Предпосылки разработки алгоритмов управляемого кластерного анализа

Рассмотрим сущность алгоритма управляемого кластерного анализа, блок-схема которого изображена на рисунке 1. Характерная особенность алгоритма – применение при кластеризации контрольных пикселей на СФИ, что позволяет управлять процессом определения кластеров с использованием известной априорной информации о принадлежности контрольных пикселей различным кластерам экологических зон.

Алгоритм является развитием классического алгоритма К-средних [13, 14]. При этом в классический функционал метода наименьших квадратов вводятся дополнительные слагаемые и параметры, описывающие влияние весовых коэффициентов и контрольных пикселей на решение задачи оптимизации. Для кластеризации пикселей на СФИ в классическом алгоритме К-средних необходимо указать количество кластеров, максимальное число итераций и точность решения задачи.

В дополнение к классическому алгоритму К-средних в предложенном управляемом контрольно-пиксельно-кластерном алгоритме необходимо дополнительно указать весовые коэффициенты кластеров и контрольные пиксели, в результате чего изменяется вид целевой функции. Также в алгоритмах кластеризации необходимо выбрать метрику для расчета критерия подобия (сходства) между кластерными пикселями [15, 16], например, расстояние Евклида, Минковского, Манхэттеновское и др.

В классическом итерационном алгоритме К-средних [14] решается задача квадратичной безусловной оптимизации с выходом итерационного процесса на установившийся режим. В контрольно-пиксельно-кластерном алгоритме в целевую функцию добавлено слагаемое, минимизирующее отклонение контрольных пикселей от центроидов. В результате внесенных изменений модернизированная целевая

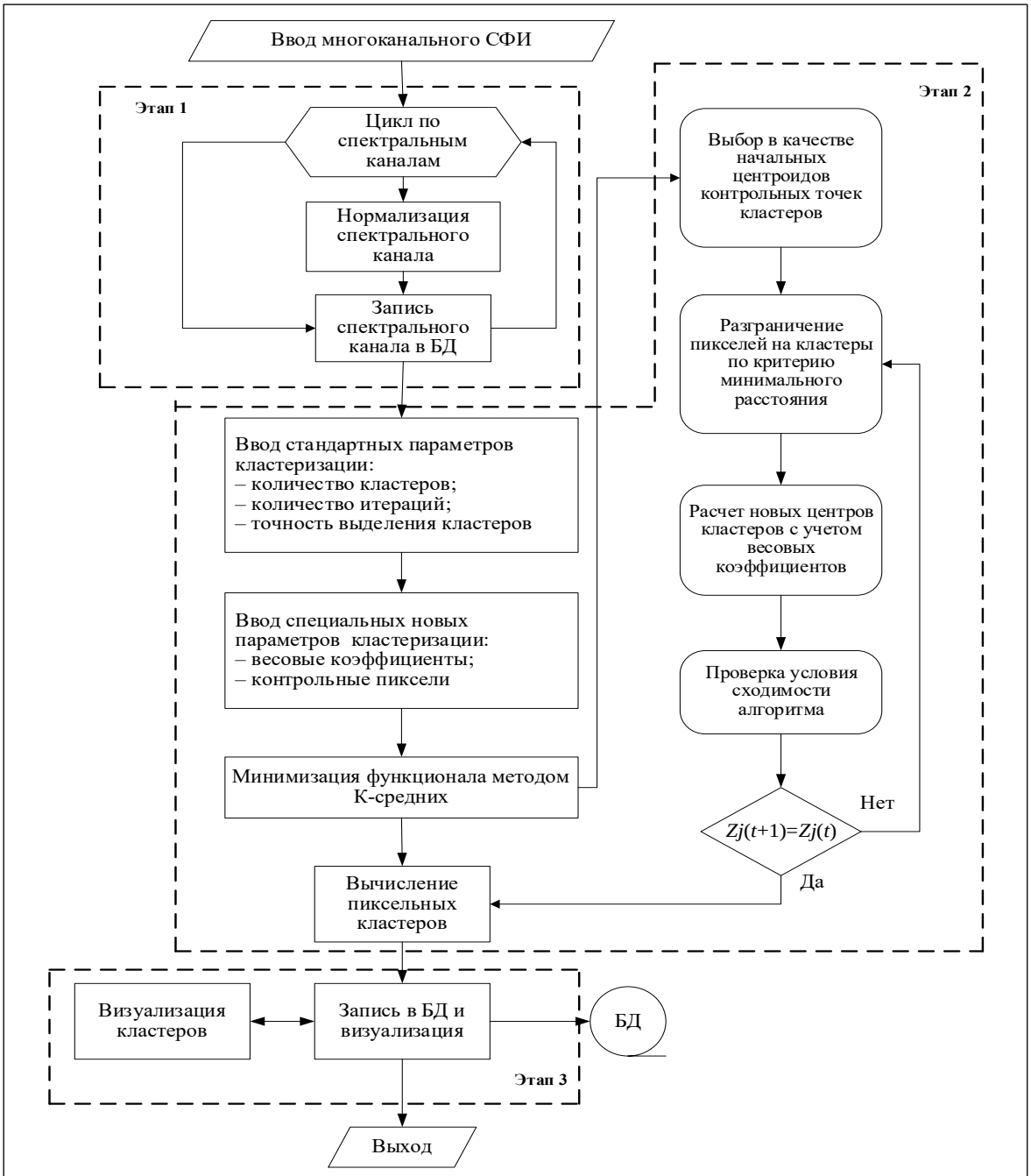


Рис. 1. Блок-схема контрольно-пиксельно-кластерного алгоритма управляемого кластерного анализа состояния лесных массивов

Fig. 1. A block diagram of the control pixel clustering algorithm for "controlled cluster analysis" of satellite images

функция преобразуется к следующему виду:

$$\Phi\left(z_1, z_2, ..., z_p\right) = \\ = \sum_{j=1}^{p} \sum_{c \in Q_j} \left[\left(c - z_j\right)^2 + w_j \left(r_j - z_j\right)^2 \right] \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где j – номер кластера; p – количество кластеров; Q_j – множество пикселей j-го кластера; r_j – вектор координат j-го контрольного пикселя; w – вектор весовых коэффициентов кластеров (настраиваемые управляющие параметры); $c \in Q_j$ – пиксель, принадлежащий j-му кластеру; z_j – центроиды j-го кластера – неизвестные векторы, которые необходимо найти в результате решения задачи минимизации.

Как следует из (1), целевая функция уравновешивает положение центроидов относительно как кластерных пикселей, которые могут переходить из одного кластера в другой, так и контрольных, которые отличаются от других фиксированным расположением.

Используя необходимое условие экстремума функции многих переменных, приходим к следующей системе уравнений:

$$\frac{d\Phi}{dz_j} = -2\left(\sum_{c \in Q_j} \left(c - z_j + w_j r_j - w_j z_j \right) \right) = 0, \qquad (2)$$

$j = 1, 2, \ldots, p$.

Решая систему уравнений (2), получаем следующую формулу для расчета центроидов:

$$z_j = \frac{\sum_{c \in Q_j} c + N_j w_j r_j}{N_j (1 + w_j)}. \qquad (3)$$

Рассмотрим полученную формулу (3) в крайних предельных случаях.

В крайнем предельном случае нулевых весовых коэффициентов формула (3) переходит в известную формулу среднего арифметического:

$$z_j = \frac{1}{N_j} \sum_{c \in Q_j} c. \qquad (4)$$

В крайнем предельном случае бесконечно больших весовых коэффициентов формула (3) упрощается к следующему виду: $z_j = r_j$, то есть все пиксели каждого кластера сливаются в общий кластерный центроид.

Разработанный контрольно-пиксельно-кластерный алгоритм является итерационным. На каждом итерационном шаге вычисляются центроиды кластеров, по расположению которых перераспределяются кластерные пиксели. С использованием нового расположения кластеров по формуле (3) вычисляются новые центроиды, и шаги итерационного алгоритма повторяются.

Следует отметить, что необходимость управления процессом кластеризации возникает тогда, когда некоторые пиксели, принадлежащие известному кластеру, притягиваются в другой кластер.

Контрольно-пиксельно-кластерный алгоритм состоит из следующих этапов и шагов (рис. 1).

Этап 1. Нормализация многоканальных СФИ: 1.1. Выбор процедуры нормализации спектрального канала; 1.2. Нормализация спектрального канала.

Этап 2. Кластеризация спектрального канала: 2.1. Ввод стандартных параметров кластеризации: количество кластеров, максимальное количество итераций, точность выделения кластеров; 2.2. Ввод специальных параметров процедуры управляемого кластерного анализа: вектора весовых коэффициентов кластеров и вектора контрольных точек; 2.3. Минимизация функционала (1); 2.4. Определение пиксельных кластеров с использованием параметров, рассчитанных на шаге 2.3.

Этап 3. Визуализация результатов алгоритма управляемого кластерного анализа: 3.1. Выбор алгоритмов визуализации; 3.2. Визуализация кластеров.

Результаты практического использования алгоритма

Для численных экспериментов используем спектральные интервалы [4, 5] многоканального СФИ, полученного оптической аппаратурой ETM+ со спутника Landsat-7 с номерами 1–5, 7. В результате каждый пиксель СФИ будет представлен шестимерным вектором вида $c_k = (c_{1k}, c_{2k}, \ldots, c_{6k})$, где c_k – вектор яркости k-го пикселя в каждом из шести выбранных спектральных интервалов.

Рассмотрим результаты применения алгоритма управляемого кластерного анализа к СФИ со спутника Landsat-7. На рисунке 2 представлен фрагмент изображения пятого спектрального канала лесного массива, распо-

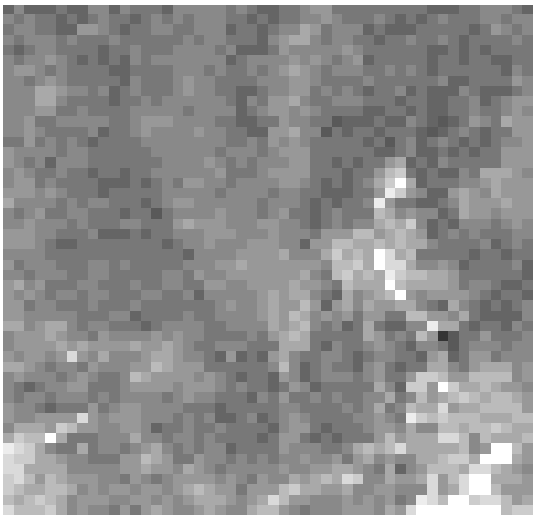
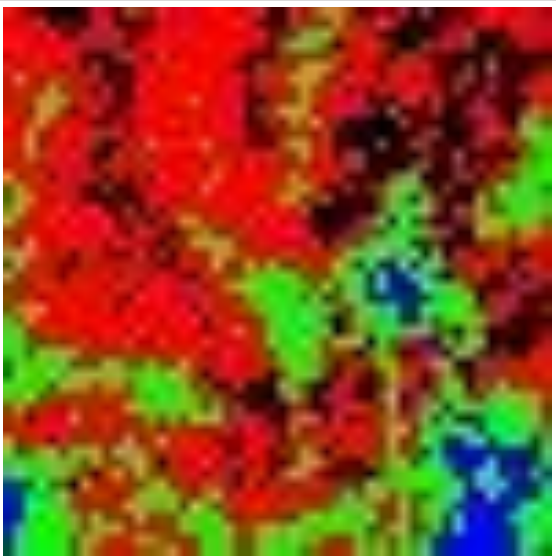


Рис. 2. Пиксельное изображение пятого спектрального канала фрагмента спутникового изображения лесного ландшафта

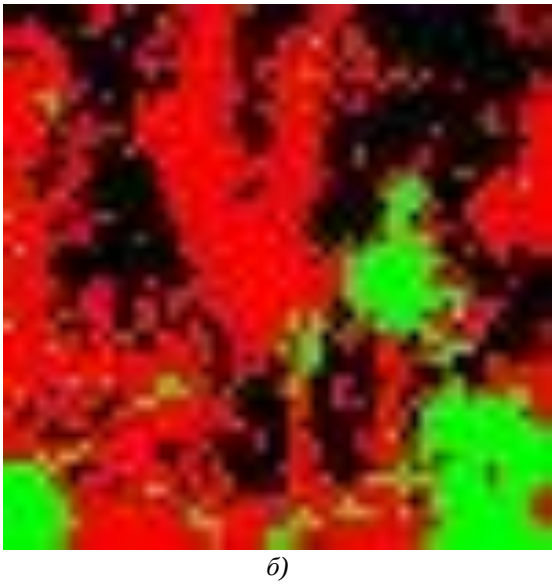
Fig. 2. A pixel image of the fifth spectral channel of a fragment of a satellite image of a polluted forest landscape

ложенного в районе промышленного предприятия. Результаты кластеризации этого фрагмента на четыре и три кластера представлены на рисунке 3.

Для управления процедурой кластеризации пикселей на СФИ необходимо ввести весовые коэффициенты кластеров и контрольные пиксели. Синий кластер, присутствующий на рисунке 3а, при кластеризации на четыре кластера перешел в зеленый (рис. 3б). При этом увеличились размеры черного кластера.



а)



б)

Рис. 3. Результаты кластеризации фрагмента пиксельного многоканального изображения на различное число кластеров: а) четыре, б) три кластера

Fig. 3. The results of clustering a fragment of a pixel multichannel image into the following number of clusters: a) four, б) three clusters

В использованном варианте алгоритма контрольный пиксель помещается в синий кластер, что может быть описано в виде вектора весовых коэффициентов (w_1 = 0.1, w_2 = 0.2, w_3 = 0.2, w_4 = 0.5).

Новая мозаика кластеров представлена на рисунке 4. Как следует из этого рисунка, площадь синего кластера в результате использования весовых коэффициентов заметно возросла.

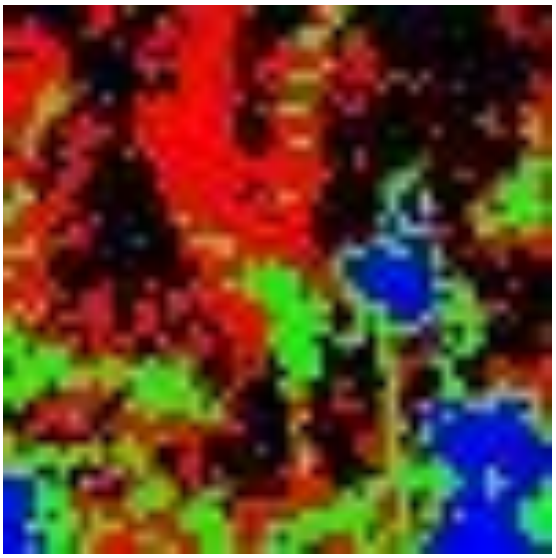


Рис. 4. Мозаика пиксельных кластеров, полученная с помощью алгоритма управляемой кластеризации при усилении синего кластера с помощью весового коэффициента w_4 = 0.5

Fig. 4. A mosaic of pixel clusters obtained using the controlled clustering algorithm while amplifying the blue cluster using a weight coefficient w_4 = 0.5

Программная реализация контрольно-пиксельно-кластерного алгоритма разработана в виде пакета программ на m-языке среды программирования MATLAB с использованием специальной библиотеки процедур обработки изображений Image Processing. Представим текст головной программы с перечнем основных подпрограмм:

```
function clust_b(action, varargin)
%CLUST_B – информационная система управляемой кластеризации
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Subfunctions & Callbacks:
%   Initclust_b – процедура инициализации элементов интерфейса
```

```
%   EditBoxUpdate – процедура ввода информации из элементов интерфейса EditBoxes
%   UpdateClusterType – процедура ввода параметров кластеризации
%  BringUpFcmControls –  процедура ввода параметров алгоритма С-средних
%   BringUpStepFcmControls – ввод параметров процедуры StepFcm
%   BringUpSubclustFcmControls – ввод параметров для алгоритма Sabtractive
%   DoOpt  – обработчик дополнительных опций
%   TakeClusterAlg – процедура выбора алгоритма кластеризации
%     InitMyWnd – инициализация базового Windows окна; параметры:
%              ar – 2-мерный массив, str – название окна
%              v = 0 imagesc, if v = 1 – поверхность
%              v = 2 – столбиковая диаграмма
%  InitMyInfoWnd – инициализация главного окна программы со следующими элементами
%        –  информация о количестве пикселей в каждом кластере
%           –  ar – результат кластеризации
%           –  cluster_n – число кластеров
%            – str – заголовок окна
%   ImageInput –  процедура чтения изображения из файла
%   InfoBtnProc – процедура обработки кнопки Info
%   ImageOutput – процедура записи результатов кластеризации
%   ChannelBtnProc – процедура кнопки «Канал»
%   ResultBtnProc – процедура кнопки «Результат»
%   ZoomOnBtnProc – процедура кнопки «Zoom-on»
%   ZoomOffBtnProc – процедура кнопки «Zoom-off»
%   ParamBtnProc – процедура кнопки «Параметры»
%   KartaBtnProc – процедура кнопки «Карта»
%   VidelaInput – процедура кнопки ввода из БД «Контрольные пиксели»
%   ViewBtnProc – процедура кнопки «Вьюер»

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nargin<1,
  ch_n = 0;
  action='Initclust_b';
end;

feval(action,varargin{:})
return;
```

Заключение

Авторы разработали оригинальный контрольно-пиксельно-кластерный алгоритм анализа многоканальных СФИ лесных массивов.

Он позволяет скорректировать площади экологических зон на основе использования дополнительных параметров в виде весовых коэффициентов и информации о распределении контрольных пикселей по экологическим зонам.

Предложенный алгоритм может быть использован как эффективное программное средство управляемого кластерного анализа при составлении картосхем, отображающих воздействие техногенных химических загрязнений на состояние лесных массивов, в виде разнообразных биологических, физико-химических и экологических характеристик компонентов лесных массивов, например, интегральных экологических показателей.

Исследование выполнено по гранту Российского научного фонда (проект № 21-79-30029).

Литература

1. Meshalkin V.P., Dovì V.G., Bobkov V.I. et. al. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering. Mendeleev Communications, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 593–604. DOI: 10.1016/j.mencom.2021.09.003.
2. Мешалкин В.П., Кантюков Р.А., Бутусов О.Б. Математические методы и информационные системы анализа воздействия на природную среду нефтегазового комплекса. СПб: Недра, 2014. 365 с.
3. Meshalkin V.P., Butusov O.B., Kantyukov R.R., Belozerskii A.Yu. Local-potential morphometric algorithm for information-entropy estimation of the impact of technogenic chemical pollution on forests. Doklady Chemistry, 2020, vol. 495, no. 2, pp. 199–204. DOI: 10.1134/S0012500820120010.
4. Ayerdi B., Maiora J., Grana M. Active learning of hybrid extreme rotation forests for CTA image segmentation. Proc. XII Int. Conf. HIS, 2012, pp. 543–548. DOI: 10.1109/HIS.2012.6421392.
5. Chen C.H. Image Processing for Remote Sensing. United States of America. Taylor and Francis group Publ., 2008, 218 p. DOI: 10.1201/9781420066654.
6. Bloch I. Information Fusion in Signal and Image Processing. ISTE Publ., 2008, 297 p. DOI: 10.1002/9780470611074.
7. Bloch I. Fusion of numerical and structural image information in medical imaging in the framework of fuzzy sets. In: Fuzzy Systems in Medicine, pp. 429–447. DOI: 10.1007/978-3-7908-1859-8_20.
8. Kuncheva L.I. Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms. John Wiley Publ., 2004, 382 p. DOI: 10.1002/0471660264.
9. Alexandre L.A., Campilho A.C., Kamel M. On combining classifiers using sum and product rules. Pattern Recognition Letters, 2001, vol. 22, no. 12, pp. 1283–1289. DOI: 10.1016/S0167-8655(01)00073-3.

10. Altincay H. On naive Bayesian fusion of dependent classifiers. Pattern Recognition Letters, 2005, vol. 26, no. 15, pp. 2463–2473. DOI: 10.1016/j.patrec.2005.05.003.

11. De Oliveira J.V., Pedrycz W. Advances in Fuzzy Clustering and its Applications. NY, John Wiley and Sons Publ., 2007, 457 p. DOI: 10.1002/9780470061190.

12. Miyamoto S., Ichihashi H., Honda K. Algorithms for fuzzy clustering. Methods in c-Means clustering with applications. In: STUDFUZZ, 2008, 244 p. DOI: 10.1007/978-3-540-78737-2.

13. Steele B., Chandler J., Reddy S. Algorithms for Data Science. Springer Cham Publ., 2016, 430 p. DOI: 10.1007/978-3-319-45797-0.

14. Steele B.M. Exact bagging of K-nearest neighbor learners. Machine Learning, 2009, vol. 74, pp. 235–255. DOI: 10.1007/s10994-008-5096-0.

15. Agresti A. Categorical Data Analysis. NY, John Wiley Publ., 2013, 742 p.

16. Kaski P., Östergård P.R.J. Classification algorithms for codes and designs. In: AACIM, 2006, 414 p. DOI: 10.1007/3-540-28991-7.

Software & Systems Received 26.07.22
DOI: 10.15827/0236-235X.139.458-465 2022, vol. 35, no. 3, pp. 458–465

A control pixel clustering algorithm for assessing the chemical pollution impact on forest tracts from satellite photographic images

V.P. Meshalkin [1, 2], *Academician of RAS, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of Department, clogist@muctr.ru*
O.B. Butusov [1,2], *Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, butusov-1@mail.ru*
R.R. Kantyukov [3], *Ph.D. (Engineering), Doctoral Student*
T.B. Chistyakova [4], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of Department*

[1] *Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125480, Russian Federation*
[2] *Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071, Russian Federation*
[3] *Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies – Gazprom VNIIGAZ Moscow, 142717, Russian Federation*
[4] *Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), St. Petersburg, 190013, Russian Federation*

Abstract. The paper proposes an original adaptive control pixel clustering algorithm for "controlled cluster analysis" of satellite photographic images.

The "controlled cluster analysis" algorithm is based on the premise: the possibility of using additional a priori information about control pixels on satellite photographs located in different ecological zones, which allows correcting the mosaic structures and ecological zone areas taking into account additional information.

The "controlled cluster analysis" algorithm differs in using additional parameters in the form of weight coefficients and control pixels, which provides more accurate binding of clustering results to ecological zones. The "controlled cluster analysis" algorithm is based on a modernized classical K-means algorithm, in which weight coefficients and control pixels are additionally introduced as parameters.

It is shown that as a result of using the "controlled cluster analysis" algorithm, the accuracy of estimating the size and configuration of the areas of ecological zones increases.

The proposed algorithm makes it possible to calculate the total areas of ecological zones of forests more accurately, which can be proposed as a basis for assessing the degree of environmental degradation and the magnitude of environmental damage to forests.

Keywords: vegetation indices, control pixels, forest areas, multi-channel photo image, clusters, spectral channel, enterprise, metallurgical complex, chemical pollution.

Acknowledgements. *The study has been financed from a grant from the Russian Science Foundation (project no. 21-79-30029).*

References

1. Meshalkin V.P., Dovì V.G., Bobkov V.I. et. al. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering. *Mendeleev Communications*, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 593–604. DOI: 10.1016/j.mencom.2021.09.003.
2. Meshalkin V.P., Butusov O.B., Kantyukov R.R. *Mathematical Methods and Information Systems for Analyzing the Environmental Impact of the Oil and Gas Complex*. St. Petersburg, 2014, 365 p. (in Russ.).
3. Meshalkin V.P., Butusov O.B., Kantyukov R.R., Belozerskii A.Yu. Local-potential morphometric algorithm for information-entropy estimation of the impact of technogenic chemical pollution on forests. *Doklady Chemistry*, 2020, vol. 495, no. 2, pp. 199–204. DOI: 10.1134/S0012500820120010.
4. Ayerdi B., Maiora J., Grana M. Active learning of hybrid extreme rotation forests for CTA image segmentation. *Proc. XII Int. Conf. HIS*, 2012, pp. 543–548. DOI: 10.1109/HIS.2012.6421392.
5. Chen C.H. *Image Processing for Remote Sensing. United States of America*. Taylor and Francis group Publ., 2008, 218 p. DOI: 10.1201/9781420066654.
6. Bloch I. *Information Fusion in Signal and Image Processing*. ISTE Publ., 2008, 297 p. DOI: 10.1002/9780470611074.
7. Bloch I. Fusion of numerical and structural image information in medical imaging in the framework of fuzzy sets. In: *Fuzzy Systems in Medicine*, pp. 429–447. DOI: 10.1007/978-3-7908-1859-8_20.
8. Kuncheva L.I. *Combining Pattern Classifiers: Methods and Algorithms*. John Wiley Publ., 2004, 382 p. DOI: 10.1002/0471660264.
9. Alexandre L.A., Campilho A.C., Kamel M. On combining classifiers using sum and product rules. *Pattern Recognition Letters*, 2001, vol. 22, no. 12, pp. 1283–1289. DOI: 10.1016/S0167-8655(01)00073-3.
10. Altincay H. On naive Bayesian fusion of dependent classifiers. *Pattern Recognition Letters*, 2005, vol. 26, no. 15, pp. 2463–2473. DOI: 10.1016/j.patrec.2005.05.003
11. De Oliveira J.V., Pedrycz W. *Advances in Fuzzy Clustering and its Applications*. NY, John Wiley and Sons Publ., 2007, 457 p. DOI: 10.1002/9780470061190.
12. Miyamoto S., Ichihashi H., Honda K. Algorithms for fuzzy clustering. Methods in c-Means clustering with applications. In: *STUDFUZZ*, 2008, 244 p. DOI: 10.1007/978-3-540-78737-2.
13. Steele B., Chandler J., Reddy S. *Algorithms for Data Science*. Springer Cham Publ., 2016, 430 p. DOI: 10.1007/978-3-319-45797-0
14. Steele B.M. Exact bagging of K-nearest neighbor learners. *Machine Learning*, 2009, vol. 74, pp. 235–255. DOI: 10.1007/s10994-008-5096-0.
15. Agresti A. *Categorical Data Analysis*. NY, John Wiley Publ., 2013, 742 p.
16. Kaski P., Östergård P.R.J. Classification algorithms for codes and designs. In: *AACIM*, 2006, 414 p. DOI: 10.1007/3-540-28991-7.

Для цитирования

Мешалкин В.П., Бутусов О.Б., Кантюков Р.Р., Чистякова Т.Б. Контрольно-пиксельно-кластерный алгоритм оценки воздействия химических загрязнений на лесные массивы по спутниковым фотоизображеням // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 458–465. DOI: 10.15827/0236-235X.139.458-465.

For citation

Meshalkin V.P., Butusov O.B., Kantyukov R.R., Chistyakova T.B. A control pixel clustering algorithm for assessing the chemical pollution impact on forest tracts from satellite photographic images. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 458–465 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.458-465.

УДК 004.42
DOI: 10.15827/0236-235X.139.466-471
Дата подачи статьи: 12.07.22, после доработки: 18.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 466–471

Разработка информационной системы в области композитных материалов с применением современных средств

Н.Д. Кириллов [1], *аспирант, nik2010spartak@yandex.ru*
Э.М. Кольцова [1], *д.т.н., профессор, kolts@muctr.ru*

[1] *Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, 125047, Россия*

В статье рассмотрен подход к созданию информационной системы в области композитных материалов с применением современного фреймворка разработки Laravel на языке программирования PHP. Данное исследование включает в себя анализ предметной области и разработку модели хранения данных на его основе, а также разработку основных программных модулей системы и реализацию логики взаимодействия между ними. Оригинальность исследования заключается в реализации информационной системы в виде веб-ориентированного сервиса для быстрого и простого доступа к информации на основе фреймворка Laravel.

Авторы выделяют основные сущности, которые описывают область композитных материалов, и составляют их список. Затем описывают, каким образом по этим сущностям составлена и разработана реляционная модель хранения данных. При создании модели использовались, помимо прочего, методы для наиболее оптимального хранения иерархических структур данных. На основе этой модели хранения данных авторы разработали модули и блоки модулей информационной системы и соединили их в единый конечный сервис. Сервис является веб-ориентированным и очень удобен для предоставления доступа пользователям и исследователям в области композитных материалов ко всей нужной информации. В работе отмечены и описаны инструменты и модули фреймворка Laravel, использованные при разработке всей системы.

Результаты исследования демонстрируют примеры работы информационной системы – приведены страницы авторизации веб-ориентированного сервиса и некоторые страницы основных сущностей системы как представление визуализации сервиса.

Ключевые слова: *информационная система, композитные материалы, реляционная модель данных, фреймворк Laravel.*

Область композитных материалов является многообразной и перспективной для применения в таких отраслях, как медицина, машиностроение, робототехника, авиастроение, ракетно-промышленный комплекс и другие. Растущий интерес со стороны промышленного сектора, расширение способов применения и общее повышение уровня технологий обусловливают появление огромного числа исследований композитных материалов и их основных физико-химических характеристик, а потому часто возникает вопрос, каким образом хранить и обрабатывать полученные объемы данных и как обеспечить оперативный доступ к ним [1].

Авторы статьи предлагают создать информационную систему, представляющую собой веб-ориентированный сервис для быстрого и простого доступа из разных точек мира с использованием различных устройств.

Научная новизна данной работы заключается в том, что основным инструментом разработки является фреймворк Laravel, который прекрасно подходит для создания информационных систем и API-методов, а также для интеграции с внешними ресурсами данных.

Новым является и подход к проектированию модели хранения данных предметной области – использование методов иерархических структур для правильного представления вложенных типов данных, которые хорошо описывают классификацию композитных материалов.

Авторы исследования установили, что подобные системы с использованием такого же фреймворка обычно создаются в рамках коммерческих задач и целей, в рамках же научно-исследовательских целей системы такого масштаба, с таким подходом к разработке и для области композитных материалов в открытом доступе не представлены. Если говорить о схожих научных работах, то они, как правило, касаются других предметных областей [2, 3] либо имеют другое назначение и выступают как не-

большие локальные приложения [4]. Все перечисленные факты подтверждают оригинальность данной работы.

Разработка информационной системы предполагает решение следующих задач:

– анализ предметной области и составление ее описания на программном уровне – составление списка основных сущностей с учетом выбранных подходов и инструментов разработки;

– разработка модели хранения данных для предметной области с использованием выбранных технических средств;

– разработка логики системы и ее основных модулей взаимодействия с БД и модулей визуализации системы.

Описание фреймворка Laravel

Laravel – это PHP-фреймворк с открытым исходным кодом, предназначенный для упрощения и ускорения разработки веб-приложений с помощью встроенных функций [5, 6]. Эти функции – часть того, что делает Laravel столь широко используемым веб-разработчиками.

- Объектно-реляционное сопоставление БД. В Laravel имеется механизм Eloquent ORM, который представляет таблицы БД в виде классов для упрощения доступа к данным.
- Модульная упаковочная система с управлением зависимостями. Позволяет легко добавлять функциональные возможности в код, не создавая их с нуля. Также есть возможность создавать свои пакеты либо устанавливать готовые пакеты приложений с помощью менеджера Composer [6].
- Автоматическое тестирование. Автоматизированные тесты предоставляются как неотъемлемая часть Laravel и делают процесс разработки более правильным.
- Полноценная система авторизации и аутентификации. Это означает, что процесс разработки заточен под защищенные приложения, доступ к которым может быть осуществлен различными путями.
- Интерфейс командной строки (CLI). Поставляется с десятками готовых команд с помощью встроенного инструмента, называемого Artisan.

Laravel реализует архитектурный паттерн MVC в своем базовом назначении [7]. Также этот фреймворк считается максимально удобным для создания Rest-приложений и API, построенных современным способом [6, 7].

Описание предметной области на программном уровне

При создании информационной системы необходимо выделить основные сущности предметной области и разработать модели хранения данных. Авторы ранее уже описывали свой подход к созданию модели хранения данных для области композитных материалов [8]. Набор сущностей базовой модели является основным, на нем можно в дальнейшем строить любые информационные системы или приложения для области композитов. Сущности модели данной работы представлены в таблице.

Базовые сущности модели хранения данных

Basic data storage model entities

Сущность	Имя в модели хранения данных	Краткое описание
Элемент	elements	Химические элементы как элементарная сущность
Материал	materials	Композитные материалы, состоящие из нескольких химических элементов
Образец	samples	Образцы, над которыми проводят исследования и по которым хранят данные
Состав	compositions	Состав композита – тип матрицы или наполнителя и процентное содержание
Матрица	matrix_types, matrix_type_closure	Тип матрицы
Наполнитель	filler_types, filler_type_closure	Тип наполнителя
Свойство	properties	Свойства и их базовые параметры – наименование и единицы измерения
Значения свойств	single_prop_values, multi_prop_values, multi_prop_tables	Значения свойств и зависимостей
Источник	articles, countries	Литературные источники, хранящие данные по материалам

Информационная система по композитным материалам должна отражать данные по самим материалам и по их отдельным компонентам – по свойствам этих сущностей и источнику получения информации. Также необходимо учесть, что композитные материалы могут быть совершенно разными по количеству компонентов, по составу и типу матриц и наполнителей. Все эти параметры заложены авторами в данную модель хранения данных. Для сущностей типов матриц и наполнителей использован специальный подход, так как это иерархические структуры данных.

Данная модель хранения подходит под любые реляционные решения, в настоящее время используемые в разработке, а также под разработку во фреймворке Laravel. Структурная модель хранения данных предметной области представлена на рисунке 1.

Описание разработки модели хранения данных

В Laravel модель хранения данных реализуется через две сущности фреймворка – класс модели и миграция [6]. Для каждой сущности предметной области авторы разработали свой класс модели, в котором описывали преобразования полей, связи с другими сущностями предметной области, называемые отношениями, и статические методы для работы с моделью.

Для модели хранения также необходимо создать миграции, представляющие собой описание сущности на уровне, близком к высокоуровневым реляционным языкам. В миграции описываются практически все возможные операторы SQL [6, 9]. Для каждой таблицы в системе разработан свой класс миграции.

Представим пример реализации на программном уровне метода класса миграции для сущности образца материала:

```
public function up()
{
   Schema::create('samples', function (blue-
print $table){
      $table->increments('id');
      $table->integer('material_id')->un-
signed();
      $table->string('name');
      $table->text('descr')->nullable();
      $table->timestamps();
      $table->softDeletes();

      $table->foreign('material_id')->refer-
ences('id')->on('materials')-
>onDelete('cascade');
   });
}
```

Как видно из примера, в миграции описывается таблица в БД, которая соответствует определенной сущности. Само описание таблицы представляет собой описание ее отдельных полей и связей [9, 10].

Авторами исследования были созданы классы моделей и файлы миграций под все сущности предметной области и описано взаимодействие этих сущностей. Суммарно со-

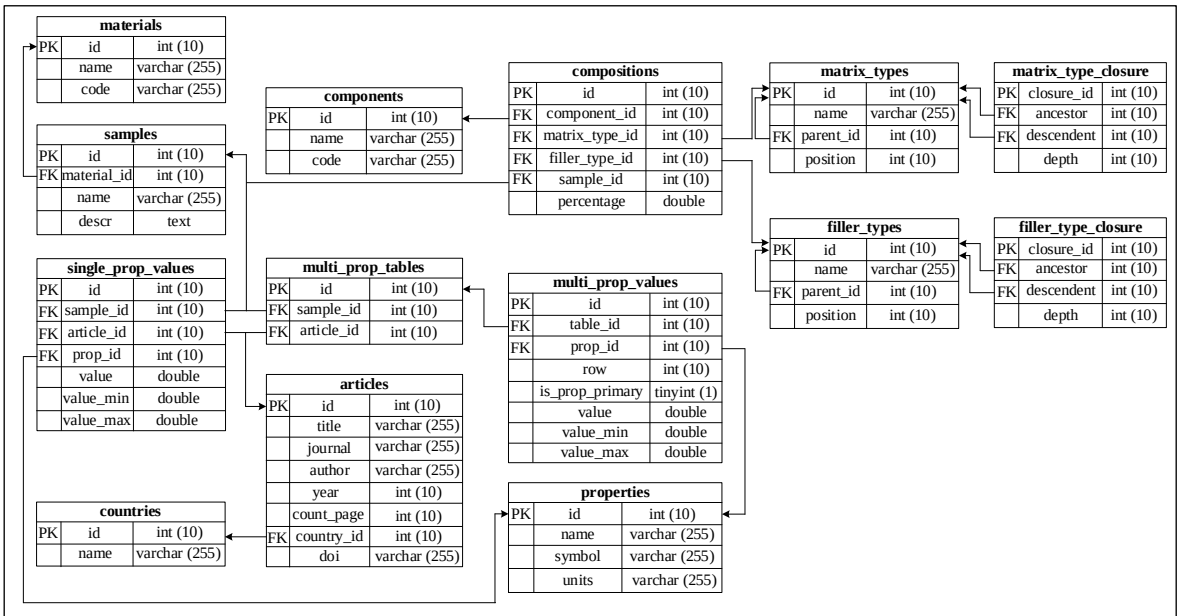


Рис. 1. Структурная схема модели предметной области

Fig. 1. A structural diagram of the domain model

здано 15 классов для моделей и 16 файлов миграций для описания этих моделей и связей между ними. Количество миграций отличается, поскольку некоторые сущности имеют схожие дополнительные данные, например, различные медиафайлы или наборы данных, а для таких случаев требуется отдельная миграция.

Описание разработки логики информационной системы

Логика всей системы разрабатывалась через классы контроллеров, взаимодействующие с созданными заранее классами моделей и оперирующие данными сущностей системы. Затем эти данные были преобразованы и переданы на публичную часть сервиса.

Класс контроллеров представляет собой объектно-ориентированный класс с набором методов для оперирования сущностями. В данном случае использованы контроллеры в соответствии со всеми правилами разработки.

Для данной информационной системы самыми сложными были классы контроллеров, описывающие взаимодействие сущностей образца материла и сущностей типов матриц и типов наполнителей композитных материалов. В разработке именно этих контроллеров были реализованы дополнительные методы, направленные на решение сложностей взаимодействия с другими сущностями (рис. 1). Сущность образца материала является наиболее связанной, и это делает ее самой важной и сложной в системе. Для типов матриц и типов наполнителей контроллеры оказались сложными, поскольку для реализации всех действий с иерархическими структурами данных использовались сторонние модули фреймворка.

Базовыми по сложности оказались контроллеры, описывающие менее связанные сущности – материалы, свойства, литературные источники.

Представления, то есть визуальная часть информационной системы, реализованы через стандартные компоненты HTML и CSS. Контроллеры, получая данные посредством моделей, передают их на публичную часть для визуализации пользователю.

Авторы разработали суммарно 10 классов контроллеров и порядка 40 файлов визуализации данных для всех сущностей предметной области.

Представление работы информационной системы

При авторизации предусмотрены разграничение доступа к системе и возможность привилегий для определенных действий.

После авторизации веб-ориентированный сервис представляет главную страницу информационной системы, где изображено меню по всем сущностям с возможными переходами.

На рисунке 2 представлена сущность образца материала. Конкретно в этом примере рассматривается образец композитного материала оксида алюминия с оксидом магния. Также можно увидеть, что отображается информация о компонентах материала, процентном содержании каждого компонента, о свойствах конкретного образца материала – наименовании свойства и значении с указанием размерности.

В информационной системе таких образцов и материалов большое количество и объем данных постоянно увеличивается, поэтому данные

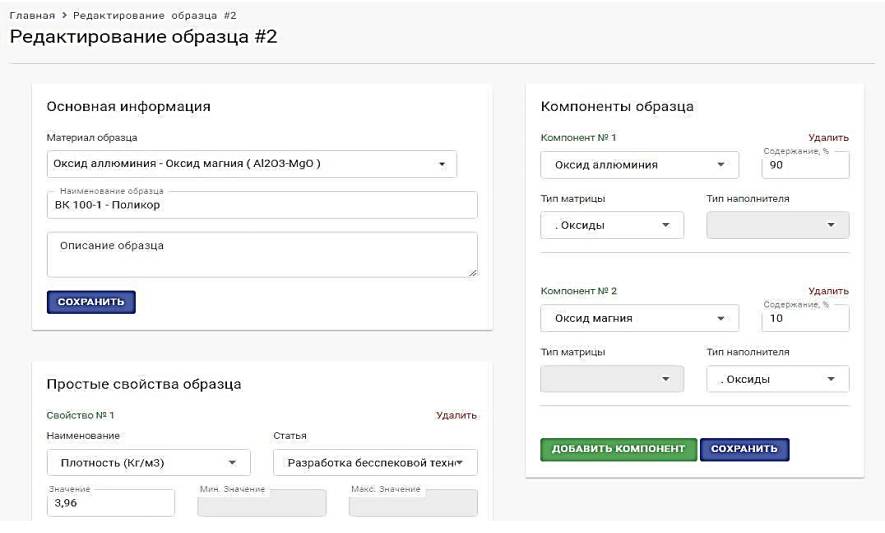


Рис. 2. Пример представления образца материала в информационной системе с указанием компонент образца материала и его свойств

Fig. 2. An example of the presentation of a material sample in the information system indicating the material sample components and properties

были сгруппированы и представлены для пользователей сервиса в удобном виде.

Заключение

В данной статье описана информационная система в области композитных материалов, разработанная с применением современных средств, в частности, фреймворка Laravel. Представлены описание модели хранения данных на программном уровне и ее разработки, а также краткое описание разработки всей информационной системы.

Система создана с учетом возможных нагрузок из-за большого объема данных и увеличения числа пользователей в будущем. Также учтены множество особенностей предметной области и возможные ограничения для пользователей системы по правам доступа и привилегиям.

В целом информационная система отражает сущности такой обширной предметной области, как композитные материалы. Тем не менее, авторы продолжают работу над улучшением системы и возможным расширением ее назначения.

Литература

1. Colombo P., Ferrari E. Access control technologies for Big Data management systems: Literature review and future trends. Cybersecurity, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 1–13. DOI: 10.1186/s42400-018-0020-9.

2. Yunita L., Nurjayadi M., Hariwibowo H. Developing the Computer-Based Test (CBT) on the basic chemistry throughout a web-based application. J. of Physics: Conf. Ser., 2021, vol. 1869, no. 1, art. 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/1869/1/012026.

3. Ji Y., Yao X., Liu S., Ma C., Tian M., Yuan T., Li L. Development and application of agriculture data collection and management system based on Laravel framework. Acta Agriculturae Shanghai, 2019, vol. 35, no. 4, pp. 107–113.

4. Rocha A., Vilhena J., Bernardino A. et al. Bio&Med Search – A platform to help health professionals about pharmacogenetics. Procedia Computer Science, 2019, vol. 164, pp. 692–697. DOI: 10.1016/j.procs.2019.12.237.

5. GitHub. Griffin J. Advanced Laravel / Domain-Driven Laravel. 2021, pp. 161–191. URL: https://github.com/Apress/domain-driven-laravel (дата обращения: 15.06.2022).

6. Stauffer M. Laravel: Up & Running: A Framework for Building Modern PHP Apps. CA, O'Reilly Media Publ., 2019, 531 p.

7. Chen S. Understanding of the management information system based on MVC pattern. AIP Conference Proceedings, 2018, vol. 1955, art. 040014. DOI: 10.1063/1.5033678.

8. Кольцова Э.М., Кириллов Н.Д. Разработка модели хранения данных для области композитных материалов // Вестн. Академии Международных Исследований. Информатика, Экология, Экономика. 2020. Т. 22. С. 34–41.

9. Sendiang M., Kasenda S., Polii A., Putung Y.R. Optimizing Laravel authentication process. Proc. iCAST, 2018, pp. 247–251. DOI: 10.1109/ICAST1.2018.8751257.

10. Pakpahan A.F. Dasar-Dasar Pengembangan Aplikasi Web Modern dengan Framework Laravel. Media Sains Indonesia Publ., 2020.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.466-471

Received 12.07.22, Revised 18.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 466–471

Developing an information system in the field of composite materials using modern tools

N.D. Kirillov [1], *Postgraduate Student, nik2010spartak@yandex.ru*
E.M. Koltsova [1], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, kolts@muctr.ru*

[1] *D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Russian Federation*

Abstract. The article considers the approach to developing an information system in the field of composite materials using the modern development framework Laravel in the PHP programming language. This study includes the subject area analysis and data storage model development based on this analysis, the development of the main program modules of the system and the implementation of the logic of interaction between these

modules. The originality of the study is in the implementation of the information system as a web-based service for quick and easy access to information based on the Laravel development framework.

This paper identifies and compiles a list of the main entities that describe the field of composite materials. Then, the paper presents a description a method of compiling and developing a relational data storage model for these entities. During model developing, among other things, the authors used methods for the most optimal storage of hierarchical data structures. Based on this data storage model, the authors developed modules and blocks of information system modules and connected these modules into a single end service. This service is web-based and can very conveniently provide users and researchers of composite materials with access to all the information they need. The work notes and describes the tools and modules of the Laravel framework, which were used in the development of the entire system.

As a demonstration of the study results, the authors give examples of the information system operation - the authorization pages of a web-based service and some pages of the main entities of the system are given as an example of service visualization.

Keywords: information system, composite materials, relational data models, Laravel framework.

References

1. Colombo P., Ferrari E. Access control technologies for Big Data management systems: Literature review and future trends. *Cybersecurity*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 1–13. DOI: 10.1186/s42400-018-0020-9.

2. Yunita L., Nurjayadi M., Hariwibowo H. Developing the Computer-Based Test (CBT) on the basic chemistry throughout a web-based application. *J. of Physics: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1869, no. 1, art. 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/1869/1/012026.

3. Ji Y., Yao X., Liu S., Ma C., Tian M., Yuan T., Li L. Development and application of agriculture data collection and management system based on Laravel framework. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2019, vol. 35, no. 4, pp. 107–113.

4. Rocha A., Vilhena J., Bernardino A. et al. Bio&Med Search – A platform to help health professionals about pharmacogenetics. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 164, pp. 692–697. DOI: 10.1016/j.procs.2019.12.237.

5. *GitHub. Griffin J. Advanced Laravel / Domain-Driven Laravel*. 2021, pp. 161–191. Available at: https://github.com/Apress/domain-driven-laravel (accessed June 15, 2022).

6. Stauffer M. *Laravel: Up & Running: A Framework for Building Modern PHP Apps*. CA, O'Reilly Media Publ., 2019, 531 p.

7. Chen S. Understanding of the management information system based on MVC pattern. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1955, art. 040014. DOI: 10.1063/1.5033678.

8. Koltsova E.M., Kirillov N.D. Development of a data storage model for the field of composite materials. *Bull. of Academy of International Studies. Computer Science, Ecology, Economics*, 2020, vol. 22, pp. 34–41 (in Russ.).

9. Sendiang M., Kasenda S., Polii A., Putung Y.R. Optimizing Laravel authentication process. *Proc. iCAST*, 2018, pp. 247–251. DOI: 10.1109/ICAST1.2018.8751257.

10. Pakpahan A.F. *Dasar-Dasar Pengembangan Aplikasi Web Modern dengan Framework Laravel*. Media Sains Indonesia Publ., 2020.

Для цитирования

Кириллов Н.Д., Кольцова Э.М. Разработка информационной системы в области композитных материалов с применением современных средств // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 466–471. DOI: 10.15827/0236-235X.139.466-471.

For citation

Kirillov N.D., Koltsova E.M. Developing an information system in the field of composite materials using modern tools. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 466–471 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.466-471.

УДК 004.942
DOI: 10.15827/0236-235X.139.472-481
Дата подачи статьи: 04.07.22, после доработки: 15.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 472–481

Программный комплекс моделирования реактора гидрохлорирования кремния

И.В. Глушков [1,2], *к.т.н., докторант, директор, modteh@mail.ru*
Т.Б. Чистякова [3], *д.т.н., профессор, chistb@mail.ru*
Ю.М. Аверина [1], *к.т.н., доцент, averina.i.m@muctr.ru*

[1] *Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, 125047, Россия*
[2] *Компания «Волга-инновация», г. Новочебоксарск, 429951, Россия*
[3] *Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), г. Санкт-Петербург, 190013, Россия*

Современное развитие промышленных предприятий невозможно без внедрения в процесс их функционирования информационных технологий, позволяющих повысить конкурентоспособность. В условиях рыночной экономики управление технологическими процессами сопряжено с целым спектром различных рисков. Риски могут быть смоделированы с помощью программных комплексов.

Предметом данного исследования является технология разработки программного комплекса реактора гидрохлорирования молотого кремния, работающего в динамическом режиме. Впервые на программном уровне предложены и показаны основные особенности работы реактора синтеза трихлорсилана. Описаны материальный и тепловой балансы реактора, показана и визуализирована гидродинамика взвешенного слоя. Проведены гидродинамические и тепловые расчеты реактора синтеза, интерпретированные в математический граф.

Показан математический аппарат для описания режимных параметров реактора, и впервые разработана компьютерная математическая модель процесса синтеза трихлорсилана действующего производства. Визуализированы технологические процессы объекта исследования. Предложена система контроля, регулирования и управления режимными параметрами реактора для обеспечения безопасности производства. Приборы контроля и управления подключены к математической модели.

С помощью полученной программной модели можно проводить различные эксперименты в режиме реального времени, запускать, останавливать и работать на реакторе синтеза, учитывая при этом кинетические особенности, которые возникают при розжиге аппарата. Авторами исследования установлена важность поддержания режимных параметров работы таких реакторов во избежание появления локальных зон перегрева, которые могут повлиять на возникновение аварийных ситуаций.

Работа представляет интерес для специалистов, обслуживающих производства получения трихлорсилана, и направлена на снижение технологических рисков, возникающих в процессе эксплуатации реактора.

Ключевые слова: *программный комплекс, реактор синтеза трихлорсилана, математическое моделирование, снижение рисков, технологический объект.*

Любое промышленное предприятие заинтересовано в квалифицированных специалистах, тем более, если их деятельность связана с технологическим объектом, характеризующимся повышенной опасностью (химическая, энергетическая, атомная промышленность и т.д.) [1]. Оперативный персонал сложных технологических установок таких производств должен знать принципы поддержания оптимальных режимных параметров аппарата. Одним из способов отработки таких навыков на технологическом объекте являются специальные компьютерные программные комплексы, в которых динамическая модель отражает работу технологического оборудования. Методы цифровизированного физико-химического инжиниринга и компьютерного моделирования позволяют решать текущие задачи.

В данном исследовании рассмотрена технология разработки программного комплекса реактора гидрохлорирования молотого кремния, работающего в динамическом режиме для получения *трихлорсилана* (ТХС) и *четыреххлористого кремния* (ЧХК).

В настоящее время ТХС является важным сырьем для производства поликристаллического кремния, моносилана и дихлорсилана (которые также используются в синтезе поликремния), основного ряда кремнийорганических мономеров. Кроме того, существуют и

другие области его применения, например, микроэлектроника, где он используется для эпитаксиального осаждения пленок монокристаллического кремния [2].

Получение смеси ТХС-ЧХК осуществляется в реакторе кипящего слоя гидрохлорированием кристаллического молотого кремния при температуре 230–350 °С при целенаправленном синтезе ТХС, 350–435 °С при целенаправленном синтезе ЧХК и давлении 0,05–0,43 МПа по реакции.

Одновременно с основной реакцией протекают побочные с получением полихлоридов кремния при температуре более 230 °С и дихлорсиланов при температуре менее 230 °С.

Суммарный экзотермический эффект реакций гидрохлорирования – 400 ккал/моль.

Интенсивность теплообмена лимитируется наличием в аппарате кипящего слоя, что должно обеспечивать эффективный съем тепла во всем объеме реакционной зоны и является гарантией отсутствия местных перегревов. При отсутствии режима кипящего слоя могут образовываться тепловые удары на стенку реактора, которые приводят к тому, что металл начинает плавиться, происходит прогорание с реактора и хлористый водород под давлением попадает в рубашку реактора. При этом образуется соляная кислота, которая разъедает рубашку реактора. В то же время такие локальные перегревы способствуют увеличению выхода ЧХК. Для получения кипящего слоя в реакторе необходимо создать в аппарате определенные гидродинамические параметры: перепад давления, линейную критическую скорость, определенную порозность (она зависит от гранулометрического состава контактной массы – кремния). Опыт эксплуатации такого реактора на «Химпроме» (г. Новочебоксарск) показал необходимость создания динамической математической модели реактора для отработки практических навыков работы персонала с целью снижения рисков [3].

В работе [4] представлены результаты моделирования *технологического процесса* (ТП) получения ТХС с использованием программного комплекса Aspen ONE на примере расчета реактора синтеза ТХС. Приведена блок-схема алгоритма расчета реактора кипящего слоя. Для моделирования процесса синтеза ТХС в псевдоожиженном слое разработана новая модель реактора с помощью модуля Aspen Custom Modeler программного комплекса Aspen ONE. Математическая модель для моделирования реактора с псевдоожиженным слоем реализована программно и добавлена в библиотеку комплекса Aspen Plus. Для создания технологической схемы процесса использованы программный комплекс Aspen ONE и система трехмерного проектирования AVEVA PDMS. На полезную модель реактора и способ получения ТХС получены патенты [4].

На основе алгоритма компьютерного моделирования теплофизических процессов в электротермическом рудовосстановительном реакторе методом конечных элементов, разработанного авторами исследования [5], проведен анализ режимных параметров рабочего объема. При этом компьютерный расчет взаимосвязанных теплогидравлических полей сделан для всего объема реактора. Сравнение результатов вычислительного эксперимента с экспериментальными данными по обследованию реактора и данными физического моделирования показало вполне удовлетворительное совпадение. Полученные режимные карты дают представление об изменении технико-экономических показателей в зависимости от параметров регулирования. Эта информация позволяет операторам узнать тенденции поведения реактора при изменении режима.

В статье [6] описана модель псевдоожиженного слоя, разработанная с использованием схемы псевдоожижения Кунии–Левеншпиля. Прогностические возможности этой модели были проверены на лабораторных экспериментальных данных из литературы. Показано, что модифицированная модель Кунии–Левеншпиля точно предсказывает эксперименты без добавления катализатора и с добавлением медного катализатора для гидрохлорирования в псевдоожиженном слое со средней разницей менее 6 %. При соответствующей корректировке содержания каталитически активного железа предсказание модели полностью согласуется с экспериментальными данными с соляной кислотой в сырьевом потоке. Модифицированная модель Кунии–Левеншпиля хорошо подходит для использования в расчетах масштабирования промышленного реактора, поскольку все параметры физически разумны и могут быть предсказаны для более крупных реакторов.

Работа [7] посвящена многомасштабной модели, прогнозирующей выход кремния при производстве и потери порошка в реакторе с псевдоожиженным слоем для производства солнечного кремния. Реакционный модуль рас-

считывает скорости осаждения кремния из паров и удаления порошка. Вычислительная гидродинамическая модель прогнозирует температуру и плотность пласта.

На предприятии Nova Chemicals (Канада) имеются множество установок по производству олефинов газового крекинга, а также заводы по переработке полиолефинов. Nova использует тренажеры для обучения операторов на этом объекте более 12 лет в рамках комплексной программы обучения и сертификации операторов диспетчерской [8]. В статье рассматриваются симуляторы, которые используются на предприятии как часть этой программы. В работе описываются и другие способы применения симулятора, направленного на получение общей выгоды нефтехимического комплекса.

В статье [9] представлены структура модели процесса установки периодического действия в UniSim Design, различные конструкции модели реактора периодического действия с рубашкой и идентификация параметров, влияющих на его гидродинамические и тепловые характеристики. Построение модели процесса является первым этапом разработки системы тренажера оператора опытной установки, расположенной в лаборатории авторов. Это может быть эффективным инструментом при разработке систем управления на основе моделей.

Авторы данного исследования разработали и визуализировали на программном уровне динамическую математическую модель процесса. Данный ТП сопряжен с целым спектром различных рисков, связанных с эксплуатацией реактора. Риски были смоделированы с помощью программного комплекса, пример его интерфейса представлен на рисунке 1.

Для разработки модели были проведены технологические расчеты, результаты которых показывают, что для достижения режима псевдоожижения для действующего реактора диаметром 700 мм необходимы расход хлористого водорода 176 м^3/час и перепад давления в газораспределительной решетке 4 853 Па.

При этом на данном реакторе будут следующие гидродинамические параметры: порозность слоя – 0,6, критическая скорость псевдоожижения – 0,13 м/с, сопротивление псевдоожиженного слоя – 0,63 атм, скорость потока в отверстиях решетки – 31,12 м/с, высота слоя кремния в режиме кипения – 9,34 м.

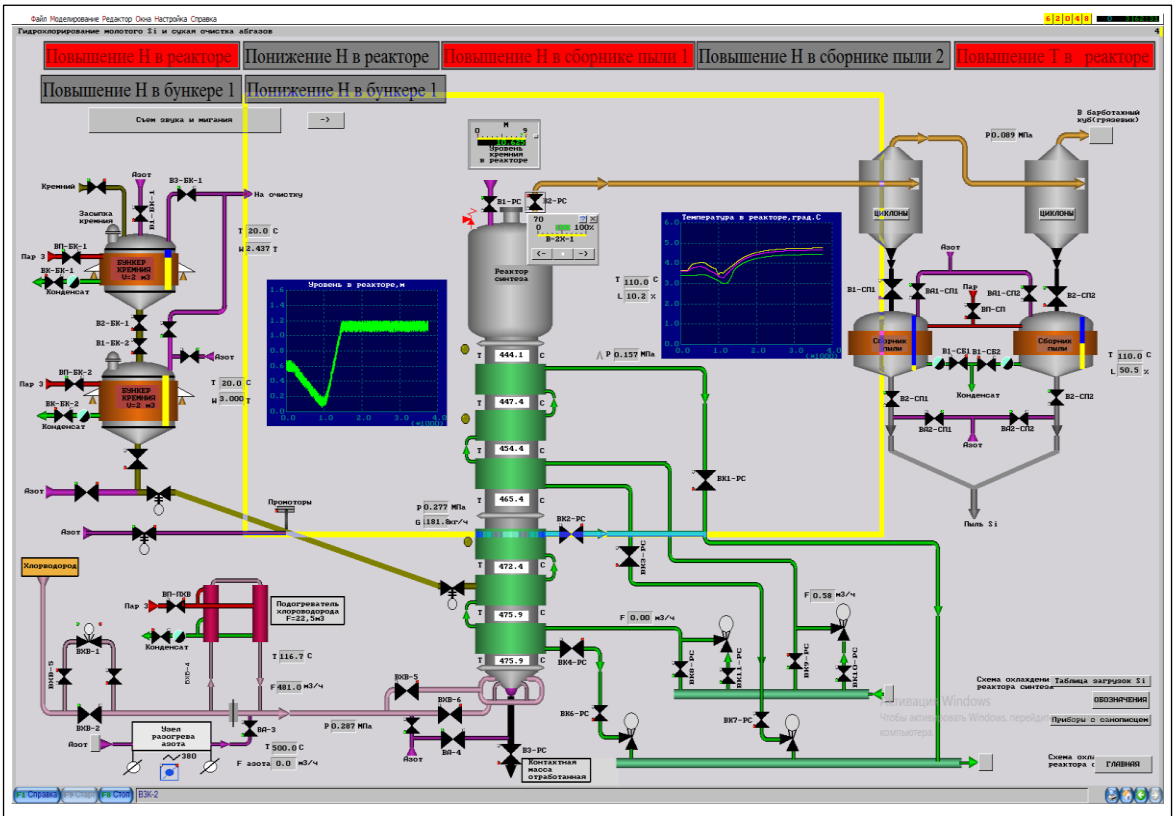


Рис. 1. Пример интерфейса программного комплекса – реактор синтеза ТХС

Fig. 1. An example of a software package interface - a TCS synthesis reactor

Тепловой расчет реактора показал, что для эффективного съема тепла необходима поверхность теплообмена ~21 м^2. Представленные параметры и конструкция реактора с ее газораспределительной решеткой должны обеспечивать наличие кипящего слоя. По результатам расчетов разработана математическая модель реактора синтеза ТХС–ЧХК.

Данные проведенных исследований интерпретированы в математический граф (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/15.jpg, http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/16.jpg).

Набор типовых элементов позволяет моделировать различные объекты и динамические процессы в них. На основе топологии модели автоматически генерируется эквивалент системы дифференциальных уравнений. В ходе симуляции система решается численными итерационными методами [10]. При этом в программном комплексе одновременно используются и другие методы моделирования:

– прямой расчет некоторых функциональных блоков по потоку данных в функциональной схеме, включая исполнение кода формул встроенным интерпретатором, исполнение логических функций, расчет табличных функций и многомерную сплайн-интерполяцию;

– численное решение систем линейных уравнений;

– итерационный расчет группы элементов (системы уравнений) до достижения требуемой точности численного решения;

– использование внешних программ (например, запись и чтение клеток в таблице Excel, которая может как служить источником данных, так и производить вычисления, а также сохранять их результаты).

Использование нужных методов расчета производится автоматически в процессе симуляции. Следует отметить, что все перечисленные методы в совокупности позволяют не только управлять моделью в реальном времени [10], но и редактировать ее структуру непосредственно в режиме симуляции. Низкоуровневый доступ к каждому элементу модели дает возможность легко отслеживать текущие значения переменных состояния модели, что упрощает ее отладку.

Рассмотрим простейший демонстрационный пример моделирования, который показывает подход к моделированию топологии электрических, гидравлических, тепловых и других схем.

Модель делителя применима как для электрических цепей, так и для трубопроводов с жидкостями или газами (в статике), а также тепловых потоков. Модель представляет собой ориентированный граф, в узлах которого находятся переменные состояния (P – потенциал, давление и т.п.), а в дугах – параметры моделируемой цепи (в данном случае электрические, тепловые и др. проводимости Y). На крайних узлах в модели необходимо обеспечить граничные условия (в данном случае постоянные значения потенциалов 0 и E).

В системе моделирования такая модель может быть построена при помощи двух типовых элементов – узел графа модели и связь (рис. 2).

Данный пример может быть использован как модель соединения между двумя коллекторами цепи противоперегрузочного клапана и других теплотехнических схем. Элементы типа «связь» используют состояния вентилей как значения проводимости. Граничные условия обеспечиваются настройкой параметров крайних узлов графа $p1$ = const и $p2$ = const соответственно. Узел характеризуется текущим значением потенциала (давления) в нем, а также коэффициентом инерции. Трубы (проводимо-

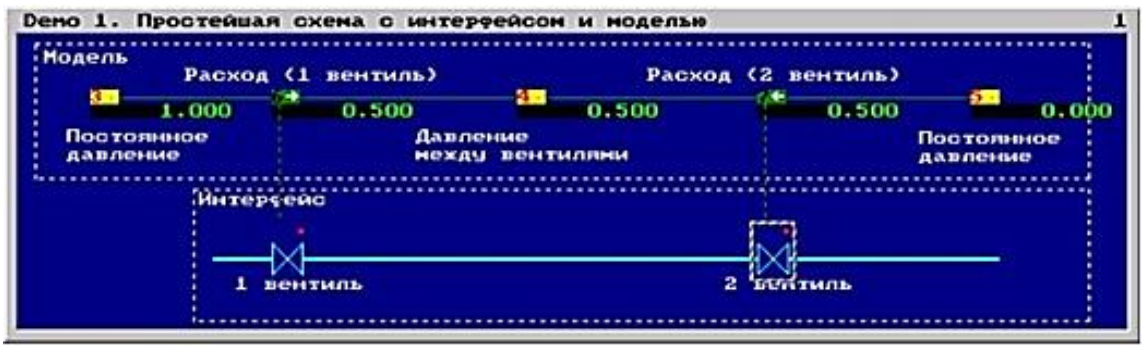


Рис. 2. Схема моделирования трубопроводов

Fig. 2. A piping simulation scheme

сти), подключенные к узлам, определяют текущие расходы (токи, потоки), а по расходам вычисляются новые значения давления в узлах (с учетом их инерционности). Чем меньше коэффициент инерции, тем медленнее меняется давление в узле, и узел становится похожим на емкость с определенным объемом. По данной топологии схемы, используя метод узловых потенциалов, легко автоматически составить систему уравнений, которая в процессе симуляции решается итерационным методом:

$$D_{jn} = (P_{j1n} - P_{j2n})Y_{jn},$$

$$P_{in+1} = P_{in} + (\Sigma_j D_{jn}/\Sigma_j Y_{jn})I_i,$$

где n – номер шага симуляции; i, j – индексы узлов и дуг графа; P – давление в узлах; Y – приведенные проводимости; D – расходы (потоки) в трубах; I – приведенные коэффициенты инерции узлов.

В программном комплексе использованы конфигурации функционирующей на установке реальной *распределенной системы управления* (РСУ). Эти конфигурации загружены в программный комплекс, чтобы точно повторить работу РСУ. Имеется возможность изменения, отладки и тестирования алгоритмов РСУ, достигаемая за счет использования в программном комплексе симулятора контроллеров, полностью повторяющего функциональность реальных контроллеров РСУ и систем противоаварийной защиты. Это позволило в динамическом режиме проводить различные эксперименты по работе с объектом исследования, что ранее не выполнялось.

В силу таких факторов, как безопасность, рентабельность и забота об окружающей среде, обучение операторов является непрерывным и жизненно важным процессом в обрабатывающей промышленности. Потребность в квалифицированных операторах в химической промышленности приводит к поиску новых эффективных методик обучения. Таким образом, методы динамического моделирования рассматриваются как инструмент для обучения и подготовки неопытного персонала, как того требует отрасль [11].

В программном комплексе реализованы следующие функции:

– автоматическая активация требуемой установки;

– регистрация обучаемых;

– регистрация результатов тренинга и возможность автоматизированного контроля и оценки действий обучаемых;

– сохранение текущего состояния ТП в автоматическом режиме и по требованию;

– возможность неограниченного расширения БД сохраненных состояний;

– загрузка и запуск сохраненных состояний технологического режима;

– ускорение, замедление времени моделирования всего ТП или его части по отношению к реальному времени;

– реагирование системы (при обучении и тренировках) на вносимые возмущения со скоростью, не ниже скорости реально протекающих процессов;

– анализ параметров ТП и действий операторов с регистрацией параметров (рис. 3);

– создание, редактирование, запись и активация сценариев нарушений хода ТП;

– возможность создания аварийных и нештатных ситуаций как оперативно, так и в соответствии с заранее подготовленным сценарием;

– создание сценариев для отработки навыков пуска, нормального функционирования, плановой и аварийной остановки производства (объекта) на основании технологических регламентов и других технологических нормативов;

– ведение, запоминание и печать протокола сеанса обучения, включая все действия инструктора и оператора моделируемого процесса, а также сообщения системы тревог;

– генерирование отчетов по результатам тренинга с возможностью их печати.

В программе присутствует справочная система инструктора и предусмотрена возможность его работы одновременно с моделями нескольких схем.

Кроме того, в программном комплексе имеются средства предтренажерной подготовки для обучения операторов диагностированию причин неисправностей и прогнозированию развития аварийных ситуаций в случае неисправностей, а также средства моделирования нештатных ситуаций и отказов.

Моделирование ТП

Моделирование ТП осуществляется на основе решения динамических систем нелинейных дифференциальных уравнений химической кинетики, уравнений состояния для описания фазовых переходов, уравнений тепло- и массообменных процессов, уравнений теплового и материального балансов компонентов продуктов, а также систем уравнений гидродинамики и гидравлики [12].

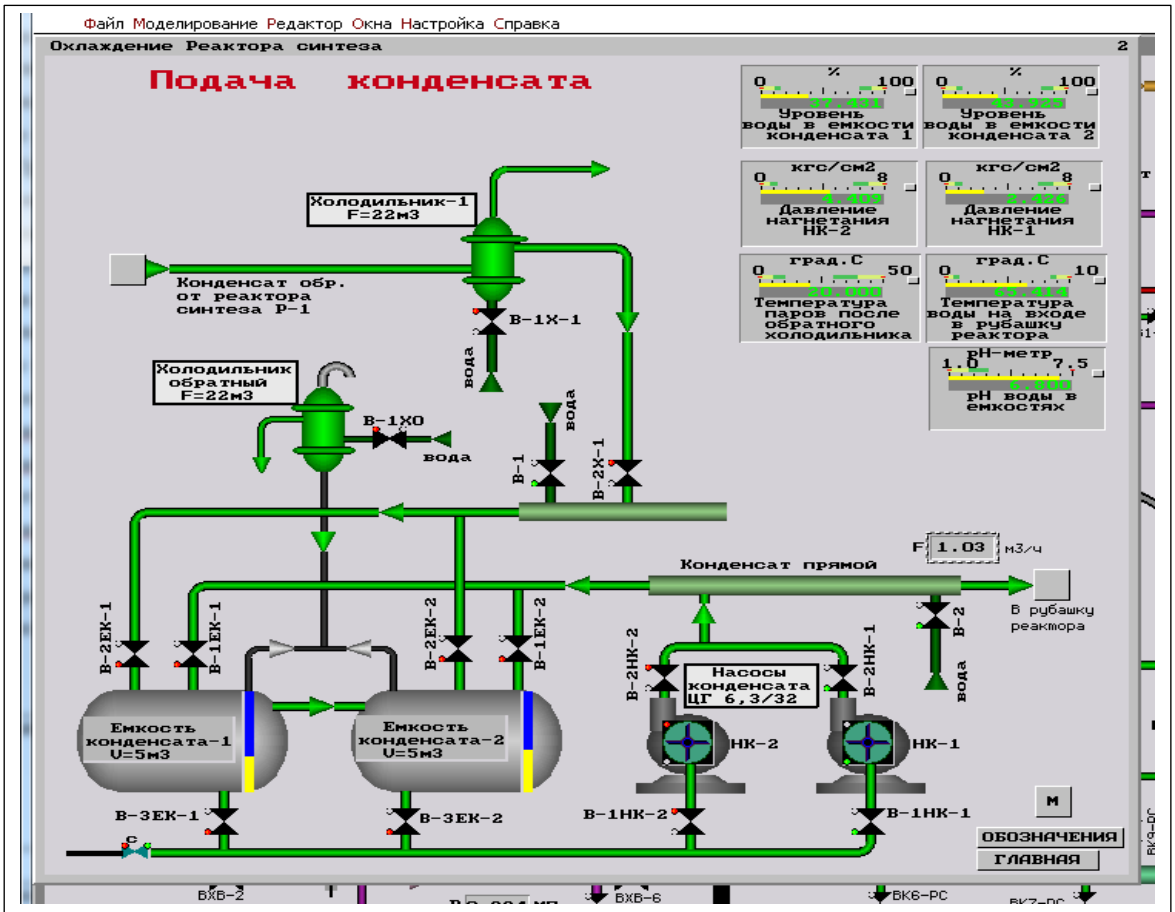


Рис. 3. Пример интерфейса программного комплекса – схема подачи конденсата в рубашку реактора

Fig. 3. An example of the interface of the software package scheme for supplying condensate to the reactor jacket

В моделях учитывается теплообмен с окружающей средой, приводящий к остыванию аппаратов и трубопроводов при их отключении и прекращении подачи продуктов [13].

Выбор математического аппарата моделирования конкретных процессов осуществляется с учетом необходимых для целей обучения точности и степени детализации параметров процессов применительно к режимам нормального функционирования и аварийным ситуациям.

Модели описывают функционирование установки во всех предусмотренных технических режимах (холодном, предпусковом, после останова), с любым количеством продуктов и аппаратов, а также работу оборудования, основных и вспомогательных технических линий при ликвидации аварийных ситуаций. Модели обеспечивают расчет на всех измеряемых на установке дистанционно и по месту параметров и составов отбираемых проб.

Модель ТП адекватно отражает в статике и динамике состояние и поведение ТП и оборудования во всех режимах (от полной остановки до полного вывода на режим с получением качественных продуктов), а также изменение ТП при процедуре пуска установки и остановки объекта в нормальных и аварийных ситуациях. Динамические характеристики моделей аппаратов отражают реальную (или максимально приближенную к реальной) реакцию объекта на возмущения и управляющие воздействия. В качестве таких возмущений следует рассматривать расходы (загрузка по сырью, топлива, теплоносителя и т.п.), давление, состав и температуру потоков, изменения температуры окружающей среды, а также отказы оборудования.

Моделирование ТП осуществляется в следующем объеме:

– основные и вспомогательные технологические линии, необходимые для нормального

пуска, ведения и останова (планового и аварийного) ТП;

– основная и ручная арматура, необходимая для выполнения функций по управлению технологическим объектом в режиме пуска, нормальной эксплуатации, останова (планового и аварийного).

В качестве моделирования использован математический аппарат конструктора динамического моделирования [4].

Моделирование ТП основано на высокоточном моделировании динамических процессов массо- и теплообмена с соблюдением материальных и теплоэнергетических балансов, на физико-химических основных процессах, моделировании состава сырья и продуктов. Уровень моделирования обеспечивает:

– соответствие модели указанным требованиям по точности на всех этапах и режимах процесса по параметрам процесса и качественным показателям продуктов;

– обучение оперативного персонала действиям при локализации и устранению аварийных ситуаций, выявлению причин их возникновения, вызванных отказами оборудования или внешними возмущениями;

– обучение технологического персонала регулированию параметров процесса для получения продукции требуемого качества при изменениях состава и количества сырья;

– расчет динамики температуры, давления, уровня и состава на основе теплового и материального балансов с учетом геометрии емкости, параметров материалов изготовления.

Инструктор в программном комплексе выполняет следующие функции:

– активация программного комплекса требуемой технологической установки;

– регистрация обучаемых;

– управление моделированием ТП, системами управления и системами противоаварийных защит (запуск-останов, загрузка-сохранение состояния, ускорение-замедление скорости моделирования и т.п.);

– имитация неисправностей технологического оборудования и средств КИПиА;

– управление сценариями развития аварийных ситуаций;

– управление тренировочными упражнениями;

– контроль, анализ и оценка действий оператора;

– генерация отчетов по результатам тренинга.

Данный программный комплекс дает возможность проводить обучение на виртуальном реакторе синтеза, который имеет идентичный внешний вид и поведение, обеспечивать его запуск, останов и нормальную работу.

Комплекс позволяет реагировать на сбои в работе оборудования схемы и другие аварийные ситуации (раннее распознавание, предотвращение и проведение корректирующих действий), осуществлять сбор и передачу знаний об эксплуатации реактора среди операторов, повышать знания о процессе и уверенность операторов при эксплуатации реактора синтеза.

Симулятор обучения операторов является альтернативой обучению операторов непосредственно на техническом объекте, не подвергая опасности завод и персонал [14].

Функции программного комплекса выполняются следующими основными модулями:

– управление БД параметров технологического объекта;

– управление базой математических моделей, описывающих поведение технологического объекта;

– реализация математических моделей элементов технологического объекта (как собственно технологического оборудования, так и средств управления им);

– управление базой видеокадров и элементов отображения информации о моделируемом технологическом объекте;

– управление базой технологических ситуаций;

– конструктор тренажерного комплекса для конкретной задачи обучения;

– управление БД обучаемых и анализа статистической информации;

– диспетчер, реализующий управление всем комплексом в процессе обучения;

– интерактивный интерфейс на рабочем месте обучаемого;

– представление справочной информации и контекстной помощи.

В наиболее общем случае программный комплекс технологического оборудования предполагается строить на принципе клиент–сервер с обеспечением многопользовательского доступа [15].

Заключение

Полученный программный комплекс математической компьютерной модели позволяет проводить различные эксперименты в динами-

ческом режиме, исследовать режимные параметры реактора гидрохлорирования кремния. Полученная всережимная математическая динамическая модель процесса дает возможность запускать, останавливать и работать на реакторе синтеза. Показан математический аппарат для описания режимных параметров реактора и впервые разработана компьютерная математическая модель процесса синтеза ТХС действующего производства. Визуализированы ТП объекта исследования. Предложена система контроля, управления и регулирования режимными параметрами реактора для обеспечения безопасности производства. В работе показана важность поддержки режимных параметров работы таких реакторов, чтобы избежать появления локальных зон перегрева, которые могут повлиять на возникновение аварийных ситуаций.

Предложены средства предтренажерной подготовки для обучения операторов диагностированию причин неисправностей и прогнозированию развития аварийных ситуаций в случае неисправностей. Развитые интеллектуальные сценарии позволяют запрограммировать динамику сложных аварийных ситуаций и получить интегральную оценку действий обучаемого по разнообразным критериям, включая контроль текущего и итогового состояний модели.

Данный программный комплекс имеет ощутимые преимущества по сравнению с обычными аналогами. Разработка представляет интерес для специалистов, обслуживающих производство получения ТХС, и направлена на снижение технологических рисков, возникающих в процессе эксплуатации реактора.

Авторы признательны академику РАН, д.т.н., профессору В.П. Мешалкину за научно-методические советы и рекомендации при подготовке данной статьи.

Исследование выполнено по гранту Российского научного фонда, проект № 21-79-30029.

Литература

1. Meshalkin V.P., Dovì V.G., Bobkov V.I. et al. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering. Mendeleev Communications, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 593–604.

2. Яркин В.Н., Кисарин О.А., Критская Т.В. Методы получения трихлорсилана для производства поликристаллического кремния // Изв. высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24. № 1. С. 5–26. DOI: 10.17073/1609-3577-2021-1-5-26.

3. Глушков И.В., Ярославцев А.Г. Конструктор динамического моделирования: Свид. о регистр. ПрЭВМ № 2017614948. Рос. Федерация, 2017.

4. Соколов Ф.П., Сухова А.В., Самсонов В.А. Моделирование технологического процесса получения трихлорсилана с использованием программного комплекса Aspen ONE // Цветные металлы. 2014. № 6. С. 70–75.

5. Meshalkin V.P., Panchenko S.V., Dli M.I., Panchenko D.S. Analysis of the thermophysical processes and operating modes of electrothermic reactor using a computer model. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 166–174. DOI: 10.1134/S0040579518020124.

6. Colombe M., Palanki S., Sylvester N.D. Simulation of the hydrochlorination reaction in a laboratory fluidized bed reactor. Powder Technology, 2016, vol. 292, pp. 242–250. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.12.044.

7. Yadava S., Chattopadhyaya K., Veer Singha C. Solar grade silicon production: A review of kinetic, thermodynamic and fluid dynamics based continuum scale modeling. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, vol. 78, pp. 1288–1314.

8. Besuijen R., Young R., Guaraldo M. Operator training simulators – Nova chemicals' experience for training, certification and other applications. Proc. AIChE Spring National Meeting, 2012.

9. Balaton M.G., Nagy L., Szeifert F. Operator training simulator process model implementation of a batch processing unit in a packaged simulation software. Computers & Chemical Engineering, 2013, vol. 48, pp. 335–344. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.09.005.

10. Глушков И.В., Мешалкин В.П., Мухортова Л.И. Методология алгоритмического и программно-информационного обеспечения тренажеров для повышения энергоэффективности производств // Приоритетные направления развития науки и технологий: сб. тр. XXX Междунар. науч.-практич. конф. 2022. С. 153–157. URL: http://www.semikonf.ru/upload/iblock/529/plkcobfgyweldl_bxdsjksqzrssaacbzrmjubla%20hkxmvaxxxbpglhxlzqezqg%20bqyoztpltxvqjrqh%20ooidvulsfl%20ij%20kzqmppapipacnwtwnkeb.pdf (дата обращения: 03.07.2022).

11. Ayral T., De Jonge P. Operator training simulators for brownfield process units offer many benefits. Hydrocarb Process, 2013, pp. 45–47.

12. Мешалкин В.П., Кохов Т.А., Гартман Т.Н., Корельштейн Л.Б. Аппроксимационная математическая модель процесса теплообмена в сложной теплотехнической системе из нескольких трубопроводов в изоляционном кожухе с неподвижным изотермическим продуктом // Докл. Академии наук. 2018. Т. 481. № 2. С. 161–165. DOI: 10.31857/S086956520001195-7.

13. Meshalkin V.P., Gartman T.N., Kokhov T.A., Korelshtein L.B. Approximate mathematical model of heat exchange in a complex thermal engineering system of several product pipelines carrying a motionless isothermal product within a single insulating jacket. Doklady Chemistry, 2018, vol. 481, no. 1, pp. 152–156. DOI: 10.1134/S0012500818070054.

14. Dipesh S.P., Zainal A., Gade P. Operator training simulators in the chemical industry: Review, issues, and future directions. Reviews in Chemical Engineering, 2014, vol. 30, no. 2, pp. 199–216. DOI: 10.1515/revce-2013-0027.

15. Глушков И.В. Цифровизированный компьютерный тренажерный комплекс (ЦКТК) цеха производства выделения и очистки изопрена завода синтетического каучука. Свид. о регистр. ПрЭВМ № 2022662627. Рос. Федерация, 2022.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.472-481

Received 04.07.22, Revised 15.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 472–481

A software package for simulating a silicon hydrochlorination reactor

I.V. Glushkov [1,2], *Ph.D. (Engineering), Doctoral Student, Director, modteh@mail.ru*
T.B. Chistyakova [3], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, chistb@mail.ru*
Yu.M. Averina [1], *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, averina.i.m@muctr.ru*

[1] *D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow, 125047, Russian Federation*
[2] *Volga-Innovation LLC, Novocheboksarsk, 429950, Russian Federation*
[3] *St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, 190013, Russian Federation*

Abstract. The modern development of industrial enterprises is impossible without introducing information technologies (IT) into the process of their functioning. The IT introduction allows increasing the competitiveness of industrial enterprises. In a market economy, process management involves a range of different risks.

These risks can be modeled using software packages. In the article, the subject of research is the technology of developing a software complex for the reactor for the hydrochlorination of ground silicon operating in dynamic mode. In this work, for the first time at the software level, the main features of the operation of the trichlorosilane synthesis reactor are proposed and shown. Described is material and heat balance of reactor, hydrodynamics of "suspended" layer is shown and visualized. Hydrodynamic and thermal calculations of the synthesis reactor were carried out. These calculations are interpreted into a mathematical graph.

A mathematical apparatus for describing the operating parameters of the reactor is shown and for the first time a computer mathematical model of the process of synthesis of trichlorosilane of active production has been developed. The technological processes of the study object were visualized. System of monitoring, control and regulation of reactor operating parameters to ensure safety of production is proposed. Monitoring and control devices are connected to mathematical model.

With the help of the resulting software model, various experiments can be carried out in "real time". The study has established the importance of maintaining the operating conditions of such reactors, related to the possibility of local overheating zones that may affect the occurrence of emergencies.

The work is of interest to specialists serving the production of trichlorosilane and is aimed at reducing the technological risks arising during the operation of the reactor.

Keywords: software complex, trichlorosilane synthesis reactor, mathematical modeling, risk reduction, technological object.

Acknowledgements. *The authors are grateful to Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor V.P. Meshalkin for scientific and methodological advice and recommendations during the preparation of this article.*

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project no. 21-79-30029.

References

1. Meshalkin V.P., Dovì V.G., Bobkov V.I. et al. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering. *Mendeleev Communications*, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 593–604.
2. Jarkin V.N., Kisarin O.A., Kritskaya T.V. Methods of trichlorosilane synthesis for polycrystalline silicon production. *Izv. Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 5–26 (in Russ.).
3. Glushkov I.V., Yaroslavtsev A.G. *Dynamic Simulation Designer*. Patent RF, no. 2017614948, 2017.
4. Sokolov F.P., Sukhova A.V., Samsonov V.A. Modeling of technological process of trichlorosilane production, using software package Aspen ONE. *Non-ferrous Metals*, 2014, no. 6, pp. 70–75 (in Russ.).
5. Meshalkin V.P., Panchenko S.V., Dli M.I., Panchenko D.S. Analysis of the thermophysical processes and operating modes of electrothermic reactor using a computer model. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 166–174. DOI: 10.1134/S0040579518020124.
6. Colombe M., Palanki S., Sylvester N.D. Simulation of the hydrochlorination reaction in a laboratory fluidized bed reactor. *Powder Technology*, 2016, vol. 292, pp. 242–250. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.12.044.
7. Yadava S., Chattopadhyaya K., Veer Singha C. Solar grade silicon production: A review of kinetic, thermodynamic and fluid dynamics based continuum scale modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 78, pp. 1288–1314.
8. Besuijen R., Young R., Guaraldo M. Operator training simulators – Nova chemicals' experience for training, certification and other applications. *Proc. AIChE Spring National Meeting*, 2012.
9. Balaton M.G., Nagy L., Szeifert F. Operator training simulator process model implementation of a batch processing unit in a packaged simulation software. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, vol. 48, pp. 335–344. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.09.005.
10. Glushkov I.V., Meshalkin V.P., Mukhortova L.I. A methodology of algorithmic and software-information support of simulators to improve the energy efficiency of production. *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Priority Directions of Science and Technology Development*, 2022, pp. 153–157. Available at: http://www.semikonf.ru/upload/iblock/529/plkcobfgyweldl_bxdsjksqzrssaacbzrmjubla%20hkxmvaxxxbpglhxlzqezqg%20bqyoztpltxvqjrqh%20ooidvulsfl%20ij%20kzqmppapipacnwtwnkeb.pdf (accessed July 03, 2022) (in Russ.).
11. Ayral T., De Jonge P. Operator training simulators for brownfield process units offer many benefits. *Hydrocarb Process*, 2013, pp. 45–47.
12. Meshalkin V.P., Kokhov T.A., Gartman T.N., Korelshtein L.B. Approximate mathematical model of the heat exchange process in a complex heat engineering system of several pipelines in an insulating jacket with a fixed isothermal product. *Dokl. Akademii Nauk*, 2018, vol. 481, no. 2, pp. 161–165 (in Russ.)
13. Meshalkin V.P., Gartman T.N., Kokhov T.A., Korelshtein L.B. Approximate mathematical model of heat exchange in a complex thermal engineering system of several product pipelines carrying a motionless isothermal product within a single insulating jacket. *Dokl. Chemistry*, 2018, vol. 481, no. 1, pp. 152–156. DOI: 10.1134/S0012500818070054.
14. Dipesh S.P., Zainal A., Gade P. Operator training simulators in the chemical industry: Review, issues, and future directions. *Reviews in Chemical Engineering*, 2014, vol. 30, no. 2, pp. 199–216. DOI: 10.1515/revce-2013-0027.
15. Glushkov I.V. *A Digitalized Computer Simulator Complex of the Isoprene Isolation and Purification Production Shop of the Synthetic Rubber Plant*. Patent RF, no. 2022662627, 2022.

Для цитирования

Глушков И.В., Чистякова Т.Б., Аверина Ю.М. Программный комплекс моделирования реактора гидрохлорирования кремния // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 472–481. DOI: 10.15827/0236-235X.139.472-481.

For citation

Glushkov I.V., Chistyakova T.B., Averina Yu.M. A software package for simulating a silicon hydrochlorination reactor. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 472–481 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.472-481.

УДК 004.942
DOI: 10.15827/0236-235X.139.482-487
Дата подачи статьи: 15.07.22, после доработки: 02.08.22
2022. Т. 35. № 3. С. 482–487

Компьютерная система для разработки цифровых информационных моделей процессов вторичной переработки нефти

Д.Н. Фураев [1], *аспирант, d.furaev@pmpspb.ru*
Т.Б. Чистякова [1], *д.т.н., профессор, nov@technolog.edu.ru*

[1] *Санкт-Петербургский государственный технологический институт, г. Санкт-Петербург, 190013, Россия*

В работе выделены основные общие характеристики процессов вторичной переработки нефти. Предложено обобщенное информационное описание этих процессов как объектов проектирования и управления. Рассмотрены предпосылки создания и опыт использования цифровых информационных моделей в области нефтепереработки на примере российских компаний.

Предложены функциональная структура компьютерной системы проектирования цифровых информационных моделей объектов вторичной переработки нефти и комплекс средств, включающий математическое, информационное и программное обеспечение, которые позволяют по техническому заданию на проектирование разработать цифровую информационную модель, удовлетворяющую его требованиям по производительности, энергоэффективности, качеству цифровой информационной модели – адекватность, уровень детализации, информационная наполненность, экономичность.

Приведена структура информационного, математического и программного обеспечения. Информационное обеспечение – это набор различных БД: характеристик сырья и катализаторов, основного технологического оборудования и деталей трубопроводов, стандартов на проектирование. Математическое обеспечение составляет библиотека математических моделей процессов вторичной переработки нефти, включая модели кинетики происходящих химических реакций, теплообменных процессов и гидродинамики. Программное обеспечение представляет собой набор программных сред – как авторских разработок, так и уже существующего, применяемого на определенных этапах проектирования.

Предложенная структура компьютерной системы является гибкой и применимой для всех типов процессов вторичной переработки нефти. Модульный принцип построения архитектуры позволяет строить перенастраиваемое информационное и математическое обеспечение на различные типы процессов нефтепереработки. Компьютерная система апробирована на примере процессов каталитического крекинга и изомеризации.

Ключевые слова: *цифровая информационная модель, процесс вторичной переработки нефти, компьютерная система, проектирование, информационное обеспечение, математическое обеспечение, программное обеспечение.*

В процессе развития промышленный объект, согласно СП 333.1325800.2020, проходит несколько последовательных этапов жизненного цикла: проектирование, строительство, эксплуатация, модернизация (реконструкция), капитальный ремонт, снос и ликвидация. Самыми сложными и дорогостоящими являются проектирование и строительство.

Проектирование и строительство новых и реконструкция существующих производств вторичной переработки нефти ведется в соответствии с современными ресурсосберегающими и энергоэффективными требованиями.

Выделяют следующие основные *процессы вторичной переработки нефти* (ПВПН): каталитический крекинг, гидрокрекинг, каталитический риформинг, гидроочистка, каталитическая изомеризация. Перечисленные процессы как объекты проектирования и управления имеют общие признаки: направлены на переработку продукции первичной переработки нефти; выход целевых продуктов зависит от состава исходного сырья, которое, в свою очередь, зависит от места добычи нефти; процессы являются каталитическими, с изменяющейся активностью катализатора в период эксплуатации и с возможностью его регенерации; задействовано разнообразное технологическое оборудование в зависимости от типа процесса, используемого сырья, производительности и энергопотребления; являются высокотемпературными и энергоемкими процессами; управление качеством продукции осуществляется изменением температуры, типом и активно-

стью катализатора, скоростью подачи сырья, давлением в реакторе; процессы протекают в основном в трубчатых реакторах; процессы характеризуются сложными причинно-следственными связями, усложняющими процессы управления: сложная кинетика протекающих химических реакций, зависящая от состава сырья и активности используемого катализатора, изменяющейся со временем эксплуатации.

Таким образом, ПВПН являются сложными объектами проектирования и управления и характеризуются большим количеством взаимозависимых параметров со значительным влиянием возмущающих воздействий.

Несмотря на значительную сложность задачи проектирования промышленных объектов имеются решения для отдельных этапов проектирования в виде математических и имитационных моделей отдельных процессов переработки нефти, БД оборудования, определенных расчетов, трехмерных моделей, которые также могут быть применены к проектированию ПВПН и интегрированы в единую компьютерную платформу проектирования [1–4].

На данный момент нет единой компьютерной системы для данного класса объектов, основанной на цифровой информационной модели и способной перенастраиваться на различные ПВПН.

Цифровые информационные модели

Наиболее востребованным направлением в проектировании является разработка *цифровых информационных моделей* (ЦИМ) объекта проектирования. Существует тенденция формирования проектной и рабочей документации из ЦИМ объекта проектирования, поэтому целью проектных компаний является разработка ЦИМ промышленного объекта с помощью современных сред проектирования на каждом этапе, а затем формирование необходимой документации. При правильном подходе к разработке ЦИМ она служит единым источником данных для расчетных программ, смежных сред проектирования и получения необходимой проектной документации.

Выделяют следующие основные предпосылки разработки ЦИМ: сокращение сроков проектирования и экспертизы, улучшение качества проектирования, оперативное взаимодействие между всеми участниками проектирования, уменьшение числа коллизий при строительстве объекта, ведение точной сметы строительства и закупок, сопровождение эксплуатации объекта, развитие информационных технологий, внедрение инноваций и переход на цифровизацию производств.

Технологии цифровизации, в частности, разработки ЦИМ, внедряются и используются при реконструкции или модернизации действующих производств, а также при строительстве новых промышленных комплектов в крупных российских компаниях [5, 6].

Проектирование объектов ПВПН – сложный многостадийный процесс, являющийся результатом совместного труда проектировщиков различных специальностей, которых можно представить как проектную инжиниринговую команду. Проект состоит из отдельных разделов, за разработку каждого отвечают инженеры соответствующей специализации. На рисунке (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/20.jpg) приведена схема состава ЦИМ объекта ПВПН.

В данном исследовании основное внимание уделено работе инженеров-конструкторов (инженеров-механиков) и инженеров-монтажников, так как в проекте любого промышленного объекта на создание монтажной части проекта приходится около трети всех трудозатрат.

Наиболее сложными и наукоемкими основными этапами проектирования ПВПН являются:

– выбор, размещение и компоновка технологического оборудования в соответствии с *техническим заданием* (ТЗ) на проектирование с обеспечением заданной производительности, энергопотребления, качества продукции;

– выбор и трассировка технологических трубопроводов в соответствии с требованиями ТЗ по производительности и ресурсопотреблению [7].

Структура компьютерной системы

Разработана функциональная структура компьютерной системы, включающая информационное, математическое и программное обеспечение, интерфейсы проектировщика, обучаемого, инженера по знаниям и администратора. Структура системы приведена на рисунке 1.

Компьютерная система включает [8, 9]:

– БД характеристик сырья, характеристик катализаторов, технологического оборудования, деталей трубопровода, норм и стандартов на проектирование;

– библиотеку математических моделей ПВПН (кинетика химических реакций, тепло-

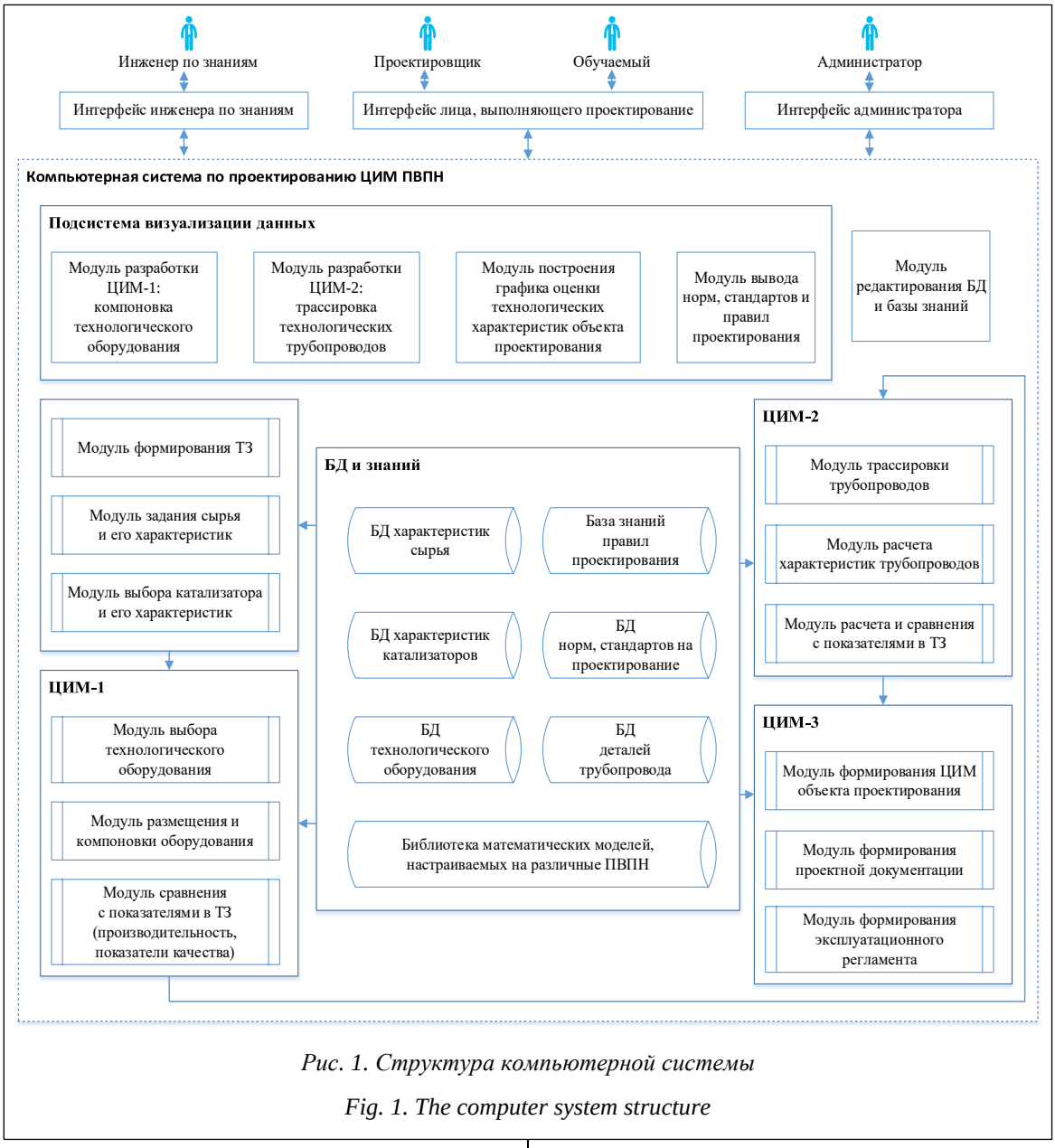


Рис. 1. Структура компьютерной системы

Fig. 1. The computer system structure

обменные процессы, гидродинамика), настраиваемых на различные периоды эксплуатации и активность катализатора, компоновки технологического оборудования, трассировки трубопроводов;

– интерфейсы инженера по знаниям, проектировщика, обучаемого, администратора;

– модули разработки ЦИМ, задания сырья и его характеристик, выбора катализатора и его характеристик, выбора технологического оборудования и его размещения и компоновки, трассировки трубопроводов и расчета его характеристик, вывода норм и стандартов на проектирование, расчета и сравнения показателей с ТЗ, формирования проектной документации.

Комплекс средств компьютерной системы

Математическое обеспечение компьютерной системы построено на базе кинетики химических реакций ПВПН, математических моделей материального и теплового балансов реактора, математических моделей компоновки технологического оборудования, расчета и трассировки трубопроводов. Обобщенная модель ПВПН представлена на рисунке 2.

Информационное обеспечение компьютерной системы состоит из различных БД – характеристик сырья, катализаторов, технологического оборудования и деталей трубопроводов,

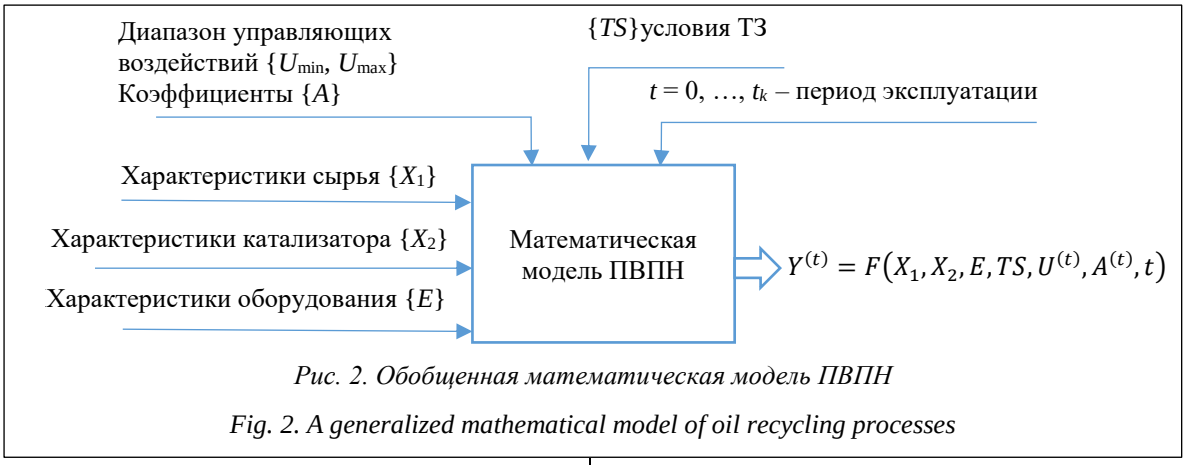


Рис. 2. Обобщенная математическая модель ПВПН

Fig. 2. A generalized mathematical model of oil recycling processes

стандартов и норм на проектирование. Общая схема структуры информационного обеспечения приведена на рисунке (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/40.jpg).

ПО включает различные программные среды – как авторские разработки, так и существующее ПО, применяемое для решения задач определенных этапов проектирования. На выбор программных сред влияют способность корректного решения задач для данного класса объектов и их стоимость. Структура ПО приведена на рисунке (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/21.jpg).

Заключение

Тестирование и разработка ЦИМ проведены на примере установок каталитического крекинга производительностью 2 500 тыс. т/год и потребляемой мощностью 23 тыс. кВт, изомеризации производительностью 608 тыс. т/год и потребляемой мощностью 44 тыс. кВт.

Предложенная компьютерная система позволяет решать задачу проектирования объектов вторичной переработки нефти за счет разработки цифровых информационных моделей, а также производить контроль и мониторинг выполнения ТЗ на проектирование или реконструкцию на всех этапах проектирования ПВПН.

Использование данной компьютерной системы обусловливает повышение качества проектной документации и снижение временных и финансовых затрат на проектирование.

Исследование выполнено по гранту Российского научного фонда, проект № 21-79-30029.

Литература

1. Лысенкова С.А. О математическом моделировании каталитического крекинга // Вестн. кибернетики. 2018. № 4. С. 107–110.
2. Mokrozub V.G., Malygin E.N. Development of decision-making support systems to design chemical process equipment for batch production. Advanced Materials and Technologies, 2019, no. 2, pp. 48–58. DOI: 10.17277/amt.2019.02.pp.048-058.
3. Нигматуллин В.Р., Костенков Д.М., Коскина А.И. и др. Инструменты для автоматизированного расчета давлений испытаний, контроля сварных швов, термообработки стыков трубопроводов в среде САПР AVEVA PDMS/E3D // Нефтегазовое дело. 2019. № 5. С. 173–184. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5_2019/ogbus_5_2019_p173-184.pdf (дата обращения: 13.07.2022). DOI: 10.17122/ogbus-2019-5-173-184.
4. Sierla S., Azangoo M., Fay A., VyatkinV., Papakonstantinou N. Integrating 2D and 3D digital plant information towards automatic generation of digital twins. Proc. XXIX IEEE ISIE, 2020, pp. 460–467. DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152371.
5. Фонтокина В.А., Савенко А.А., Самарский Е.Д. Роль BIM-технологий в организации и технологии строительства // Вестн. евразийской науки. 2022. Т. 14. № 1. С. 1–11.
6. Куклина Е.А. Стратегия цифровой трансформации как инструмент реализации бизнес-стратегии компании нефтегазового сектора современной России // Управленческое консультирование. 2021. № 6. С. 40–53. DOI: 10.22394/1726-1139-2021-6-40-53.

7. Мешалкин В.П., Мошев Е.Р. Режимы функционирования автоматизированной системы «Трубопровод» при интегрированной логистической поддержке трубопроводов и сосудов промышленных предприятий // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014. № 1. С. 64–73.

8. Фураев Д.Н., Чистякова Т.Б. Компьютерная система для обучения ресурсосберегающему проектированию процессов вторичной переработки нефти // Изв. СПбГТИ (ТУ). 2021. № 59. С. 101–106. DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-101-106.

9. Фураев Д.Н., Чистякова Т.Б. Программный комплекс для проектирования установок каталитического крекинга // ММТТ. 2019. Т. 12-3. С. 18–21.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.482-487

Received 15.07.22, Revised 02.08.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 482–487

A computer system for developing digital information models of oil recycling processes

D.N. Furaev [1], *Postgraduate Student, d.furaev@pmpspb.ru*
T.B. Chistyakova [1], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, nov@technolog.edu.ru*

[1] *Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint-Petersburg, 190013, Russian Federation*

Abstract. The paper highlights main general characteristics of the secondary oil refining processes. It proposes a generalized information description of the secondary oil refining processes as the objects of design and management. It also considered the prerequisites for creating and experience of using digital information models in the field of oil refining on the example of Russian companies.

The authors propose a functional structure of a computer system for designing digital information models of oil recycling facilities and a set of tools including information, mathematical support and software. The latter allow, according to the design specification, developing a digital information model that meets the requirements of the technical specification for performance, energy efficiency, quality of a digital information model – the model adequacy, the level of detail, information content, the model economy.

There is the structure of information, mathematical and software in the paper. Information support is a set of various databases: characteristics of raw materials and catalysts, characteristics of the main technological equipment and pipeline parts, design standards. Mathematical support is a library of mathematical models of oil recycling processes including models of the kinetics of chemical reactions, heat exchange processes and hydrodynamics. Software is a set of software environments, both author's developments and existing software used at certain design stages.

The proposed structure of the computer system is flexible and applicable for all types of oil recycling processes; the modular principle of architecture construction allows building reconfigurable information and mathematical support for various types of oil refining processes. The computer system has been tested on the example of catalytic cracking and isomerization processes.

Keywords: digital information model, oil recycling process, computer system, design, information support, mathematical support, software.

Acknowledgements. *The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project no. 21-79-30029.*

References

1. Lysenkova S.A. On mathematical modeling of catalytic cracking. *Proceedings in Cybernetics*, 2018, no. 4, pp. 107–110 (in Russ.).

2. Mokrozub V.G., Malygin E.N. Development of decision-making support systems to design chemical process equipment for batch production. *Advanced Materials and Technologies*, 2019, no. 2, pp. 48–58. DOI: 10.17277/amt.2019.02.pp.048-058.

3. Nigmatullin V.R., Kostenkov D.M., Koskina A.I. et al. Tools for automated calculation of test pressures, welding control, pipeline joints heat treatmentin in CAD AVEVA PDMS/E3D. *Oil and Gas Business*, 2019, no. 5, pp. 173–184. Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5_2019/ogbus_5_2019_p173-184.pdf (accessed July 13, 2022) (in Russ.). DOI: 10.17122/ogbus-2019-5-173-184.

4. Sierla S., Azangoo M., Fay A., VyatkinV., Papakonstantinou N. Integrating 2D and 3D digital plant information towards automatic generation of digital twins. *Proc. XXIX IEEE ISIE*, 2020, pp. 460–467. DOI: 10.1109/ISIE45063.2020.9152371.

5. Fontokina V.A., Savenko A.A., Samarskiy E.D. The role of BIM technologies in the construction economy. *The Eurasian Scientific J.*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 1–11 (in Russ.).

6. Kuklina E.A. Digital transformation strategy as a tool for implementing the business strategy of a company in the oil and gas sector of modern Russia. *Administrative Consulting*, 2021, no. 6, pp. 40–53. DOI: 10.22394/1726-1139-2021-6-40-53.

7. Meshalkin V.P., Moshev E.R. Modes of functioning of the automated system "Pipeline" with the integrated logistical support of pipelines and vessels of industrial enterprises. *Engineering and Automation Problems*, 2014, no. 1, pp. 64–73 (in Russ.).

8. Furaev D.N., Chistyakova T.B. Computer system for teaching resource-saving design of oil recycling processes. *Bull. of St PbSIT (TU)*, 2021, no. 59, pp. 101–106. DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-101-106 (in Russ.).

9. Furaev D.N., Chistyakova T.B. Software package for the design of energy-saving catalytic cracing plant. *Mathematical Methods in Engineering and Technology*, 2019, vol. 12-3, pp. 18–21 (in Russ.).

Для цитирования

Фураев Д.Н., Чистякова Т.Б. Компьютерная система для разработки цифровых информационных моделей процессов вторичной переработки нефти // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 482–487. DOI: 10.15827/0236-235X.139.482-487.

For citation

Furaev D.N., Chistyakova T.B. A computer system for developing digital information models of oil recycling processes. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 482–487 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.482-487.

УДК 004.032
DOI: 10.15827/0236-235X.139.488-492
Дата подачи статьи: 26.07.22, после доработки: 28.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 488–492

Оценка граничных значений среднего времени отклика на запрос пользователя информационной системы

М.Н. Шелест [1], *аспирант, mshshelest@mail.ru*
Т.М. Татарникова [1], *д.т.н., профессор, tm-tatarn@yandex.ru*

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, 190000, Россия*

В работе предложены методы оценки верхней и нижней границ среднего времени отклика больших информационных систем на запрос пользователя.

Под запросом пользователя понимается транзакция, состоящая из последовательности команд, для выполнения которых резервируются вычислительные ресурсы. Транзакция формализуется в виде маршрута, представляющего собой цепочку пар «обслуживающее устройство–буфер», число которых равно числу команд транзакции. При этом обслуживающее устройство является средством выполнения команд транзакций, а буфер – памятью для фиксации результатов выполнения и ожидания времени для поступления на обслуживание. Выделение групп слабо связанных маршрутов позволяет выполнять параллельную обработку транзакций.

Предложена математическая схема большой информационной системы с группировкой маршрутов транзакций в виде сети массового обслуживания, так что каждая заявка пользователя проходит определенный маршрут из обслуживающих устройств. Метод оценки верхней границы среднего времени отклика системы на запрос пользователя основан на добавлении избыточных зависимостей и дублировании некоторых обслуживающих узлов, метод оценки нижней границы – на удалении обслуживающих узлов, играющих роль слабой связи между соседними маршрутами сети массового обслуживания.

Методы позволяют подобрать параметры, удовлетворяющие требованиям к разрабатываемой информационной системе и, соответственно, отвечающие показателям качества обслуживания пользователей информационных систем.

Ключевые слова: *большая информационная система, сеть массового обслуживания, запрос пользователя, среднее время отклика на запрос, граничные значения среднего времени отклика.*

Неотъемлемой частью полноценного функционирования многих организаций и предприятий являются большие *информационные системы* (ИС) [1, 2]. Для успешного запуска системы, которая будет удовлетворять заданным потребностям, еще на этапе проектирования необходимо проводить предварительный анализ характеристик ее функционирования [3, 4]. Одной из наиболее важных характеристик ИС является время отклика на запрос пользователя. Часто для оценки временных характеристик ИС прибегают к анализу модели системы, в роли которой выступает *сеть массового обслуживания* (СеМО). Время отклика ИС в данном случае соответствует среднему времени пребывания заявки в СеМО [5].

Однако даже в случае использования модели ИС вычисление истинного значения средней задержки для большинства СеМО является сложной, а порой и неразрешимой задачей из-за масштабности исследуемых систем. В таких ситуациях для оценки среднего времени пребывания заявок в сети прибегают к построению граничных значений [6, 7].

В данной работе рассмотрены методы построения верхнего и нижнего граничных значений для средней задержки заявки в СеМО.

Описание математической схемы большой ИС

Основной идеей нахождения граничных значений среднего времени пребывания заявки в СеМО является некоторое упрощение структуры исходной СеМО для возможности дальнейшего аналитического расчета.

Рассмотрим сеть, состоящую из пронумерованного набора элементарных систем массового обслуживания. Каждая из систем представляет собой пару «обслуживающее устройство–буфер», в которой обслуживающее устройство является средством выполнения команд транзакций, а буфер – памятью для фиксации результатов выполнения команд транзакций и ожидания времени для поступления на обслуживание. Предлагаемая модель ИС подразумевает, что для нее заранее известен набор последовательностей обслуживающих

устройств, в которых с заданной вероятностью будут обрабатываться транзакции. Таким образом, можно сказать, что каждая заявка пользователя ИС проходит определенный маршрут из обслуживающих устройств в СеМО. Также отметим, что при прохождении маршрута заявка не задерживается в промежуточных буферах, так как согласно правилу резервирования ресурсов для выполнения транзакций все обслуживающие устройства на маршруте заявки свободны [8]. Таким образом, набор маршрутов R представляется как список векторов с номерами обслуживающих устройств и полностью описывает структуру СеМО.

Каждый маршрут в СеМО характеризуется вероятностью появления заявок, обслуживаемых на маршруте, а каждое обслуживающее устройство – интенсивностью обслуживания и коэффициентом вариации времени обслуживания.

Методы определения верхней и нижней границ среднего времени отклика ИС на запрос

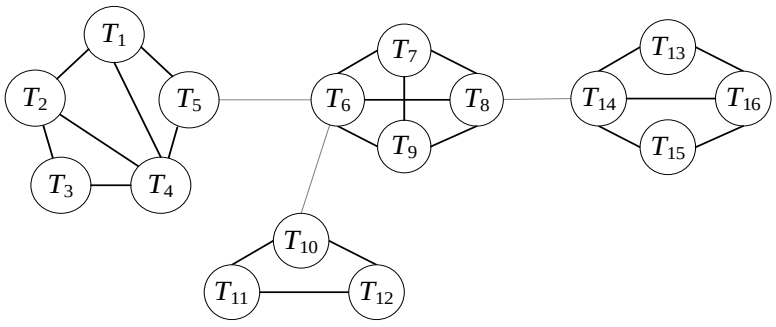
Предлагаемые в работе методы основаны на добавлении избыточных зависимостей и дублировании некоторых обслуживающих узлов при определении значения верхней границы быстродействия большой ИС и удалении обслуживающих узлов, играющих роль слабой связи между соседними маршрутами СеМО.

Рассмотрим модель большой ИС, в которой наблюдаются частые пересечения некоторых маршрутов (рис. 1). Полное множество транзакций включает 16 маршрутов разной длины. Для обеспечения параллельной обработки запросов пользователей предлагается все множество маршрутов разбить на слабосвязанные группы маршрутов – кластеры.

Внутри каждого кластера одновременно может обслуживаться только одна заявка. Поступая на обслуживание, заявка блокирует все обслуживающие устройства своего маршрута. Необходимо понимать, что все смежные маршруты также окажутся заблокированными, поскольку имеют общие вычислительные ресурсы [9, 10]. Это означает, что за счет блокировки маршрутов, соединяющих соседние кластеры (то есть связующих узлов T_5, T_6, T_{10}, T_8 и T_{14} для графа на рис. 1), среднее время пребывания заявок в подграфах, образующих кластеры, не может быть рассчитано независимо от времени обработки заявок на подобных маршрутах.

Таким образом, предлагаются методы оценки верхнего и нижнего граничных значений среднего времени отклика ИС на запрос.

Метод оценки верхней границы подразумевает дублирование связующих узлов и введение в граф зависимости маршрутов дополнительных фиктивных соединений, чтобы кластер вместе со всеми смежными связующими узлами образовал отдельный полносвязный подграф. Очевидно, что связующие узлы T_5, T_6, T_{10}, T_8 и T_{14} на рисунке 1 должны быть продублированы в каждом связанном с ними подграфе и к ним добавлены связи от остальных узлов



Кластер 1:
T_1=[1 2 3];
T_2=[1 4 5 6];
T_3=[4 5];
T_4=[1 2 3 4];
T_5=[2 7];

Кластер 2:
T_6=[7 8 9 10];
T_7=[9 11 13];
T_8=[9 12 13];
T_9=[9 12];

Кластер 3:
T_{10}=[10 14 15];
T_{11}=[14 16];
T_{12}=[14 15 16];

Кластер 4:
T_{13}=[17 19];
T_{14}=[13 17 18 19];
T_{15}=[18 20];
T_{16}=[1718 20];

Рис. 1. Представление маршрутов выполнения транзакций в виде графа

Fig. 1. A representation of transaction execution routes in the form of a graph

подграфа. За счет таких дополнений среднее время отклика ИС на запрос будет несколько увеличено, но зато позволит вычислить его для каждого кластера. Верхнее граничное значение среднего времени отклика ИС на запрос для всей СеМО вычисляется по следующей формуле:

$$\hat{T}^{UP_1} = \sum_{k=1}^{K} P_k \left(\frac{\Lambda_k}{2} \int_0^{\infty} t^2 \varphi_k(t)\, dt \int_0^{\infty} \frac{\varphi_k(t)\, dt}{\left(1 - \Lambda_k \int_0^{t} x \varphi_k(x)\, dx\right)^2} + \frac{1}{M_k} \right),$$

где P_k – вероятность поступления заявки в k-й полносвязный подграф; Λ_k – интенсивность поступления заявок в k-й полносвязный подграф; $\varphi_k(t)$ – плотность вероятности времени обслуживания в k-м полносвязном подграфе; M_k – интенсивность обслуживания заявок в k-м полносвязном подграфе.

Метод оценки нижней границы среднего времени отклика ИС на запрос заключается в поиске групп слабо связанных маршрутов, на которых не могут одновременно обрабатываться заявки. Такие группы представляют собой полносвязные подграфы, максимальные по включению вершин, – клики. Поиск клик производится на основе алгоритма Брона–Кербоша, после чего согласно алгоритму LBS (Load Based Strategy) из полученного набора клик выбираются отдельные клики, а связи между ними удаляются.

Согласно алгоритму LBS, разбиение на клики основано на величине загрузки множества маршрутов, входящих в состав клик. На каждом шаге для всех клик рассчитывается среднее время отклика ИС на запрос, после чего выбирается клика, для которой эта величина принимает наибольшее значение (рис. 2). В результате разделения графа маршрутов на отдельные полносвязные подграфы с удалением соединяющих связей будет получен набор групп маршрутов. Все группы могут принимать заявки на обслуживание независимо друга от друга, но в каждой группе может обслуживаться только одна заявка. Таким образом, зная общую интенсивность обслуживания в каждой выделенной клике и плотность вероятности времен обслуживания в узлах подграфа, можно оценить среднее время пребывания заявки в преобразованной СеМО, состоящей из отдельных групп маршрутов.

На рисунке 3 приведены результаты моделирования работы СеМО и определения верхних и нижних граничных значений, найденных по предлагаемым методам.

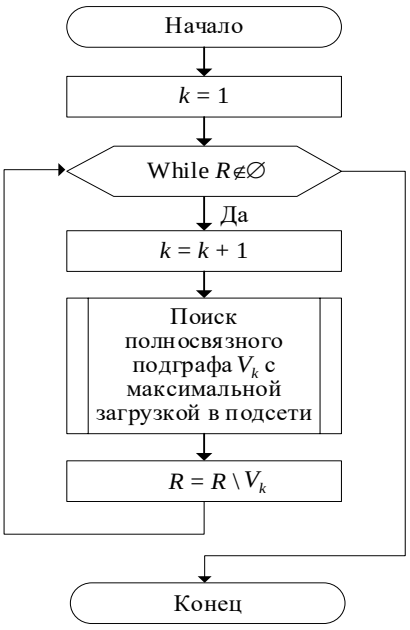


Рис. 2. Блок-схема алгоритма LBS

Fig. 2. A block diagram of the LBS algorithm

Отличительной особенностью методов нахождения верхнего граничного значения на основе избыточных зависимостей и нижнего граничного значения с помощью алгоритма LBS является высокая точность результатов, которую они показывают для больших ИС. Точность обусловлена тем, что большая ИС включает многочисленные ресурсы, которые сильно зависят друг от друга, и поэтому дублирование связующих узлов при нахождении верхней границы будет оказывать минимальное влияние на среднее время отклика ИС на запрос пользователя в каждом выделенном кластере. В свою очередь, выделение в отдель-

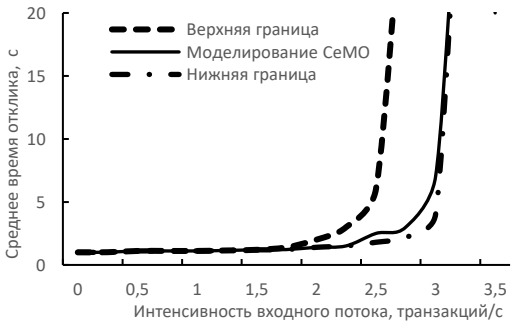


Рис. 3. Графики верхней и нижней границ для среднего времени отклика ИС на запрос

Fig. 3. Graphs of the upper and lower bounds for the information system average response time to a request

ные подсистемы более загруженных ресурсов для нахождения нижней границы приводит к беспрепятственной работе остальных частей системы.

Поскольку оба метода опираются на топологию графа маршрутов транзакций, для оценки влияния структуры СеМО на точность полученных оценок был проведен ряд экспериментов, анализ которых позволил сделать следующие выводы:

– точность верхней границы среднего времени пребывания заявки в СеМО напрямую зависит от размеров кластеров схожих транзакций;

– при довольно больших размерах кластеров методы дают возможность получить практически точную оценку временной характеристики системы;

– увеличение размеров кластеров приводит к сужению коридора возможных значений среднего времени пребывания заявки в СеМО.

Заключение

Анализ зависимостей верхней и нижней границ от интенсивности входного потока запросов пользователей позволяет не только оценить среднее время отклика ИС на запрос пользователя, но и выявить критическую точку перегрузки. Предложенные в работе методы дают возможность подобрать параметры ИС, удовлетворяющие требованиям к разрабатываемой системе и, соответственно, отвечающие показателям качества обслуживания пользователей ИС.

Литература

1. Проскуряков Н.Е., Ануфриева А.Ю. Анализ и перспективы современных систем хранения цифровых данных // Изв. ТулГУ: Технические науки. 2013. № 3. С. 368–377.

2. Gnanasundaram S., Shrivastava A. Information Storage and Management. NJ, John Wiley & Sons Publ., 2016, 544 p.

3. Фомин Д.С., Бальзамов А.В. Проблематика обработки транзакций при использовании микросервисной архитектуры. Изв. вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2021. Т. 58. № 2. С. 15–23. DOI: 10.21685/2072-3059-2021-2-2.

4. Кутузов О.И., Татарникова Т.М. Инфокоммуникационные сети. Моделирование и оценка вероятностно-временных характеристик. СПб: Изд-во ГУАП, 2015. 382 с.

5. Shelest M.N., Bakin E.A. Analysis of parallel queueing network with mutual expectations. WECONF, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604361.

6. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. On the acceleration of simulation modeling. Proc. XXII Int. Conf. SCM, 2019, pp. 45–47. DOI: 10.1109/SCM.2019.8903785.

7. Шелест М.Н. Анализ средней задержки для одной модели сети массового обслуживания с резервированием ресурсов // Информационно-управляющие системы. 2022. № 2. С. 32–41. DOI: 10.31799/1684-8853-2022-2-32-41.

8. Challawala S., Mehta C., Patel K., Lakhatariya J. MySQL 8 for Big Data: Effective Data Processing with MySQL 8, Hadoop, NoSQL APIs, and Other Big Data Tools. Packt Publishing, Birmingham, 2017, 266 p.

9. Богатырев В.А., Богатырев А.В., Богатырев С.В. Оценка надежности выполнения кластерами запросов реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 4. С. 46–48.

10. Богатырев В.А., Кармановский Н.С., Попцова Н.А., Паршутина С.А., Воронина Д.А., Богатырев С.В. Имитационная модель поддержки проектирования инфокоммуникационных резервированных систем // Науч.-технич. вестн. информ. технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 5. С. 831–838. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.488-492

Received 26.07.22, Revised 28.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 488–492

Boundary values evaluation for average response time to an information system user request

M.N. Shelest [1], *Postgraduate Student, mshshelest@mail.ru*
T.M. Tatarnikova [1], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, tm-tatarn@yandex.ru*

[1] *Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation*

Abstract. The paper proposes methods for estimating the upper and lower bounds of the average response time of large information systems to a user request.

A user request is a transaction consisting of a sequence of commands for which computing resources are reserved. The transaction is formalized as a route, which is a chain of "server-buffer" pairs, their number is equal to the number of transaction commands. At the same time, the service device is a mean of executing transaction commands; the buffer is a memory for fixing the results of executing transaction commands and waiting for the time to arrive for service. Allocation of loosely coupled route groups allows parallel processing of transactions.

The authors propose a mathematical scheme of a large information system that organizes transaction routes in the form of a queuing network, so that each user request passes a certain route from the service devices. The method for estimating the upper bound on the average response time of the system to a user request is based on adding redundant dependencies and duplicating some service nodes. The method for estimating the lower bound of the average response time of the system to a user request is based on the removal of serving nodes that play the role of a weak connection between neighboring routes of the queuing network.

The proposed methods allow selecting such parameters that meet the requirements for the information system being developed and, accordingly, meet the indicators of the quality of service for users of information systems.

Keywords: big information system, queuing network, user request, average response time to a request, boundary values of the average response time.

References

1. Proskuryakov N.E., Anufrieva A.Yu. Analysis and prospects of modern systems of storage of figures. *Proceedings of the TSU*, 2013, no. 3, pp. 368–377 (in Russ.).

2. Gnanasundaram S., Shrivastava A. *Information Storage and Management*. NJ, John Wiley & Sons Publ., 2016, 544 p.

3. Fomin D.S., Balzamov A.V. The problem of transaction processing using microservice architecture. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*, 2021, vol. 58, no. 2, pp. 15–23. DOI: 10.21685/2072-3059-2021-2-2 (in Russ.).

4. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. *Infocomm Networks. Modeling and Evaluation of Probabilistic-temporal Characteristics*. St. Petersburg, 2015, 382 p. (in Russ.).

5. Shelest M.N., Bakin E.A. Analysis of parallel queueing network with mutual expectations. *WECONF*, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604361.

6. Kutuzov O.I., Tatarnikova T.M. On the acceleration of simulation modeling. *Proc. XXII Int. Conf. SCM*, 2019, pp. 45–47. DOI: 10.1109/SCM.2019.8903785.

7. Shelest M.N. Average delay estimation for one queueing network model with resource reservation. *Information and Control Systems*, 2022, no. 2, pp. 32–41. DOI: 10.31799/1684-8853-2022-2-32-41 (in Russ.).

8. Challawala S., Mehta C., Patel K., Lakhatariya J. *MySQL 8 for Big Data: Effective Data Processing with MySQL 8, Hadoop, NoSQL APIs, and Other Big Data Tools*. Packt Publishing, Birmingham, 2017, 266 p.

9. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Estimation of reliability of execution of real-time queries. *J. of Instrument Engineering*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 46–48 (in Russ.).

10. Bogatyrev V.A., Karmanovskiy N.S., Poptsova N.A., Parshutina S.A., Voronina D.A., Bogatyrev S.V. Simulation model for design support of infocomm redundant systems. *Scientific and Technical J. of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 831–838. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-831-838 (in Russ.).

Для цитирования

Шелест М.Н., Татарникова Т.М. Оценка граничных значений среднего времени отклика на запрос пользователя информационной системы // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 488–492. DOI: 10.15827/0236-235X.139.488-492.

For citation

Shelest M.N., Tatarnikova T.M. Boundary values evaluation for average response time to an information system user request. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 488–492 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.488-492.

УДК 004.93
DOI: 10.15827/0236-235X.139.493-501
Дата подачи статьи: 27.05.22, после доработки: 08.06.22
2022. Т. 35. № 3. С. 493–501

Метод межсегментной оценки выделения паттернов движения из кинематических траекторий, регистрируемых средствами экзоскелетной системы

Н.В. Провоторов [1], *аспирант, provotorovworkmail@gmail.com*
И.Н. Таратонов [2], *генеральный директор, Ilya.taratonov@1221.su*
Ю.Н. Филиппович [1], *к.т.н., профессор, y_philippovich@mail.ru*

[1] *Московский политехнический университет, г. Москва, 107023, Россия*
[2] *«ПОЛДЕНЬ. 21-Й ВЕК» (1221), г. Москва, 111024, Россия*

Предложен метод выделения паттернов движения оператора из кинематических траекторий, регистрируемых экзоскелетной системой. Цель построения метода обусловлена задачей обнаружения и классификации движений оператора экзоскелетной системы поддержки физической работоспособности в режиме реального времени для предиктивного управления исполнительными элементами конструкции, а также прогнозирования дальнейшего состояния человеко-машинной системы.

В контексте работы кинематические траектории определяются как проекции движения сегмента конечности на плоскости декартовой системы координат. Такие проекции группируются по признаку принадлежности к описываемой плоскости и сегменту конечности и представляют собой информационную модель исследуемого движения. Утверждение справедливо и для модели ожидаемого движения, описанного траекторными паттернами.

В рамках задачи выделения паттернов движения предложен метод межсегментной оценки кинематических траекторий, базирующийся на достижениях в области биомеханики движения человека, в частности, на исследованиях кинематики циклического движения. Основная идея заключается в поиске признаков совершаемого движения, представленных в виде одного паттерна или упорядоченной последовательности в траекториях, описываемых сегментами конечности во фронтальной и сагиттальной плоскостях. В качестве базовых алгоритмов для выделения паттерна используется область цифровой обработки сигналов. Разработанный метод представлен в виде модели, на основе которой построен программный прототип. В работе также освещены результаты апробации прототипа на эмпирических данных, полученных при помощи исследовательской платформы экзоскелетной системы.

Ключевые слова: *экзоскелетная система, анализ кинематических траекторий, паттерн циклического движения, межсегментная оценка, предиктивное управление.*

В активно развивающейся области *экзоскелетных систем* (ЭКЗ) крупным направлением являются системы поддержки физической работоспособности человека. Одна из задач таких систем – распознавание образа совершаемого человеком движения и дополнение естественной локомоции для увеличения эффективности путем уменьшения физических затрат оператора. В отечественной [1–3] и зарубежной [4–7] литературе для анализа движения применяются методы, представленные следующими областями:

– структурный и клинический анализ движения, имеющий комплексный характер (подометрическая, гониометрическая, динамометрическая, биоэлектрическая и кинематическая составляющие), с экспертной оценкой на основании известных закономерностей и коррелирующих признаков локомоций [8, 9];

– искусственные нейронные сети, в которых осуществляется анализ движения на наличие ожидаемых паттернов в исследуемых данных; в работах [4, 6] для этого применяются глубокая сверточная сеть и сеть обратного распространения ошибки;

– цифровая обработка сигналов, где в качестве примера для поиска ожидаемого паттерна движения применяется алгоритм динамического сжатия времени (DTW) [5].

Также перспективным направлением является анализ движения в виде электроэнцефалограммы оператора [10, 11]. Чаще всего локомоции рассматриваются путем траекторного (пространственного) способа представления и в виде кривых биоэлектрической активности мускулатуры [12, 13]. В настоящий момент большими преимуществами по сравнению с представленными выше методами обладает

описание движения в виде траекторного представления. Это обусловлено количеством информационной составляющей в модели движения, большей простотой регистрации физического параметра и особенностями применения измерительной системы в составе внешней конструкции ЭКЗ [9, 14]. На основании этого данный способ описания выбран в качестве основного при формировании информационной модели.

В отличие от ранее представленных методов распознавания движения межсегментная оценка предлагает анализ паттернов, выделенных из кинематических траекторий посредством взаимного сопоставления полученных признаков в активных (участвующих в локомоции) сегментах конечности. Данный метод применяется авторами в ЭКЗ нижних конечностей поддержки физической работоспособности оператора.

Построение метода обусловлено необходимостью обнаружения и классификации движений оператора ЭКЗ поддержки физической работоспособности в режиме реального времени для предиктивного управления исполнительными элементами конструкции, а также прогнозирования дальнейшего состояния человеко-машинной системы. Метод направлен на решение задачи выделения ожидаемого сигнала из регистрируемых траекторий с целью дальнейшего обнаружения. Для выполнения первичного прототипирования и оценки применимости предлагаемого метода при построении модели сделаны допущения об исключении ландшафтных особенностей местности при регистрации кинематических траекторий.

Идея, положенная в основу подхода к выделению ожидаемого паттерна, заключается в представлении совершаемого движения в виде кинематических траекторий, описанных в нескольких плоскостях для выделенной группы сегментов конечности [8, 9]. Алгоритм выделения предполагает обработку входных данных в несколько этапов:

– проход группой паттернов движения по регистрируемой кинематической траектории с целью получения сырых (до прохождения через систему критериев фильтра) отметок потенциального расположения ожидаемого сигнала в каждой рассматриваемой плоскости;

– фильтрация сырых отметок для подавления шума и сигналоподобных всплесков;

– применение межсегментной режекции последовательностей с данными потенциального местонахождения ожидаемого паттерна.

Применяемая информационная модель движения

Формирование кинематических траекторий движения осуществляется путем обработки мгновенных значений инерциальных датчиков и датчиков абсолютных энкодеров, установленных на внешней конструкции исследовательской платформы ЭКЗ [14]. Для идентификации движений используются фронтальная (YOZ) и сагиттальная (YOX) плоскости (рис. 1) [9].

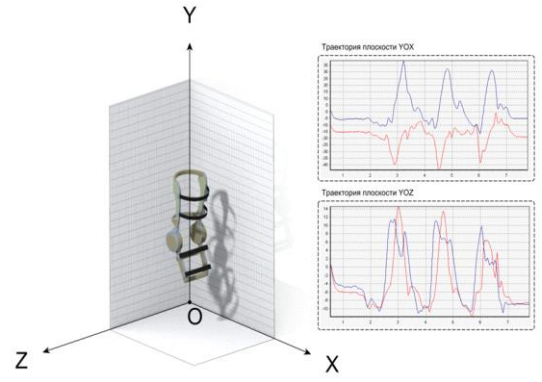


Рис. 1. Позиционирование конечности относительно рассматриваемых плоскостей для траекторного описания движения

Fig. 1. Positioning a limb relating to considered planes for the trajectory description of motion

Значения, полученные измерительной системой, представляют собой временные ряды, сгруппированные по признаку принадлежности к рассматриваемой плоскости и к сегменту конечности, являются одним из входных наборов для алгоритма выделения ожидаемого паттерна и далее обозначаются как исследуемый сигнал. Сигнал представлен в виде двух наборов – B_{in} и G_{in}:

$$B_{in} = \begin{cases} b_{YOX1} \ldots b_{YOXN}, \text{ где } b_{YOX} \in (-20°; 40°), \\ b_{YOZ1} \ldots b_{YOZN}, \text{ где } b_{YOZ} \in (-8°; 8°); \end{cases}$$

$$G_{in} = \begin{cases} g_{YOX1} \ldots g_{YOXN}, \text{ где } g_{YOX} \in (-40°; 40°), \\ g_{YOZ1} \ldots g_{YOZN}, \text{ где } g_{YOZ} \in (-12°; 12°). \end{cases}$$

Из исследуемого сигнала выделяется ожидаемый сигнал, который представлен в виде набора дискретных последовательностей, являющихся участком определенного движения (паттерн движения). Аналогично исследуемому сигналу ожидаемые паттерны сгруппированы по признаку принадлежности конечности к плоскости, в которой описывается траектория, и типу движения. Формально паттерн дви-

жения представляется как один из наборов траекторий в $P_m = p_{motion1} \ldots p_{motionN}$. В общем случае $p_{motion\_i} = \begin{cases} p_b, \\ p_g, \end{cases}$ где

$$p_b = \begin{cases} p_{b_{YOX1}} \ldots p_{b_{YOXN}}, \; p_{b_{YOX}} \in (incl), \\ p_{b_{YOZ1}} \ldots p_{b_{YOZN}}, \; p_{b_{YOZ}} \in (incl), \end{cases}$$

$$p_g = \begin{cases} p_{g_{YOX1}} \ldots p_{g_{YOXN}}, \; p_{g_{YOX}} \in (incl), \\ p_{g_{YOZ1}} \ldots p_{g_{YOZN}}, \; p_{g_{YOZ}} \in (incl), \end{cases}$$

(*incl* – интервал действительных чисел на отрезке от –40 до 40, который справедлив только для текущего (рассматриваемого) набора паттернов циклического движения).

Модель выделения ожидаемого паттерна из регистрируемых кинематических траекторий на базе представленного метода

Архитектура блока выделения сигнала разделена на следующие основные сегменты: область буферизации входных данных, модуль первичной обработки, модуль фильтрации, модуль буферизации кластеров выходных данных (рис. 2).

Исходя из того, что общая формулировка задачи сводится к оценке корреляции известного сигнала с неизвестным, принято решение воспользоваться понятием согласованной фильтрации из области обработки сигналов. В этом случае решение задачи эквивалентно свертке неизвестного сигнала с сопряженной версией шаблона, обращенной во времени. Согласованный фильтр является оптимальным линейным фильтром для максимизации отношения сигнал/шум (SNR) в присутствии аддитивного стохастического шума.

Общий принцип работы блока выделения базируется на применении к функциям f и g операции свертки, которая соответствует взаимнокорреляционной функции $f(x)$ и $g(–x)$. В качестве функции $f(x)$ выступают регистрируемые кинематические траектории движения B_{in} и G_{in}. Размерность $f(x)$ зависит от параметра N (ширина окна). Этот параметр тесно связан с максимальным размером траектории паттерна ожидаемого движения и вычисляется в соответствии с отношением $N = \max(length(p_i))$, где $p_i = x_p[j, k]$, x_p – участок траектории ожидаемого сигнала, принадлежащий к сегменту конечности и рассматриваемой плоскости; j, k – индексы, формирующие интервал на рассматриваемой траектории.

Функция $g(–x)$ представляет собой отраженную копию ожидаемого паттерна движения p_i. Таким образом, операция свертки над траекториями, представленными в дискретной форме, имеет вид

$$s(n) = a(n)b(n) =$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} a(m)b(n-m) = \sum_{m=0}^{\infty} b(m)a(n-m),$$

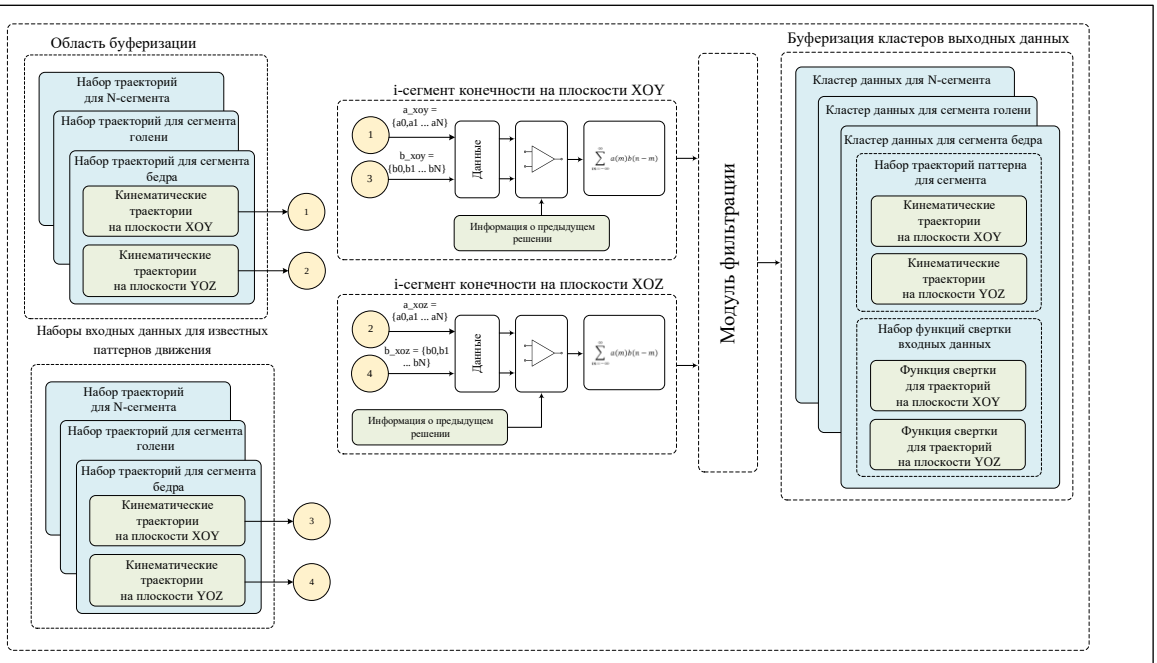


Рис. 2. Структурная схема блока выделения сигнала

Fig. 2. A structural diagram of the signal extraction block

где $a(n)$ – исследуемая кинематическая траектория; $b(n)$ – паттерн ожидаемого движения.

Полученная функция S размерностью $n + m - 1$ (рис. 3) помещается в кластер данных, сгруппированных по критерию принадлежности к сегменту конечности и рассматриваемой плоскости.

После выполнения описанных действий для каждого из паттернов ожидаемого движения из функций S формируются наборы G_{conv} и B_{conv}. Наборы сверточных функций передаются в модуль фильтрации (рис. 1). Принцип его работы основан на пороговом занулении отсчетов входных значений и их режекции. Расчет порогового значения фильтрации определяется выражением $threshold_i = kp_{b\_i}$, где $k \in [0, 1]$.

В первом приближении коэффициент k был выбран при помощи введенной оценки $threshold_{eff}$ оптимальности подавления ложных отметок на выборке с известным количеством и значением отметок расположения ожидаемого сигнала. Параметр оптимальности представлен выражением

$$threshold_{eff} = \begin{cases} \frac{K_t}{K_r}; K_t \geq K_r, \\ 0; K_t < K_r, \end{cases} \quad (1)$$

где K_t – количество теоретических отметок расположения сигнала; K_r – количество полученных отметок после прохождения пороговой фильтрации.

На рисунке 4 показано, как меняется количество отметок ожидаемого сигнала при изменении коэффициента порогового фильтра k.

В результате моделирования для паттернов движения (рис. 4) были рассчитаны коэффициенты k порогового фильтра наборов p_b и p_g. При выборе k допускается отклонение результирующего значения с учетом выполнения условия $k \in [thold_{eff\_max} - (0.1*thold_{eff\_max}); thold_{eff\_max}]$, (2) где $thold_{eff\_max}$ – значение параметра оптимальности подавления, максимально близкое к 1 (см. (1)).

Как видно из рисунка 4, при уменьшении коэффициента порогового фильтра увеличива-

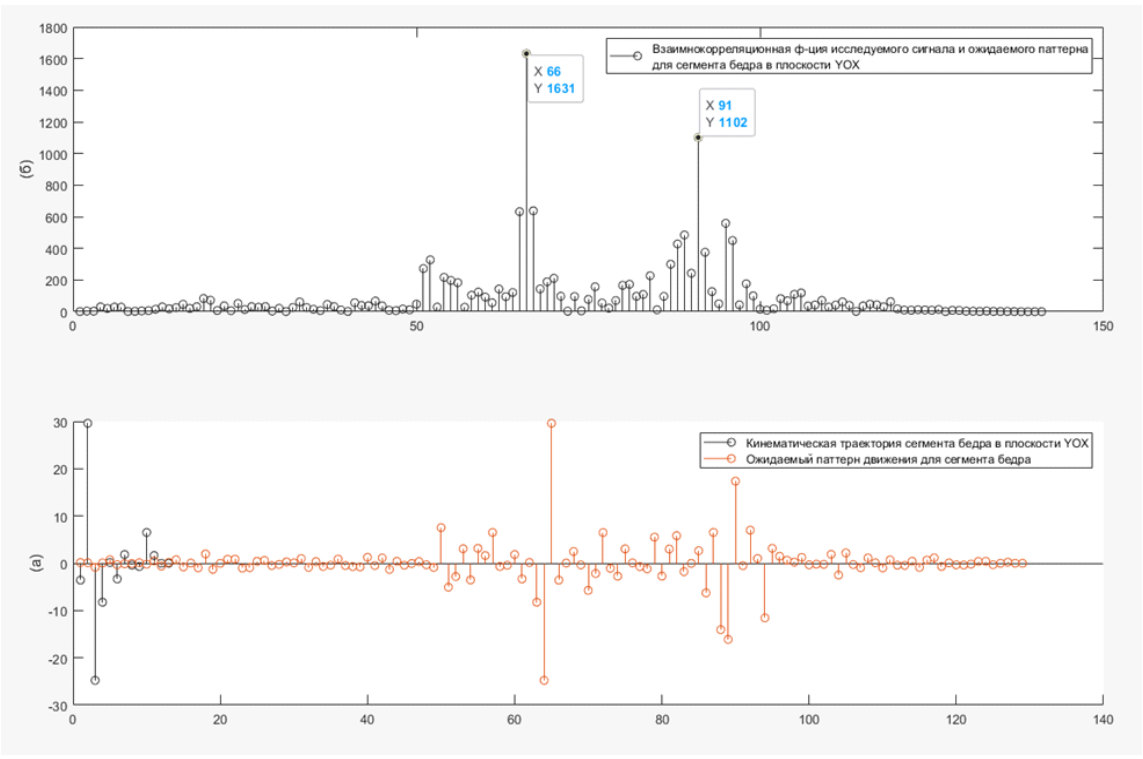


Рис. 3. Результат работы модуля первичной обработки для кинематических траекторий сегмента бедра в плоскости YOX: а) взаимнокорреляционная функция исследуемого сигнала и ожидаемого паттерна, б) исследуемый сигнал и ожидаемый паттерн

Fig. 3. The performance of the preprocessing module for kinematic trajectories of the thigh segment in the YOX plane: a) a cross-correlation function of the studied signal and the expected pattern, б) the studied signal and the expected pattern

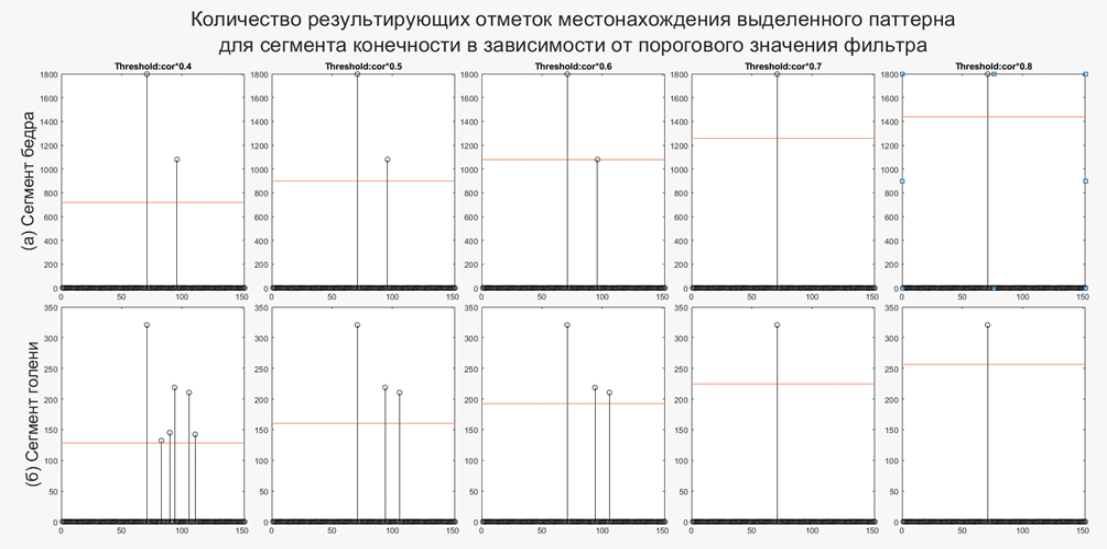


Рис. 4. Зависимость количества выделенных отметок ожидаемого паттерна от коэффициента порогового фильтра

Fig. 4. The dependence of the number of the expected pattern selected marks on the threshold filter coefficient

ется количество отметок потенциального расположения ожидаемого паттерна. Это приводит к увеличению ложных отметок, что снижает величину параметра оптимальности подавления $thold_{eff\_max}$. Уменьшение чувствительности пороговой фильтрации путем увеличения коэффициента k до значений, приближающихся к 1, также приводит к снижению значения параметра $thold_{eff\_max}$. Это обусловлено тем, что фильтр вместе с шумовой составляющей подавляет полезный сигнал, в результате снижаются эффективность работы блока выделения и вероятность обнаружения ожидаемого паттерна. Исходя из выражений (1) и (2) и рисунка 4 выбраны значения коэффициента для $G_{conv}\,i = 0.6$, для $B_{conv}\,i = 0.55$.

При прохождении порогового фильтра в результирующей выборке могут присутствовать ложные отметки о потенциальном нахождении ожидаемого сигнала из-за того, что паттерны и исследуемый сигнал не оптимальны для операции свертки. Таким образом, наличие ярко выраженных по амплитуде выбросов рядом с отметкой максимума взаимнокорреляционной функции вполне ожидаемо. Помимо сигналоподобных всплесков, в выборке могут быть ложные отметки, полученные в результате наличия полезного сигнала, описывающего другой вид движения или случайное недетерминированное перемещение сегмента конечности.

В силу этого применяется метод межсегментной оценки для режекции выборок пороговой фильтрации. Принцип его работы основан на представлении движения как детерминированного набора локомоций сегментов конечности. Набор локомоций представляет собой признак движения и образует тесную связь между разными наборами данных, принадлежащих к исследуемым сегментам конечности по принципу их взаимного расположения во времени. Таким образом, рассматривая циклическое движение как шаг, можно дать оценку бедренного и голенного сегментов конечности в сагиттальной и фронтальной плоскостях относительно сформированного признака. Исходя из этого следует, что отметка расположения ожидаемого паттерна в траектории сегмента бедра должна находиться в окрестности теоретической точки относительно выделенной отметки паттерна движения сегмента голени (рис. 5). Данное утверждение справедливо и для отметки в сегменте голени по отношению к сегменту бедра.

Как видно из рисунка 5, в блоке режекции подавляется отметка теоретического расположения ожидаемого паттерна в траектории сегмента голени.

Описанный в работе алгоритм блока выделения сигнала реализован в виде программного прототипа на языке C++ в составе имитационного комплекса исследовательской платформы ЭКЗ.

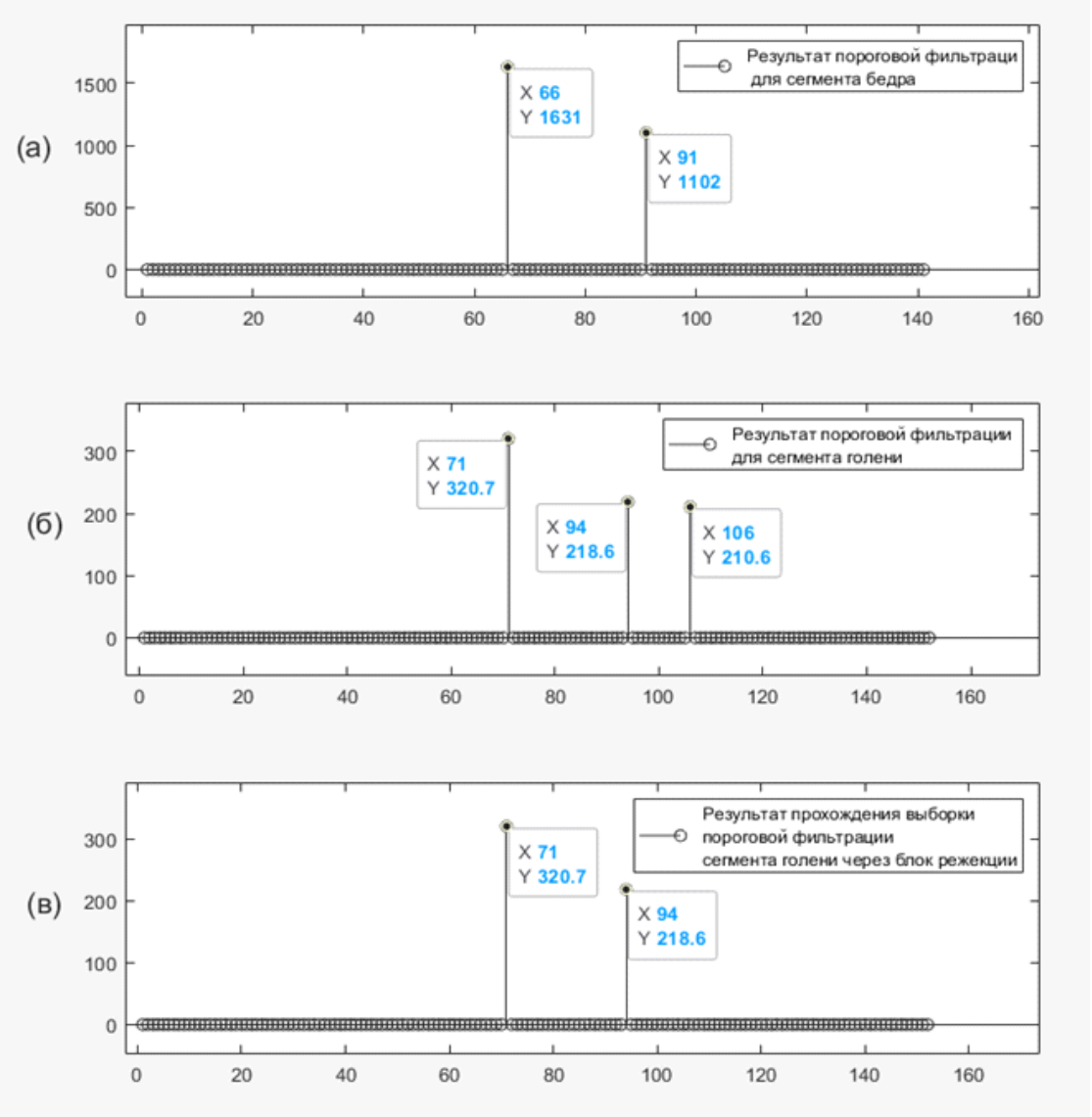


Рис. 5. Пример работы блока режекции с набором данных сегмента голени: а) результат пороговой фильтрации сегмента бедра; б) результат пороговой обработки сегмента голени; в) результат прохождения данных сегмента голени после пороговой обработки через блок режекции

Fig. 5. An example of the notch block operation on the leg segment data set: a) the result of thigh segment threshold filtering; b) the result of leg segment threshold processing; c) the result of passing the leg segment data after thresholding through the rejection

Апробация представленного метода выделения проводилась на кинематических траекториях, зарегистрированных средствами исследовательской платформы ЭКЗ. В качестве исследуемого сигнала представлено циклическое движение – шаг. По результатам прохождения сигнала через блок выделения с описанными выше параметрами ожидается получение двух отметок потенциального расположения ожидаемого паттерна шага.

По итогам первичной апробации метод межсегментной оценки показал свою применимость для решения поставленной задачи: после режекции данных в результирующих последовательностях бедра и голени для сагиттальной плоскости присутствуют две отметки ожидаемого паттерна (рис. 6). Из исследуемых кинематических траекторий с двумя теоретическими отметками местонахождения ожидаемого движения были найдены все паттерны.

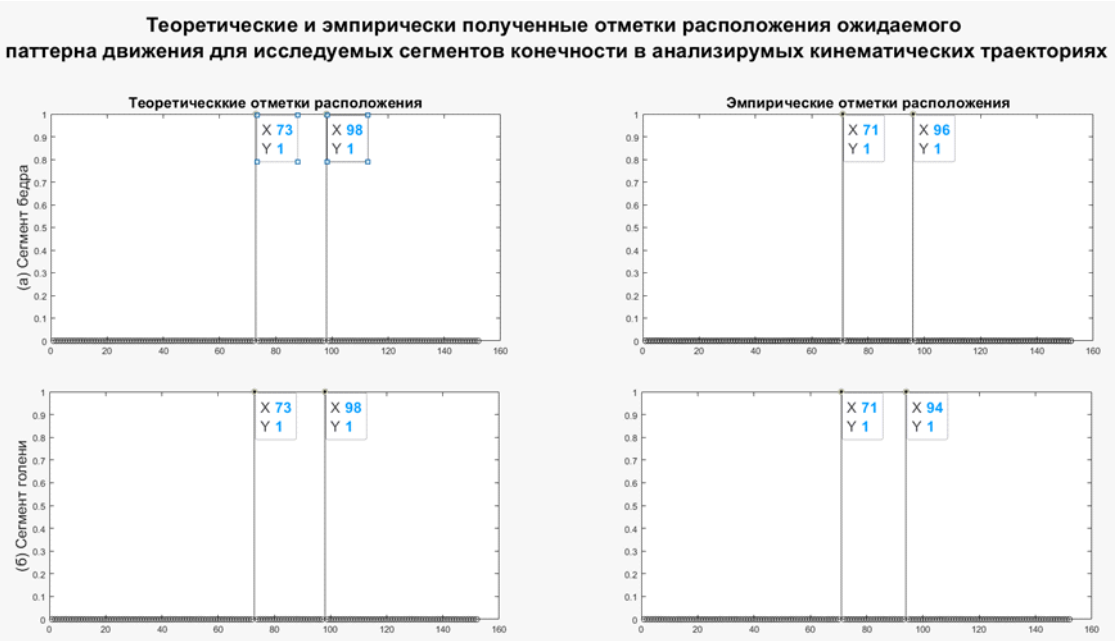


Рис. 6. Сравнение теоретически ожидаемых и эмпирически полученных отметок выделения паттерна движения из кинематических траекторий движения для исследуемых сегментов конечности в сагиттальной плоскости

Fig. 6. The comparison of theoretically expected and empirically obtained selection marks of movement pattern from kinematic movement trajectories for the studied limb segments in the sagittal plane

Данные отметки несколько смещены относительно теоретического значения ожидаемого сигнала (рис. 6). Это смещение имеет плавающую величину и зависит от близости подобия ожидаемого паттерна и движения, описываемого регистрируемыми траекториями. Практически при наличии отметки выделения в траекториях сегментов величина смещения не превышает значения 0.18 от длины ожидаемого сигнала.

Заключение

В результате проработки метода межсегментной оценки была построена модель выделения ожидаемого паттерна движения из регистрируемых кинематических траекторий, в рамках которой представлены способ описания движения при помощи кинематических траекторий, применяемый математический аппарат, краткое алгоритмическое описание предлагаемого метода.

Модель реализована в виде программного прототипа с проведением его первичной апробации. Полученные результаты указывают на возможность применения метода межсегментной оценки для анализа кинематических траекторий средствами ЭКЗ в режиме реального времени, что допускает построение модели распознавания циклических движений оператора. Данная модель служит основой для построения и исследования возможных алгоритмов, решающих одну из задач предикции положения сегментов конечности оператора при взаимодействии с экзоскелетной системой.

Литература

1. Бобе А.С., Конышев Д.В., Воротников С.А. Использование паттернов ЭМГ в задаче распознавания цикла ходьбы человека // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2016. № 3. С. 21–28. DOI: 10.21672/2074-1707-2016-35-3-021-028 (in Engl.).

2. Давыдова Н.С., Васюк В.Е., Парамонова Н.А. Алгоритм анализа кинематических характеристик бега // Докл. БГУИР. 2020. Т. 18. № 8. С. 37–45. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-8-37-45.

3. Воронцова О.И., Лозовская М.В. Структура шагового цикла по данным анализа кинетических и кинематических параметров походки человека // Вестн. новых медицинских технологий. 2017. № 3. С. 9–15. DOI: 10.12737/article_5975a4870397c0.15031094. URL: http://vnmt.ru/Bulletin/E2017-3/1-1.pdf (дата обращения: 10.05.2022).

4. Han Y., Liu C., Ya L., Ren L. Design of decision tree structure with improved BPNN nodes for high-accuracy locomotion mode recognition using a single IMU. Sensors, 2021, vol. 21, art. 526. DOI: 10.3390/s21020526.

5. Wang M., Li Z., Lei Q., Wang Me., Zhang R. Research on gait recognition and prediction of exoskeleton robot based on improved DTW algorithm. J. of Physics Conf. Ser., 2020, vol. 1518, no. 1, pp. 012–019. DOI: 10.1088/1742-6596/1518/1/012019.

6. Zhu L., Wang Z., Ning Z., Zhang Y., Liu Y., Cao W. et al. A novel motion intention recognition approach for soft exoskeleton via IMU. Electronics, 2020, vol. 9, art. 2176. DOI: 10.3390/electronics9122176.

7. Feng Y., Chen W., Wang Q. A strain gauge based locomotion mode recognition method using convolutional neural network. Advanced Robotics, 2019, vol. 33, no. 5, pp. 1–10. DOI: 10.1080/01691864.2018.1563500.

8. Иванова Г.Е., Скворцов Д.В. Объективный клинический анализ походки. Обзор // Вестн. восстановительной медицины. 2015. № 4. С. 59–66.

9. Скворцов Д.В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилометрия. М.: Т.М. Андреева, 2007. 640 с.

10. Gordleeva S.Y., Lukoyanov M.V., Mineev S.A. et al. Exoskeleton control system based on motor-imaginary brain-computer interface. Modern Technologies in Medicine, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 31–38. DOI: 10.17691/stm2017.9.3.04.

11. Куркин С.А., Пицик Е.Н., Храмов А.Е. Использование искусственных нейронных сетей для классификации электрической активности головного мозга в процессе воображения движений у нетренированных испытуемых // Информационно-управляющие системы. 2019. № 6. С. 77–84. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-6-77-84.

12. Лобов С.А., Миронов В.И., Кастальский И.А., Казанцев В.Б. Совместное использование командного и пропорционального управления внешними робототехническими устройствами на основе электромиографических сигналов // Современные технологии в медицине. 2015. Т. 7. № 4. С. 30–38. DOI: 10.17691/stm2015.7.4.04.

13. Будко Н.А., Медведев М.Ю., Будко А.Ю. Разработка и исследование метода векторного анализа ЭМГ предплечья для построения человеко-машинных интерфейсов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2021. № 2. С. 18–31. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-2-18-31.

14. Провоторов Н.В., Таратонов И.А. Алгоритмы управления экзоскелетной системой нижних конечностей человека // Системный анализ в медицине: матер. XII Междунар. научн. конф. 2018. С. 68–72.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.493-501

Received 27.05.22, Revised 08.06.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 493–501

The method of intersegment estimation of the motion patterns from kinematic trajectories registered by exoskeleton system tools

N.V. Provotorov [1], *Postgraduate Student, provotorovworkmail@gmail.com*
I.N. Taratonov [2], *Director General, Ilya.taratonov@1221.su*
Yu.N. Philippovich [1], *Ph.D. (Engineering), Professor, y_philippovich@mail.ru*

[1] *Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation*
[2] *"POLDEN'. 21-Y VEK" (1221), Moscow, 111024, Russian Federation*

Abstract. The paper considers the method of intersegment estimation of the operator's motion patterns from kinematic trajectories registered by the exoskeleton system tools (further EXO). Its purpose is due to the task of detecting and classifying the movements of the operator of the exoskeleton physical performance support system in real time for predictive control of the structure executive elements and for forecasting the further human-machine system state.

The paper defines kinematic trajectories as limb segment motion projections on the Cartesian coordinate system planes. Such projections are grouped by affiliation to the described plane and to the limb segment and represent the informational model of the investigated motion. This statement is also true for the expected motion model expressed in the same way as trajectory patterns.

In the framework of the problem of defining motion patterns, the authors propose the method of intersegment estimation of kinematic trajectories. The method is based on achievements in biomechanics of human

motions, especially in the part of kinematic-cyclic research. The main idea is the search of motion signs represented by one pattern or an ordered sequence in the trajectories described by the limb segments in frontal or sagittal planes. Digital signal processing area is used as basic algorithms for defining motion patterns. The developed method is presented in the form of a model that is the basis of a software prototype. The paper also presents the results of the prototype approbation on empirical data received by the exoskeleton system research platform.

Keywords: exoskeleton system, analysis of kinematic trajectories, pattern of cyclic motion, intersegment estimation, predictive management.

References

1. Bobe A.S., Konyshev D.V., Vorotnikov S.A. Using EMG patterns for human gait cycle recognition. *Caspian J.: Control and High Technologies*, 2016, no. 3, pp. 21–28. DOI: 10.21672/2074-1707-2016-35-3-021-028.

2. Davydova N.S., Vasiuk V.E., Paramonova N.A., Mezhennaya M.M., Guseinov D.I. Algorithm for the analysis of kinematic characteristics of running. *Doklady BGUIR*, 2020, vol. 18, no. 8, pp. 37–45. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-8-37-45 (in Russ.).

3. Vorontsova O.I., Lozovskaya M.V. Structure of gait cycle based on kinetic and kinematical parameters. *J. of New Medical Technologies*, 2017, no. 3, pp. 9–15. DOI 10.12737/article_5975a4870397c0.15031094. Available at: http://vnmt.ru/Bulletin/E2017-3/1-1.pdf (accessed May 10, 2022).

4. Han Y., Liu C., Ya L., Ren L. Design of decision tree structure with improved BPNN nodes for high-accuracy locomotion mode recognition using a single IMU. *Sensors*, 2021, vol. 21, art. 526. DOI: 10.3390/s21020526.

5. Wang M., Li Z., Lei Q., Wang Me., Zhang R. Research on gait recognition and prediction of exoskeleton robot based on improved DTW algorithm. *J. of Physics Conf. Ser*., 2020, vol. 1518, no. 1, pp. 012–019. DOI: 10.1088/1742-6596/1518/1/012019.

6. Zhu L., Wang Z., Ning Z., Zhang Y., Liu Y., Cao W. et al. A novel motion intention recognition approach for soft exoskeleton via IMU. *Electronics*, 2020, vol. 9, art. 2176. DOI: 10.3390/electronics9122176.

7. Feng Y., Chen W., Wang Q. A strain gauge based locomotion mode recognition method using convolutional neural network. *Advanced Robotics*, 2019, vol. 33, no. 5, pp. 1–10. DOI: 10.1080/01691864.2018.1563500.

8. Ivanova G.E., Skvortsov D.V. An objectiv clinical gait analysis a survay. *Overview. Bull. of Rehabilitation Medicine*, 2015, no. 4, pp. 59–66 (in Russ.).

9. Skvortsov D.V. *Diagnosis of Motor Pathology by Instrumental Methods: Gait Analysis, Stabilometry*. Moscow, 2007, 640 p. (in Russ.).

10. Gordleeva S.Y., Lukoyanov M.V., Mineev S.A. et al. Exoskeleton control system based on motor-imaginary brain-computer interface. *Modern Technologies in Medicine*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 31–38. DOI: 10.17691/stm2017.9.3.04.

11. Kurkin S.A., Pitsik E.N., Khramov A.E. Classifying electrical activity of the brain during imaginary movements of untrained subjects using artificial neural networks. *Information and Control Systems*, 2019, no. 6, pp. 77–84. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-6-77-84 (in Russ.).

12. Lobov S.A., Mironov V.I., Kastalskiy I.A., Kazantsev V.B. Combined use of command-proportional control of external robotic devices based on electromyography signals. *Modern Technologies in Medicine*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 30–38. DOI: 10.17691/stm2015.7.4.04 (in Russ.).

13. Budko N.A, Medvedev M.Y., Budko A.Y. Development and research of the method of vector analysis of EMG of the forearm for construction of human-machine interfaces. *Izv. SFedU. Engineering Sciences*, 2021, no. 2, pp. 18–31. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-2-18-31 (in Russ.).

14. Provotorov N.V., Taratonov I.A. Algorithms of control of exoskeleton system of the lower extremities of a person. *Proc. XII Int. Conf. System Analysis in Medicine*, 2018, pp. 68–72 (in Russ.).

Для цитирования

Провоторов Н.В., Таратонов И.Н., Филиппович Ю.Н. Метод межсегментной оценки выделения паттернов движения из кинематических траекторий, регистрируемых средствами экзоскелетной системы // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 493–501. DOI: 10.15827/0236-235X.139.493-501.

For citation

Provotorov N.V., Taratonov I.N., Philippovich Yu.N. The method of intersegment estimation of the motion patterns from kinematic trajectories registered by exoskeleton system tools. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 493–501 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.493-501.

УДК 66.046.1
DOI: 10.15827/0236-235X.139.502-508
Дата подачи статьи: 13.05.22, после доработки: 22.06.22
2022. Т. 35. № 3. С. 502–508

Разработка информационной системы расчета, накопления информации и паспортизации теплофизических свойств фосфоритов

В.А. Орехов [1], *ассистент, fundukoff@mail.ru*
В.И. Бобков [1], *д.т.н., зав. кафедрой, vovabobkoff@mail.ru*
С.В. Панченко [1], *д.т.н., профессор, tan_pan@inbox.ru*

[1] *Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, 214013, Россия*

В работе предлагается создавать паспорта свойств фосфоритов, позволяющие сохранять в электронном виде экспериментальные температурные зависимости коэффициента теплопроводности материала при первом его нагреве и в отожженном состоянии, удельной истинной теплоемкости при первом и втором нагревах, эффективной теплоемкости при первом нагреве, относительного линейного расширения, электрической проводимости и плотности фосфатного материала при нагреве.

Для реализации такого паспорта свойств разработана информационная система, позволяющая осуществлять ввод и хранение данных о химическом составе и теплофизических и технологических свойствах образцов в цифровом виде, их поиск и обработку. Для доступа к данным и их обработки система использует технологию клиент–сервер. Расчет теплофизических свойств фосфоритов по структурным моделям учитывает иерархические свойства компонентов, составляющих фосфорит, их объемные и массовые доли. Данными для определения долей компонент служит минералогический состав материала.

Информационная система содержит программу расчета коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости. Она отличается учетом массовых и объемных долей основных породообразующих минералов. Система использует интерполяцию табличных температурных значений коэффициентов теплопроводности и удельных теплоемкостей фосфорита, карбоната и кремнезема для определения теплофизических свойств компонент при любой температуре. Коэффициент теплопроводности материала рассчитывается на базе комбинированной модели теплопроводности, учитывающей эндотермическую реакцию диссоциации карбонатов, а удельная теплоемкость – по аддитивной модели.

Разработан алгоритм для программы расчета теплофизических свойств по химическому составу фосфоритов.

Ключевые слова: *информационная система, алгоритм, теплопроводность, теплоемкость, структура, химический состав.*

Для проведения опытно-конструкторских и технологических расчетов аппаратов при термической переработке фосфорного сырья необходим полный набор теплофизических и технологических свойств фосфоритов, фосфатно-кремнистых разностей и сопутствующих пород. Существующие модели для расчета теплофизических свойств не могут в полной мере применяться для широкого диапазона температур химико-энерготехнологических процессов обжига фосфоросодержащего сырья, их использование возможно лишь с учетом значений коэффициентов теплопроводности и удельных теплоемкостей компонентов, к которым относятся фосфатизированные кремни, кремнистые, высококачественные и мономинеральные фосфориты [1, 2].

В частности, в работе [3] представлены математическая и компьютерная модели сложного химико-технологического процесса обжига как взаимозависимой совокупности трех процессов – сушки, прокалки и спекания движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в конвейерной обжиговой машине. Процесс отличается учетом интенсивности внутреннего влагопереноса в окатыше и переувлажнения отдельных горизонтов в нагреваемом слое окатышей, что позволяет определять технологические параметры режима обжига. Проведена проверка адекватности разработанной математической модели по результатам сравнительного анализа рассчитанных значений влагосодержания и температуры окатышей, характеристик газа-теплоносителя, а также значений интенсивности влагопереноса в окатышах при сушке в движущемся плотном слое с результатами промышленных испытаний. Проведены многочисленные вы-

числительные эксперименты по определению относительной степени высушивания, влагосодержания, интенсивности сушки окатышей и влагосодержания газа-теплоносителя при различных характеристиках сырых окатышей и параметрах технологического режима работы обжиговой машины.

Статья [4] посвящена содержательной и математической постановкам задачи оптимизации химико-энерготехнологического процесса обжига движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей в сложной химико-энерготехнологической системе конвейерной обжиговой машины как задачи дискретного динамического программирования, отличающейся учетом пространственно-временной многостадийности процессов обжига движущейся многослойной массы окатышей, интенсивности процесса внутреннего влагопереноса в окатыше, процессов переувлажнения отдельных слоев окатышей и переменных управляющего потока газа-теплоносителя, что позволяет повышать энергоэффективность посредством интенсификации тепло-массообменных процессов многослойной сушки, прокалки и спекания. Критерием эффективности служит минимум себестоимости электрической и тепловой энергии, затрачиваемой на обжиг. Полученные результаты использовались для расчета энергоэффективного обжига окатышей в обжиговой конвейерной машине. Установлено, что в оптимальном режиме многослойного обжига окатышей отсутствует зона переувлажнения, интенсифицируются процессы тепло-влагопереноса, снижается расход энергии и повышается качество готового продукта. Исследована проблема переувлажнения окатышей в отдельных горизонтах слоя в зоне сушки обжиговой машины. Решена актуальная научно-практическая задача энергоресурсосбережения при обжиге окомкованного рудного сырья в плотном слое. Представлены математическая модель тепломассообмена в слое окатышей и проверка ее адекватности. Решена задача оптимизации энергозатрат на основе интенсификации процессов обжига.

Таким образом, разработка информационной системы расчета, накопления информации и паспортизации теплофизических свойств фосфоритов при высокотемпературном нагреве весьма актуальна и требует дальнейшего развития как математических моделей, так и информационных структур вследствие изменения структуры реагирующего материала и иерархии компонент в результате реакции диссоциации доломита при нагреве [5, 6].

Методика и программа расчета теплофизических свойств по химическому составу фосфоритов

Для расчета теплофизических свойств фосфоритов по структурным моделям, кроме свойств составляющих, необходимо знать объемные и массовые доли компонент, входящих в материал [7, 8]. Для их определения необходимо исходить из минералогического состава или в худшем случае химического анализа материала [9, 10].

Обычно химический состав фосфоритов определяется по процентному содержанию простейших окислов, среди которых P_2O_5, MgO, CO_2, SiO_2, Al_2O_3, K_2O, Ma_2O, Fe_2O_3, FeO.

Учитывая, что основная масса фосфоритов представлена фосфатным веществом – фторкарбонатапатитом, карбонатным веществом – доломитом и кальцитом, кремнистым веществом – кварцем и халцедоном и различными примесями, используя реакции неполного разложения

– фторкарбонатапатита ($2Ca_{10}P_5CO_{23}F_3R_x \rightarrow$ $\rightarrow 20CaO+5P_2O_5+2CO_2+6F+R_xO_2$);

– доломита ($CaMg(CO_3)_2 \rightarrow$ $\rightarrow CaO+MgO+2CO_2$);

– кальцита ($CaCO_3 \rightarrow CaO+CO_2$)

и неизменность нерастворимого остатка SiO_2, можно рассчитать массовые доли основных минералов [11, 12].

Массовая доля определится для фосфорита $g_ф = 2.79c_{P_2O_5}$, доломита – $g_д = 4.6c_{MgO}$, кальцита – $g_к = 1.79\,(c_{CaO} - 1.58c_{P_2O_5} - c_{MgO})$, кремнезема – $g_{кр} = c\,SiO_2$, примесей – $g_{пр} = 1 - g_ф - g_д - g_к - g_{кр}$, где c_i – относительное содержание окислов, полученное из химического анализа фосфорита. С учетом определенных массовых долей и кажущихся плотностей основных компонент можно определить объемные доли составляющих: $m_i = g_i\rho_i$, где m_i – объемная доля компонента; g_i – массовая доля компонента; ρ_i – кажущаяся плотность компонента.

Для расчета коэффициента теплопроводности λ и удельной теплоемкости ρC_p была составлена программа, в которой рассчитываются массовые и объемные доли основных породообразующих минералов. Путем интерполяции табличных температурных зависимостей коэффициентов теплопроводности и удельных теплоемкостей фосфорита, карбоната и кремнезема определяются теплофизические свойства компонент при любой температуре [13].

Для расчета коэффициента теплопроводности материала с учетом реакции диссоциации карбонатов использовалась комбинированная модель теплопроводности, а для расчета удельной теплоемкости – аддитивная модель [14].

Разработан алгоритм программы расчета теплофизических свойств по химическому составу фосфоритов, включающий ввод химического состава, расчет минерального состава, расчет массовых и объемных долей, цикл по i для расчета теплоемкостей при заданной температуре T, обращение к подпрограмме ИНТЕРПОЛЯЦИЯ, расчет теплоемкости фосфорита, расчет теплопроводности составляющих при заданной температуре T, выбор модели по анализу структуры, подбор типа цемента, расчет теплопроводности материала (рис. 1).

Предлагаемая методика, использующая комбинированную модель теплопроводности, учитывающая реакции диссоциации карбонатов, и разработанный алгоритм встраиваются в информационную систему.

БД информационной системы

Хранение данных информационной системы на магнитных носителях и обеспечение доступа к ним осуществляются с использованием SQL-сервера БД Firebird. С его помощью реализована реляционная БД системы, хранящая всю необходимую информацию и процедуры обработки данных.

Применение этого подхода обеспечивает:

– возможность доступа к данным неограниченного числа пользователей;

– высокую производительность при поиске и обработке данных;

– отсутствие необходимости в сетевых каналах с высокой пропускной способностью;

– высокую надежность сохранности данных;

– возможность использования различных программно-аппаратных платформ для хранения данных;

– низкую стоимость системы по причине использования бесплатного сервера Firebird.

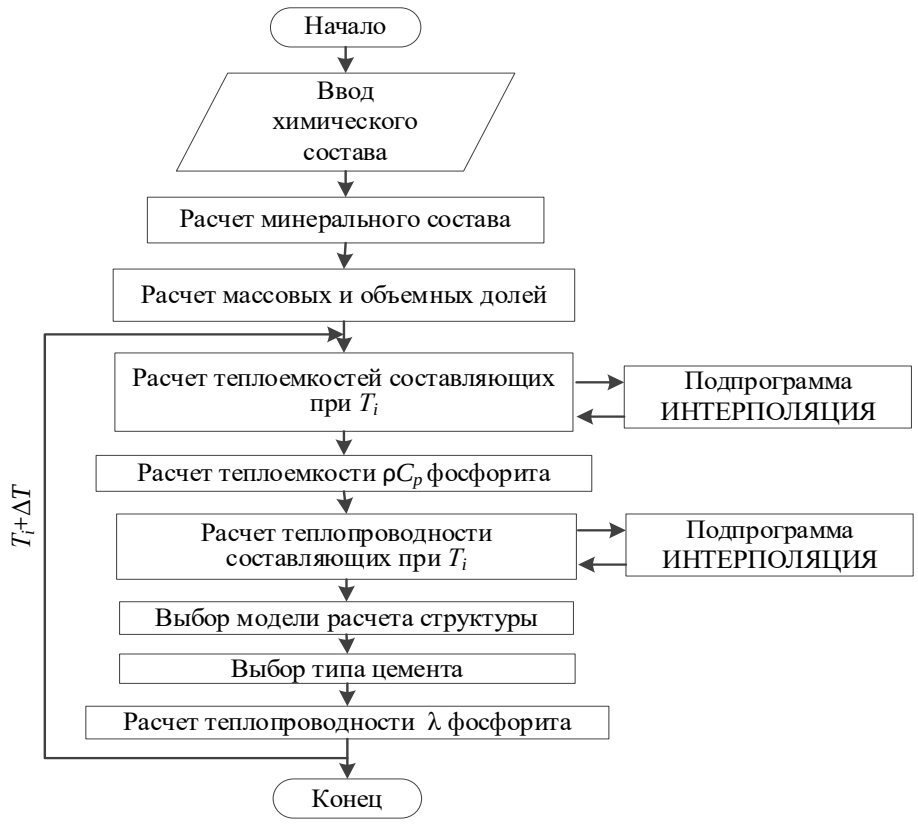


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета теплофизических свойств по структурной модели

Fig. 1. A block diagram of the algorithm for calculating thermophysical properties according to a structural model

В БД системы хранится информация о химическом составе исследуемых образцов и их теплофизических и технологических свойствах:

– коэффициент теплопроводности материала при первом его нагреве и в отожженном состоянии;

– удельная истинная теплоемкость при первом и втором нагревах, эффективная теплоемкость при первом нагреве;

– относительное линейное расширение;

– электрическая проводимость в логарифмических координатах и плотность материала при нагреве.

Предусмотрена возможность группировки образцов по типам материалов.

Поиск и обработка данных осуществляются с помощью хранимых процедур, выполняемых на сервере БД.

Автоматизированное рабочее место

Для доступа к БД системы разработано автоматизированное рабочее место под управлением операционных систем Microsoft Windows.

Для взаимодействия с пользователем в нем реализован стандартный интерфейс управления с использованием системы меню и панелей кнопок быстрого доступа. Для выполнения операций над данными и обработки информации используются формы.

В информационной системе реализован многодокументальный интерфейс, позволяющий оперативно переключаться между различными режимами работы с данными с использованием меню «Окно» и панели кнопок управления окнами. Для реализации этих режимов используются формы.

Для ввода и редактирования информации об исследованных образцах используется форма, показанная на рисунке 2.

В левой части формы отображается древовидный список материалов, позволяющий группировать образцы по виду материала и ускоряющий поиск необходимых образцов, в правой – список образцов выбранного материала, обеспечивающий возможность их добавления, редактирования и удаления.

Выполнение операций добавления, редактирования и удаления информации об образцах и материалах реализовано с помощью команд меню «Образцы» и панели кнопок быстрого доступа.

Для ввода и редактирования информации об образцах используются соответствующие формы.

Форма содержит две вкладки: «Данные образца» и «Свойства». На вкладке «Данные образца» вводится и редактируется информация о химическом составе и исходной плотности. На вкладке «Свойства» отображается зависимость теплофизических и технологических свойств образца от температуры. Добавление, удаление и редактирование новых точек зависимости свойств образца от температуры осуществляются с помощью панели кнопок быстрого доступа и команд меню «Образец».

Рабочее место информационной системы предусматривает возможность поиска образцов и их теплофизических и технологических свойств. Для поиска рабочее место использует хранимые процедуры, выполняемые на сервере БД.

Сформирована отдельная форма для поиска образца по химическому составу. Для поиска вводятся концентрации учитываемых компо-

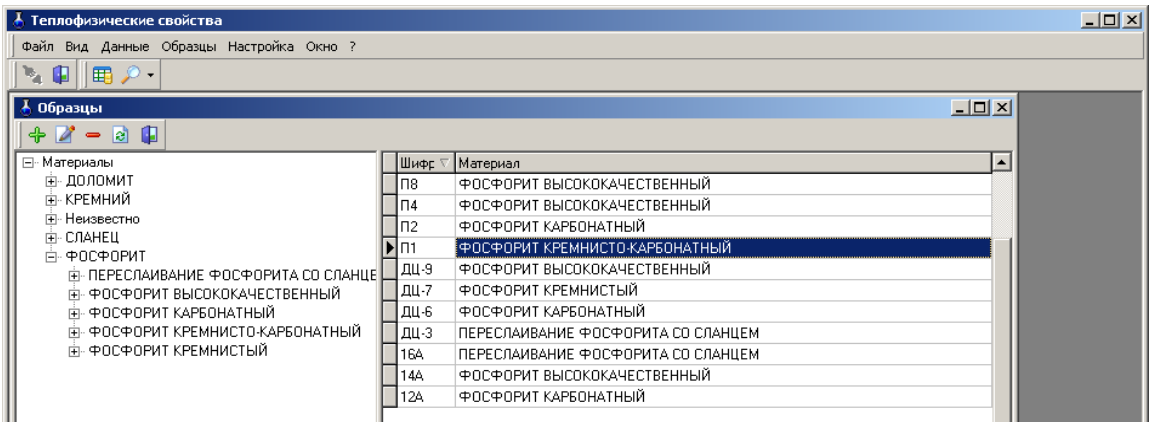


Рис. 2. Фрагмент формы для ввода и редактирования информации об исследованных образцах

Fig. 2. A form for entering and editing information on tested samples

нентов в процентах. Поиск выполняется при нажатии соответствующей кнопки на панели быстрого доступа или выбором команды «Поиск» в меню «Поиск образца». В случае успешного поиска его результат выводится в виде шифра образца, его материала и химического состава. Также имеется возможность перехода в режим просмотра информации об образце с использованием формы ввода и редактирования информации об образце.

Разработанная форма для поиска теплофизических и технологических свойств образцов показана на рисунке (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/13.jpg). Для поиска вводятся концентрации учитываемых компонентов (в процентах) и температура. Поиск выполняется нажатием соответствующей кнопки на панели быстрого доступа или выбором команды «Поиск» в меню «Поиск свойств». В случае успешного поиска его результат выводится в виде шифра образца, его материала, химического состава и списка свойств, соответствующих заданной температуре.

Заключение

С использованием разработанной информационной системы проведено комплексное исследование температурных зависимостей теплопроводности и теплоемкости всех основных типов литологических разностей фосфатных руд. Установлено, что теплопроводности сырьевых фосфоритовых материалов существенно различаются и определяются структурой и минералогическим составом пород.

Установлено, что теплофизические свойства претерпевают глубокие изменения в результате физико-химических превращений, возникающих в процессе нагрева. Диапазон изменения коэффициента теплопроводности составил 0,5–7 Вт/м·К, удельной теплоемкости – 2–4 10^6 кДж/м^3·К при температурах от 300 К до 1 300 К.

В рамках предлагаемой информационной системы разработаны БД и составлены паспорта теплофизических и технологических свойств ряда фосфоритов, необходимых для теплотехнических расчетов термически активируемых химико-энерготехнологических процессов и аппаратов обогащения фосфоритовой руды. Применение информационной системы для обобщения и анализа экспериментальных данных показывает, что можно выделить основные типы мономинерального сырья с определенным набором технологических свойств, которые могут быть приняты в качестве основных компонент в структурной модели технологических свойств. В качестве таковых были выбраны кремнезем, карбонаты, фосфатное вещество и прочие примеси, свойства которых определены на основе обработки данных и приведены в информационной системе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках научных проектов № 22-61-00096, 22-11-00335.

Литература

1. Леонтьев Л.И. Физико-химические особенности комплексной переработки железо-содержащих руд и техногенных отходов // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тез. докл. 2016. С. 92.

2. Бобков В.И., Борисов В.В., Дли М.И. Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 3. С. 73–83.

3. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Study of the thermal characteristics of phosphate raw materials in the annealing temperature range. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 307–312. DOI: 10.1134/S0040579517030022.

4. Курилин С.П., Соколов А.М., Прокимнов Н.Н. Компьютерная программа для эксплуатационной диагностики электромеханических систем на основе топологического подхода // Прикладная информатика. 2021. Т. 16. № 4. С. 62–73. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-62-73.

5. Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И. Автоматизированная система поддержки принятия решений по управлению энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологической системы обжига фосфоритовых окатышей // Теоретические основы химической технологии. 2019. Т. 53. № 6. С. 609–616. DOI: 10.1134/S0040357119060095.

6. Булыгина О.В., Емельянов А.А., Емельянова Н.З. Имитационное моделирование в экономике и управлении. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2021. 592 с.

7. Булыгина О.В., Емельянов А.А., Росс Г.В., Яшин Е.С. Инвестиции, инновации, импортозамещение: имитационное моделирование с элементами искусственного интеллекта в управлении проектными рисками // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. № 1. С. 63–102.

8. Мешалкин В.П., Панченко С.В., Бобков В.И., Дли М.И. Анализ теплофизических и химико-технологических свойств отходов горно-обогатительных комбинатов // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 1. С. 30–37. DOI: 10.31857/S0040357120010170.

9. Пучков А.Ю., Лобанева Е.И., Култыгин О.П. Алгоритм прогнозирования параметров системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1. С. 55–68.

10. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В. Определение комкуемости железорудной шихты с целью прогнозирования прочностных свойств окатышей // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 8. С. 53–57.

11. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Ч. 1. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 59. № 1. С. 11–22. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-11-22.

12. Luis P., Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towardsa sustainable chemical industry. J. of Chemical Technology and Biotechonology, 2014, vol. 89, no. 9, pp. 1288–1303. DOI: 10.1002/JCTB.4422.

13. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations. J. of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, vol. 119, no. 1, pp. 265–271. DOI: 10.1007/s10973-014-4132-5.

14. Борисов В.В., Курилин С.П., Луферов В.С. Нечеткие реляционные когнитивные темпоральные модели для анализа и прогнозирования состояния сложных технических систем // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1. С. 27–38. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-1-27-38.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.502-508

Received 13.05.22, Revised 22.06.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 502–508

Information system for calculation, information accumulation and certification of phosphorite thermophysical properties

V.A. Orekhov [1], *Assistant, fundukoff@mail.ru*
V.I. Bobkov [1], *Dr.Sc. (Engineering), Head of Department, vovabobkoff@mail.ru*
S.V. Panchenko [1], *Dr.Sc. (Engineering), Professor, tan_pan@inbox.ru*

[1] *Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, 214013, Russian Federation*

Abstract. The paper proposes creating a certificate of phosphorite properties, which allows preserving in electronic form experimental temperature dependencies of the material thermal conductivity coefficient at its first heating and in the annealed state, specific true heat capacity at the first and second heating, effective heat capacity at the first heating, relative linear expansion, electrical conductivity and density of phosphate material at heating.

There is a developed an information system that can implement such certificate of properties. It allows inputting and storing data on chemical composition and thermophysical and technological properties of samples in digital form, searching and processing them. This system uses client-server technology to access and process data. Calculation of thermophysical properties of phosphorites by structural models takes into account hierarchical properties of phosphorite components, their volume and mass fractions. The information for determining the component proportions is the material mineralogical composition.

The information system includes a program for calculating a thermal conductivity coefficient and a specific heat capacity. It differs by taking into account mass and volume fractions of the main rock-forming minerals using interpolation of table temperature values of thermal conductivity coefficients and specific heat capacities of phosphorite, carbonate and silica to determine thermophysical properties of the components at any temperature. The thermal conductivity coefficient of the material is calculated is based on the combined thermal conductivity model taking into account the endothermic reaction of carbonate dissociation; the specific heat capacity is calculated from the additive model.

There is a developed algorithm for a program for calculating thermophysical properties by the chemical composition of phosphorites.

Keywords: information system, algorithm, thermal conductivity, heat capacity, structure, chemical composition.

Acknowledgements. *The work was supported by the Russian Science Foundation within the framework of the scientific projects no. 22-61-00096, 22-11-00335.*

References

1. Leontev L.I. Physical and chemical features of the complex processing of iron-containing ores and industrial waste. *Proc. XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*, 2016, p. 92 (in Russ.).

2. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I. Approach to a heat conductivity research by fuzzy numerical methods in the conditions of indeterminacy thermal characteristics. *Systems of Control, Communication and Security*, 2017, no. 3, pp. 73–83 (in Russ.).

3. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Study of the thermal characteristics of phosphate raw materials in the annealing temperature range. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 307–312. DOI: 10.1134/S0040579517030022.

4. Kurilin S.P., Sokolov A.M., Prokimnov N.N. A computer program for electromechanical system operational diagnostics based on the topological approach. *J. of Applied Informatics*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 62–73. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-62-73 (in Russ.).

5. Meshalkin V.P., Bobkov V.I., Dli M.I. An automated decision support system for managing the energy and resource efficiency of a chemical-energy-technological system for roasting phosphorite pellets. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2019, vol. 53, no. 6, pp. 609–616. DOI: 10.1134/S0040357119060095 (in Russ.).

6. Bulygina O.V., Emelyanov A.A., Emelyanova N.Z. *Simulation Modeling in Economics and Management*. 2021, 592 p. (in Russ.).

7. Bulygina O.V., Emelyanov A.A., Ross G.V., Yashin E.S. Investments, innovations, import substitution: simulation with elements of artificial intelligence in project risk management. *J. of Applied Informatics*, 2020, vol. 15, no. 1, pp. 63–102 (in Russ.).

8. Meshalkin V.P., Panchenko S.V., Bobkov V.I., Dli M.I. Analysis of thermophysical and chemical-technological properties of waste from mining and processing plants. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, vol. 54, no. 1, pp. 30–37. DOI: 10.31857/S0040357120010170 (in Russ.).

9. Puchkov A.Yu., Lobaneva E.I., Kultygin O.P. Algorithm for predicting the parameters of a system for processing waste apatite-nepheline ores. *J. of Applied Informatics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 55–68 (in Russ.).

10. Timofeeva A.S., Nikitchenko T.V., Fedina V.V. Determining the compressibility of iron ore charge in order to predict the strength properties of pellets. *Modern High Technologies*, 2015, no. 8, pp. 53–57 (in Russ.).

11. Leontev L.I., Grigorovich K.V., Kostina M.V. Fundamental investigations as the basis of creation of new materials and technologies in metallurgy. P. 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2018, vol. 59, no. 1, pp. 11–22. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-11-22 (in Russ.).

12. Luis P., Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towardsa sustainable chemical industry. *J. of Chemical Technology and Biotechonology*, 2014, vol. 89, no. 9, pp. 1288–1303. DOI: 10.1002/JCTB.4422.

13. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations. *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, vol. 119, no. 1, pp. 265–271. DOI: 10.1007/s10973-014-4132-5.

14. Borisov V.V., Kurilin S.P., Luferov V.S. Fuzzy relational cognitive temporal models for analyzing and state prediction of complex technical systems. *J. of Applied Informatics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 27–38. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-1-27-38 (in Russ.).

Для цитирования

Орехов В.А., Бобков В.И., Панченко С.В. Разработка информационной системы расчета, накопления информации и паспортизации теплофизических свойств фосфоритов // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 502–508. DOI: 10.15827/0236-235X.139.502-508.

For citation

Orekhov V.A., Bobkov V.I., Panchenko S.V. Information system for calculation, information accumulation and certification of phosphorite thermophysical properties. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 502–508 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.502-508.

УДК 621.791.722
DOI: 10.15827/0236-235X.139.509-517
Дата подачи статьи: 28.03.22, после доработки: 17.05.22
2022. Т. 35. № 3. С. 509–517

Разработка программного обеспечения для математического моделирования распределения температуры в процессе электронно-лучевой сварки

С.О. Курашкин [1,2], *аспирант, scorpion_ser@mail.ru*
Д.В. Рогова [1], *студент, dasha_28_05@mail.ru*
В.С. Тынченко [1,2], *к.т.н., доцент, vadimond@mail.ru*
Е.В. Шуткина [1], *студент, elizaveta-shutkina@mail.ru*

[1] *Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, кафедра информационно-управляющих систем, г. Красноярск, 660037, Россия*
[2] *Сибирский федеральный университет, лаборатория биотопливных композиций, г. Красноярск, 660041, Россия*

Целью исследования является создание программной системы моделирования распределения температуры в процессе электронно-лучевой сварки в приложении Embarcadero RAD Studio (студенческая версия) на языке программирования C++. Разработка базируется на теории теплового поля с применением математических моделей для вычисления распределения температуры на поверхности изделия.

На сегодняшний день представляется возможным проводить моделирование в средах численного моделирования Comsol и ANSYS, а также в пакете MATLAB. Данные программы представляют собой мощные решения, однако имеют ряд существенных недостатков: необходимость создания эскиза изделия в CAD-системах и программирование расчетных моделей в пакетах Comsol и ANSYS, а также работа с исходным кодом в процессе моделирования и длительные вычисления в пакете MATLAB.

Предлагается разработка программной системы на основе математических моделей, которая позволит проводить моделирование процесса электронно-лучевой сварки для изделий из разных сплавов с учетом их геометрических размеров и теплофизических параметров, что даст возможность определять оптимальные технологические параметры и, следовательно, устранять корневые дефекты, а также упрощать процесс моделирования электронно-лучевой сварки по сравнению с такими системами, как MATLAB, ANSYS и Comsol.

В работе описываются программная система моделирования распределения температуры, алгоритмы моделирования эксперимента и расчета температуры. Кроме того, представлен процесс моделирования с применением данных на основе натурных экспериментов (технологических и теплофизических параметров и геометрических размеров изделия). Разработанная программная система также позволяет хранить результаты как моделирования, так и отработанного технологического процесса.

Внедрение на производстве предложенного подхода к моделированию процесса электронно-лучевой сварки для тонкостенных конструкций позволит снизить материальные и трудовые затраты при отработке технологического процесса электронно-лучевой сварки, а также при вводе в производство новых видов продукции.

Ключевые слова: *автоматизированное управление, технологический процесс, аэрокосмические конструкции, электронно-лучевая сварка, электронный пучок, программный продукт, C++, RAD Studio.*

Одним из наиболее высокотехнологичных и высокопроизводительных способов сварки является *электронно-лучевая сварка* (ЭЛС). Авторы работы [1], рассматривая проблему выбора эффективных параметров процесса ЭЛС, разработали математическую модель, которая использует машинное обучение для прогнозирования эффективных параметров процесса. Поскольку для прогнозирования параметров процесса требуется регрессионная модель, в данном исследовании применяются алгоритмы регрессионного анализа.

В работе [2] рассмотрено автоматическое управление системами вакуума и охлаждения размещенного оборудования для ЭЛС, испарения и модификации поверхности. На основе анализа вакуумных систем для ЭЛС была разработана собственная система контроля и управления вакуумом с использованием существующих и дополнительных технических

средств автоматизации. В результате сделан вывод, что оптимизация показателей, критичных по длительности выхода на рабочий режим и остановки работы установки, может быть проведена с использованием экспериментально полученных переходных характеристик.

Для принятия важных решений о целесообразности системы, а также о ее последующей коррекции повсеместно используются методы компьютерной диагностики. Например, в работе [3] авторы представляют интегрированную систему управления ЭЛС селективного плавления на основе средств электронно-лучевой диагностики.

Моделирование процессов ЭЛС – одна из наиболее важных составляющих прикладных исследований, поскольку проведение полномасштабных экспериментов дорогостоящее или трудозатратное. Применение методов математического моделирования позволяет существенно снизить временные, трудовые, а также экономические затраты на совершенствование и отработку существующих технологий. Работа [4] отражает последние исследования ЭЛС по теплопередаче, потоку жидкости и термомеханическому анализу при оценке размеров сварных швов, трехмерного распределения температуры, характера течения жидкости, вызванных сваркой искажений и остаточных напряжений. Чтобы лучше понять такие явления, в [5] предложена модель Computational Fluid Dynamics (CFD), разработанная в свободном ПО CFD с открытым исходным кодом OpenFOAM. Его цель – обеспечить основу для более глубокого понимания терможидкостно-динамических процессов. В работе [6] представлена численная модель, описывающая тепловой источник при ЭЛС, численные расчеты выполнены методом конечных элементов. Исследование [7] посвящено разработанной модели динамики сжимаемого парового шлейфа в замочной скважине во время процесса VEBW и гидродинамике внутри переходной замочной скважины в процессе VEBW сплава Ti-6Al-4V. Одной из наиболее актуальных задач при ЭЛС металлов является определение закономерностей взаимодействия первичных электронов с потоком газа (пара) с учетом существующих и формируемых (заряженными частицами) электрических полей [8].

Авторы работ [9–11] выполнили моделирование, сходное с электронно-лучевыми процессами сварки, которое показало, что динамическое позиционирование электронного пучка при создании нескольких источников обеспечивает возможность ввода тепла в несколько участков сварного соединения, что, в свою очередь, позволяет получать высококачественные соединения сплавов разных металлов.

Для разработки системы автоматизации ЭЛС важным фактором является анализ оптимизации с использованием экспериментальных данных на различных металлах. В работе [12] представлены основные исследования анализа оптимизации, показавшие, что для определенного материала при достаточном количестве проведенных опытов можно прогнозировать различные геометрические параметры сварного шва на основе статистических методов. Такие модели можно использовать в экспертных системах [13, 14]. При исследовании процессов, протекающих при ЭЛС, уделяется внимание импульсной модуляции, которая приводит к изменению тепловложения [13]. Утверждается, что металлы имеют свой диапазон частот модуляции тока электронного луча, при котором повышается эффективность процесса ЭЛС и, в частности, увеличивается глубина проплавления. Технологические требования к качеству ЭЛС [15] напрямую влияют на результативность и правильность выполнения АСУ ЭЛС. Например, в [16] представлена система управления установкой ЭЛС, где выделена наиболее важная задача позиционирования свариваемых деталей, однако технологические характеристики не позволяют знать время, заранее потраченное на достижение скорости сварки.

Наиболее важными технологическими параметрами процесса ЭЛС являются тип и геометрия стыкового соединения и пространственное положение сварного шва и электронного пучка [17]. В [18] предложен алгоритм поиска оптимального технологического режима ЭЛС, который может быть рекомендован для отработки технологии ЭЛС новых конструкционных материалов или усовершенствования уже имеющихся старых техпроцессов и результатов расчетов.

Таким образом, целью данной работы является разработка программной системы моделирования распределения температуры в процессе ЭЛС, которая позволит отрабатывать технологический процесс для различных изделий и получать стабильное качество сварного шва. Программная система разработана на языке C++ [19, 20] в виде оконного приложения для операционных систем линейки Windows, совме-

стимого с версиями Windows 7/8/8.1/10/11, которая позволит получать оптимальные технологические параметры режима сварки (ток луча, скорость сварки, ускоряющее напряжение), учитывая геометрические параметры изделия и графики распределения температуры в процессе ЭЛС.

Проектирование программной системы

Структурно проект состоит из следующих компонентов: система моделирования, БД, подсистема визуализации (рис. 1).

Рис. 1. Иерархическая структура проекта

Fig. 1. The project hierarchical structure

Система моделирования обеспечивает расчет процесса по заданным технологическим параметрам, таким как удельная теплоемкость материала, плотность материала, коэффициенты температуроотдачи в пластите, температурного расширения и теплопроводности, толщина изделия, радиус изделия, ускоряющее напряжение, скорость сварки, начальное и конечное время, ток луча, мощность (вводимая энергия), шаг по размерной сетке, расстояние относительно начала координат (x и y), начальная температура изделия. Далее происходит обработка заданных параметров и данных.

Динамическая БД позволяет пользователю вносить необходимые изделия и материалы по мере надобности и содержит информацию о ее объектах и ограничении их целостности. После заполнения БД осуществляется тестирование для проверки работоспособности ее функций. БД является центром системы.

Подсистема визуализации реализует графическое 3D-изображение распределения температуры в трех измерениях в процессе ЭЛС. Система также хранит технологические параметры, реализованные в системе моделирования.

В работах [18, 21, 22] описаны математические модели для вычисления температуры с дальнейшим моделированием в MATLAB и получением технологических параметров. Однако данный подход усложняется требованием к знаниям и навыкам программирования для работы с программой и сложностью оценки адекватности полученных результатов. Таким образом, предлагается разработка программной системы в среде Embarcadero RAD Studio [23, 24].

Программная система моделирования распределения температуры в процессе ЭЛС состоит из пяти модулей, связующим из которых является БД (рис. 2):

– модуль математического моделирования обеспечивает обработку данных с помощью математических алгоритмов и передачу получаемой информации в модуль БД;

– модуль обработки данных позволяет редактировать информацию в модуле БД и осуществлять в нем поиск по заданным условиям;

– модуль экспорта результатов моделирования отвечает за их преобразование в заданный формат (текстовый или графический) и передачу из программы;

– модуль визуализации осуществляет графическое представление данных (изменение температуры с течением времени);

– пользовательский интерфейс представлен в виде главного окна программной системы.

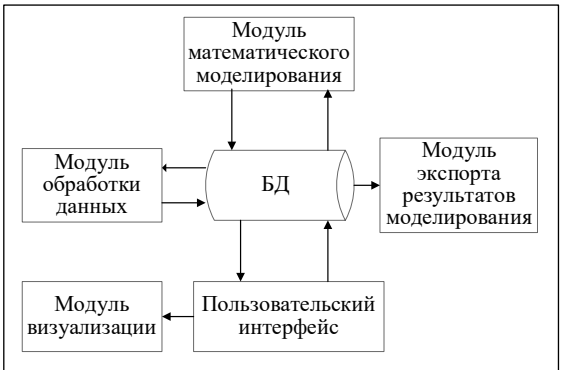


Рис. 2. Блок-схема программной системы моделирования распределения температуры в процессе ЭЛС

Fig. 2. A block diagram of the software system for simulation of temperature distribution during electron beam welding

БД реализует хранение, обработку и передачу информации о процессе моделирования распределения температуры.

Алгоритм моделирования эксперимента (рис. 3) начинается с инициализации теплофизических параметров и геометрических размеров изделия, затем на их основании вычисляются необходимые параметры для моделирования, интегрируется первая компонента, затем вторая, вычисляются абсолютная температура T и изменения температуры $T1$ и $T2$ (при воздействии точечного и линейного источников соответственно). Если интегрирование не окончено, прибавляется шаг интегрирования и вычисления повторяются, если вычисления закончены, алгоритм завершается. На основании данного алгоритма выводится температурное поле исследуемого изделия. Пользователю доступно отображение результатов в графическом формате для наглядного представления. Алгоритм позволяет оценить влияние как совокупности параметров, так и отдельно каждого из них.

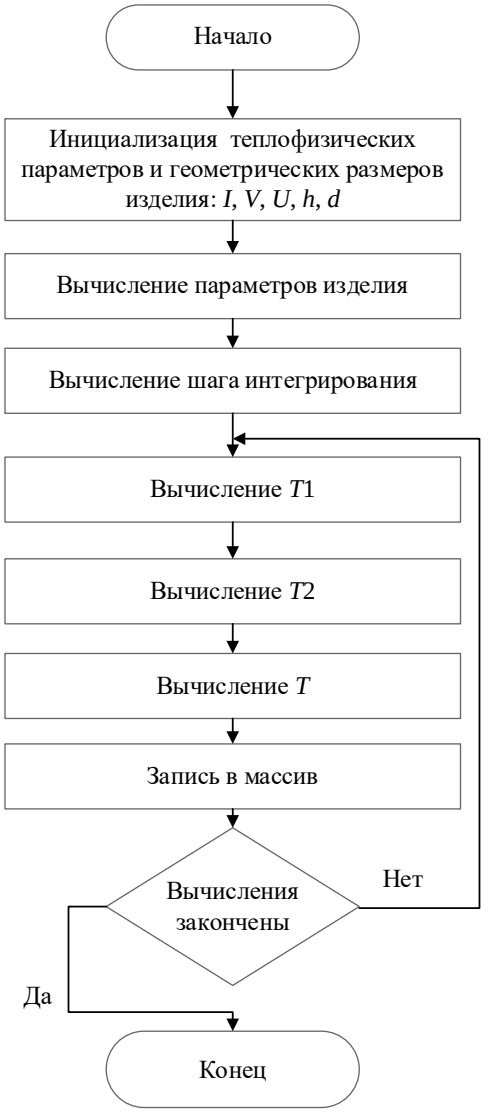


Рис. 3. Алгоритм моделирования эксперимента: I – ток пучка, V – скорость сварки, U – ускоряющее напряжение, h – высота изделия, d – диаметр изделия (при наличии такового)

Fig. 3. The experiment modeling algorithm

Блок-схема алгоритма программы представлена на рисунке 4. Алгоритм состоит из выбора между проведением нового эксперимента и загрузкой имеющегося, по окончании работы с экспериментом полученные результаты сохраняются в БД.

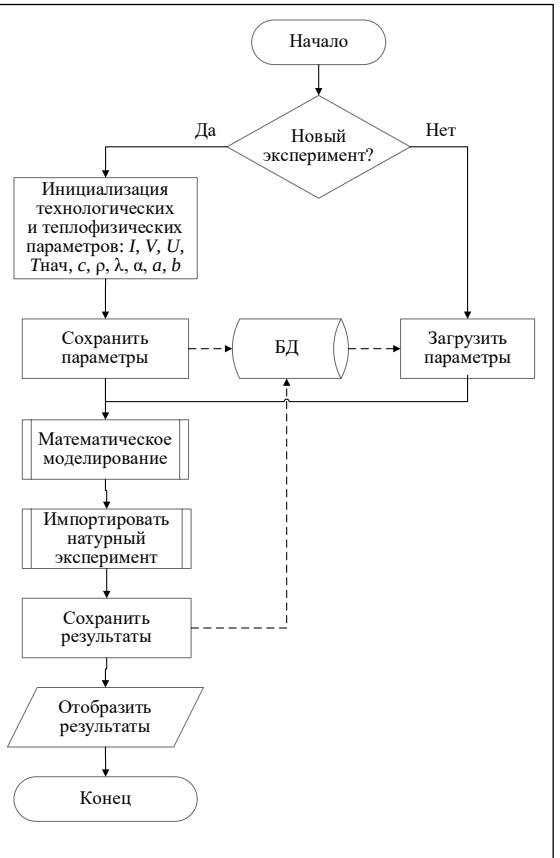


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета температуры: Tнач – начальная температура, c – удельная теплоемкость материала, ρ – плотность материала, λ – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент теплового расширения, a – температуропроводность, b – коэффициент теплопередачи

Fig. 4. A block diagram of the temperature calculation algorithm

После создания нового эксперимента, инициализации и сохранения в БД технологических и теплофизических параметров либо

загрузки параметров из предыдущего эксперимента проводится математическое моделирование (на основе математических моделей вычисляется температурное поле на поверхности изделия). Затем импортируются результаты натурного эксперимента. Далее полученные в ходе эксперимента данные сохраняются в БД. По завершении отображаются результаты моделирования эксперимента в виде трехмерного графика, на котором можно наблюдать распределение температуры в зоне сварного шва или околошовной зоны от начала сварки до ее окончания.

В качестве математического аппарата применяются модели из теории сварочных процессов для быстродвижущегося мгновенного и линейного источников. Математическое описание подробно дано в работах [18, 21, 22].

Описание программной системы

Для успешной работы программы достаточно наличия установленной операционной системы Windows 7 и выше.

Интерфейс программной системы моделирования распределения температуры в процессе ЭЛС условно разбит на три вкладки: «Планирование», «Моделирование», «Поиск».

Начальной вкладкой главного окна программной системы является «Планирование» (рис. 5).

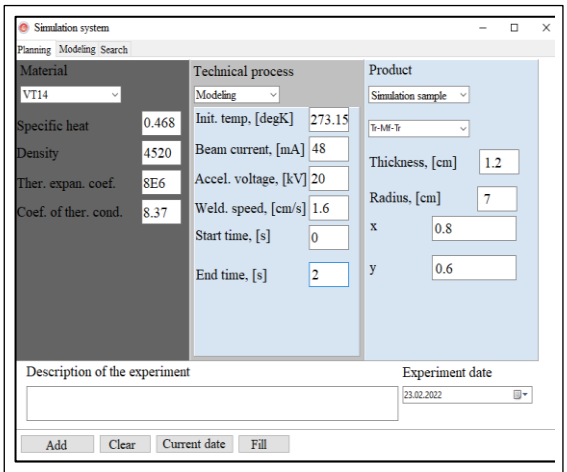


Рис. 5. Главное окно системы моделирования

Fig. 5. The main window of the modeling software system

На вкладке находятся четыре блока, в которых задаются необходимые свойства и параметры. Первые три блока расположены в верхней части окна: блок материалов (задаются свойства материала), блок техпроцесса (задается технологический процесс), блок изделия (задаются свойства изделия и начальное положение относительно изделия).

Четвертый блок, расположенный в нижней части экрана, помимо заполнения данных, относящихся ко всему эксперименту – даты и описания, является управляющим и на нем расположены следующие элементы управления (активные кнопки): Add – отвечает за добавление записи в БД, Clear – отвечает за очистку полей, расположенных во вкладке, Current date – устанавливает дату и время на данный момент, Fill – отвечает за автоматическое заполнение параметров эксперимента в соответствии с наиболее вероятными, а также за ускорение тестирования работы программы.

Вкладка «Моделирование» представлена на рисунке 6.

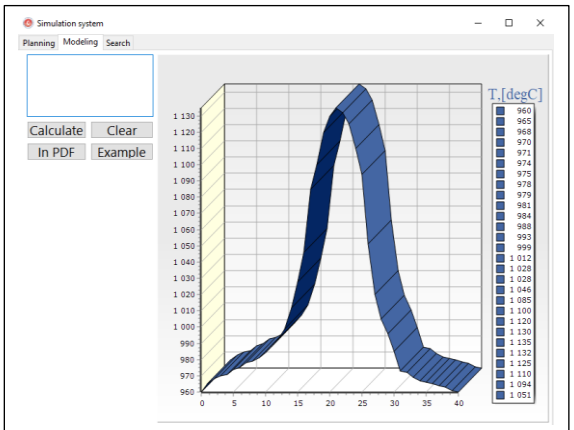


Рис. 6. Моделирование процесса ЭЛС тонкостенной аэрокосмической конструкции

Fig. 6. Simulation of the electron beam welding process for a thin-walled aerospace structure

В окне вкладки отображается график распределения температуры на поверхности изделия, который строится на основе вычислений интегральных функций с параметрами, заданными на вкладке «Планирование».

В верхней части окна слева расположено текстовое поле, в котором в случае необходимости выводятся значения функции для каждой точки графика.

Управляющие элементы представлены четырьмя кнопками: Calculate – для выполнения расчета интегральных функций и заполнения массива, на основании которого строится график; Clear – для очистки текстового поля, полей на вкладке «Планирование» и поля

графика; Example – для заполнения графика на основании данных с вкладки «Планирование», но по упрощенным математическим моделям; In PDF – для экспорта данных в формате PDF в файл.

В верхней части окна вкладки «Поиск» (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/2.jpg) расположено средство просмотра записей БД, по умолчанию отображающее все записи. В окне просмотра расположены следующие поля: ID_E – идентификатор эксперимента (каждому эксперименту присваивается номер в порядке возрастания); ID_T – идентификатор техпроцесса, задействованного в эксперименте (технологическому процессу присваивается индивидуальный номер для удобного хранения); ID_M – идентификатор материала, задействованного в эксперименте; ID_I – идентификатор изделия, задействованного в эксперименте; Date – дата эксперимента.

В нижней части окна размещены три группы элементов: Search by inclusion – поиск по заданному полю (Description, ID experiment, Technical pross, Material, Product, Connection type), представлен полем для ввода включения, группой элементов, отвечающей за выбор поля, в котором будет осуществляться поиск, и соответствующей кнопкой; Search by date – поиск по дате, представлен элементом выбора даты и кнопкой, запускающей поиск; Window control – для редактирования или удаления сохраненного эксперимента по его идентификатору, представлен текстовым полем, отображающим идентификатор текущей записи, на которую направлен указатель средства просмотра.

Заключение

В результате проведенного исследования авторами было разработано ПО для моделирования распределения температуры на поверхности изделия в процессе ЭЛС, которое дает возможность устранить ряд недостатков, возникающих при соединении изделий методом ЭЛС.

Разработанная программная система позволяет моделировать распределение температуры в процессе ЭЛС для изделий из любых сплавов и типоразмеров, что в результате даст оптимальное качество сварного шва при сварке как новых изделий, так и уже используемых на производстве, а также может быть встроена практически в любой применяемый программный продукт.

Система моделирования процесса ЭЛС позволит получать стабильное качество сварного шва как при сварке изделий из ранее не используемых сплавов, так и при вводе в производство новых типов изделий.

Исследования выполнены по государственному заданию, контракт № FSRZ-2021-0012.

Литература

1. Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Tynchenko V.V., Bukhtoyarov V.V., Kukartsev V.V., Sergienko R.B. et al. Software to predict the process parameters of electron beam welding. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 92483–92499. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3092221.

2. Koleva E., Dzharov V., Kardjiev M., Mladenov G. Automation of the electron-beam welding process. J. of Physics: Conf. Ser., 2016, vol. 700, art. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/700/1/012012.

3. Koleva L., Koleva E., Batchkova I., Mladenov G. Integrated control system for electron beam processes. J. of Physics: Conf. Ser., 2018, vol. 992, art. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/992/1/012014.

4. Chowdhury S., Yadaiah N., Khan S.M., Ozah R., Das B., Muralidhar M. A perspective review on experimental investigation and numerical modeling of electron beam welding process. Materials Today: Proc., 2018, vol. 5, no. 2, pp. 4811–4817. DOI: 10.1016/J.MATPR.2017.12.055.

5. Wang J., Hu R., Chen X., Pang S. Modeling fluid dynamics of vapor plume in transient keyhole during vacuum electron beam welding. Vacuum, 2018, vol. 157, pp. 277–290. DOI: 10.1016/J.VACUUM.2018.08.059.

6. Petrov P., Tongov M. Numerical modelling of heat source during electron beam welding. Vacuum, 2020, vol. 171, art. 108991. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.108991.

7. Родякина Р.В., Щербаков А.В., Гапонова Д.А. Моделирование процесса ионизации металлов при ЭЛС // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. 2020. С. 129–136.

8. Sudnik V.A., Erofeev V.A., Richter K.-H., Heins K.-V. Numerical modelling of the EBW process. Proc. Int. Conf. Computer Technology in Welding and Manufacturing and Mathematical Modeling and Information Techhnologies in Welding and Related Processes, 2006, vol. 10, no. 1, pp. 295–300.

9. Tsonevska T.S., Koleva E.G., Koleva L.S., Mladenov G.M. Modelling the shape of electron beam welding joints by neural networks. J. of Physics: Conf. Ser., 2018, vol. 1089, art. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/1089/1/012008.

10. Саломатова Е.С., Трушников Д.Н., Беленький В.Я. Моделирование температуры в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5. № 11. С. 514–518.

11. Младенов Г., Колева Е., Беленький В.Я., Трушников Д.Н. Моделирование и оптимизация электронно-лучевой сварки сталей // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2014. Т. 16. № 4. С. 7–21.

12. Ольшанская Т.В., Саломатова Е.С. Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке // Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2016. Т. 18. № 4. С. 169–187.

13. Бескончин К.В., Золотухин Д.Б., Зенин А.А., Тюньков А.В., Юшков Ю.Г. Четырехкоординатный манипулятор для установки электронно-лучевой сварки // Докл. ТУСУР. 2017. Т. 20. № 1. С. 154–156. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-154-156.

14. Драгунов В.К., Слива А.П., Жмурко И.Е., Гончаров А.Л., Терентьев Е.В., Марченко А.Ю., Блохов Е.Ю. Разработка технологии электронно-лучевой сварки сосудов высокого давления из стали 30ХГСА // Нефтяное хозяйство. 2016. № 12. С. 126–130.

15. Стельвага А.А. Разработка системы управления установкой электронно-лучевой сварки // Инструментальные методы и техника экспериментальной физики: Матер. 52-й МНСК. 2014. С. 56–56.

16. Лютов А.Г., Рябов Ю.В., Хабибулин А.З., Загитов Д.Ф. Моделирование данных для сварочных процессов // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: Матер. Всерос. науч.-технич. конф. 2020. № 1. С. 127–132.

17. Kurashkin S.O., Seregin Y.N., Tynchenko V.S., Petrenko V.E., Murygin A.V. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process. J. of Physics: Conf. Ser., 2020, vol. 1515, no. 5, art. 052049. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052049.

18. Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Seregin Y.N., Murygin A.V., Kukartsev V.V., Tynchenko V.V. The model of energy distribution during electron beam input in welding process. J. of Physics: Conf. Ser., 2020, vol. 1679, no. 4, art. 042036. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/4/042036.

19. Страуструп Б. Программирование. Принципы и практика использования C++; [пер. с англ.]. М.: Вильямс, 2011. 1248 с.

20. Павловская Т.А. C/C++. Программирование на языке высокого уровня. СПб: Питер, 2010. 460 с.

21. Kurashkin S., Tynchenko V., Murygin A., Rogova D., Bocharov A. Modelling the heating of thin-walled aerospace designs from various materials with electron beam welding. AIP Conf. Proc., 2021, vol. 2402, no. 1, art. 020048. DOI: 10.1063/5.0071365.

22. Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Tynchenko V.V., Bukhtoyarov V.V., Kukartsev V.V., Sergienko R.B. et al. Software to predict the process parameters of electron beam welding. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 92483–92499. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3092221.

23. Николаев В.Т., Купцов С.В., Тикменов В.Н. Практика программирования в инженерных расчетах. М.: Физматлит, 2018. 440 с.

24. Беспалов Д.А., Гушанский С.М., Коробейникова Н.М. Операционные системы реального времени и технологии разработки кроссплатформенного программного обеспечения. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. Ч. 2. 168 с.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.509-517

Received 28.03.22, Revised 17.05.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 509–517

Developing software for mathematical modeling of temperature distribution in the process of electron beam welding

S.O. Kurashkin [1,2], *Postgraduate Student, scorpion_ser@mail.ru*
D.V. Rogova [1], *Student, dasha_28_05@mail.ru*
V.S. Tynchenko [1,2], *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, vadimond@mail.ru*
E.V. Shutkina [1], *Student, elizaveta-shutkina@mail.ru*

[1] *Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Information-Control Systems Chair, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation*
[2] *Siberian Federal University, Laboratory of Biofuel Compositions, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation*

Abstract. The purpose of the study is to develop a software system for modeling temperature distribution in the electron-beam welding process (EBW) in the Embarcadero RAD Studio application (student version), in the programming language C++. The base for this development is the thermal field theory using mathematical models to calculate the surface temperature distribution.

Nowadays, it is possible to carry out simulation in the numerical simulation environments Comsol and ANSYS, as well as in the MATLAB package. These programs are powerful solutions, however they have a number of significant drawbacks such as: the need to create a product sketch in CAD systems and programming calculation models in the Comsol and ANSYS packages; direct work with the source code in the modeling process and lengthy calculations in the MATLAB package.

Thus, the authors propose developing a software system based on mathematical models that will allow: (1) simulating the EBW welding process for products from different alloys considering their geometric dimensions and thermophysical parameters, which will make it possible to determine the optimal technological parameters and, therefore, eliminate root defects; (2) simplifying the process of ELW modeling comparing to such systems as MATLAB, ANSYS and Comsol.

The paper describes a software system for modeling temperature distribution, an algorithm for modeling an experiment, and an algorithm for calculating temperature. In addition, there is a presented modeling process using data based on full-scale experiments (technological parameters, thermophysical parameters and geometric dimensions of the product). In addition, the developed software system allows storing both the results of the developed technological process and the simulation results.

Introduction to production of the proposed approach to modeling the process of electron beam welding for thin-walled structures will reduce material and labor costs when developing the technological process of electron beam welding, as well as when introducing new types of products into production.

Keywords: aerospace structures, automated control, electron beam welding, electron beam, software product, technological process, C++, RAD Studio.

Acknowledgements. *The studies were carried out according to the state, contract no. FSRZ- 2021-0012.*

References

1. Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Tynchenko V.V., Bukhtoyarov V.V., Kukartsev V.V., Sergienko R.B. et al. Software to predict the process parameters of electron beam welding. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 92483–92499. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3092221.

2. Koleva E., Dzharov V., Kardjiev M., Mladenov G. Automation of the electron-beam welding process. *J. of Physics: Conf. Ser*., 2016, vol. 700, art. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/700/1/012012.

3. Koleva L., Koleva E., Batchkova I., Mladenov G. Integrated control system for electron beam processes. *J. of Physics: Conf. Ser*., 2018, vol. 992, art. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/992/1/012014.

4. Chowdhury S., Yadaiah N., Khan S.M., Ozah R., Das B., Muralidhar M. A perspective review on experimental investigation and numerical modeling of electron beam welding process. *Materials Today: Proc*., 2018, vol. 5, no. 2, pp. 4811–4817. DOI: 10.1016/J.MATPR.2017.12.055.

5. Wang J., Hu R., Chen X., Pang S. Modeling fluid dynamics of vapor plume in transient keyhole during vacuum electron beam welding. *Vacuum*, 2018, vol. 157, pp. 277–290. DOI: 10.1016/J.VACUUM.2018.08.059.

6. Petrov P., Tongov M. Numerical modelling of heat source during electron beam welding. *Vacuum*, 2020, vol. 171, art. 108991. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.108991.

7. Rodyakina R.V., Shcherbakov A.V., Gaponova D.A. Modeling of the process of ionization of metals during EBW. *Electron-Beam Welding and Related Technologies*, 2020, pp. 129–136 (in Russ.).

8. Sudnik V.A., Erofeev V.A., Richter K.-H., Heins K.-V. Numerical modelling of the EBW process. *Proc. Int. Conf. Computer Technology in Welding and Manufacturing and Mathematical Modeling and Information Techhnologies in Welding and Related Processes*, 2006, vol. 10, no. 1, pp. 295–300.

9. Tsonevska T.S., Koleva E.G., Koleva L.S., Mladenov G.M. Modelling the shape of electron beam welding joints by neural networks. *J. of Physics: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1089, art. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/1089/1/012008.

10. Salomatova E.S., Trushnikov D.N., Belenky V.Ya. Simulation of temperature in a steam-gas channel during electron-beam welding. *Thermal Processes in Engineering*, 2013, vol. 5, no. 11, pp. 514–518 (in Russ.).

11. Mladenov G., Koleva E., Belenkiy V.Ya., Trushnikov D.N. Simulation and optimization electron beam welding steels. *Bull. of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 7–21 (in Russ.).

12. Olshanskaya T.V., Salomatova E.S. Review of modern methods of electron beam control in electron beam welding. *Bull. of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 169–187 (in Russ.).

13. Beskonchin K.V., Zolotukhin D.B., Zenin A.A., Tyunkov A.V., Yushkov Yu.G. Four-coordinate manipulator for electron-beam welding facility. *Proc. of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 154–156 (in Russ.).

14. Dragunov V.K., Sliva A.P., Zhmurko I.E., Goncharov A.L., Terentiev E.V., Marchenko A.Yu., Blokhov E.Yu. 30KHGSA steel high-pressure vessels electron-beam welding technology. *Oil Industry*, 2016, no. 12, pp. 126–130 (in Russ.).

15. Stelvaga A.A. Development of a control system for an electron-beam welding installation. *Proc. 52 ISSC: Instrumental Methods and Technologies of Experimental Physics*, 2014, pp. 56–56 (in Russ.).

16. Lyutov A.G., Ryabov Yu.V., Habibulin A.Z., Zagitov D.F. Data modeling for welding processes. *Machine Tool Building and Innovative Engineering. Problems and Points of Growth*, 2020, no. 1, pp. 127–132 (in Russ.).

17. Kurashkin S.O., Seregin Y.N., Tynchenko V.S., Petrenko V.E., Murygin A.V. Mathematical functional for thermal distribution calculating during the electron-beam welding process. *J. of Physics: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1515, no. 5, art. 052049. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052049.

18. Kurashkin S.O., Tynchenko V.S., Seregin Y.N., Murygin A.V., Kukartsev V.V., Tynchenko V.V. The model of energy distribution during electron beam input in welding process. *J. of Physics: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1679, no. 4, art. 042036. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/4/042036.

19. Stroustrup B. *Programming. Principles and Practice of Using C++*. Addison-Wesley Publ., 2014, 1274 p. (Russ. ed.: Moscow, 2021, 1248 p.).

20. Pavlovskaya T.A. *C/C++. High Level Language Programming*. St. Petersburg, 2010, 460 p. (in Russ.).

21. Kurashkin S., Tynchenko V., Murygin A., Rogova D., Bocharov A. Modelling the heating of thin-walled aerospace designs from various materials with electron beam welding. *AIP Conf. Proc*., 2021, vol. 2402, no. 1, art. 020048. DOI: 10.1063/5.0071365.

22. Tynchenko V.S., Kurashkin S.O., Tynchenko V.V., Bukhtoyarov V.V., Kukartsev V.V., Sergienko R.B. et al. Software to predict the process parameters of electron beam welding. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 92483–92499. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3092221.

23. Nikolaev V.T., Kuptsov S.V., Tikmenov V.N. *The practice of Programming in Engineering Calculations*. Moscow, 2018, 440 p. (in Russ.).

24. Bespalov D.A., Gushansky S.M., Korobeynikova N.M. *Real Time Operating Systems and Cross-Platform Software Development Technologies*. Rostov-on-Don; Taganrog, 2019, part 2, 169 p. (in Russ.).

Для цитирования

Курашкин С.О., Рогова Д.В., Тынченко В.С., Шуткина Е.В. Разработка программного обеспечения для математического моделирования распределения температуры в процессе электронно-лучевой сварки // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 509–517. DOI: 10.15827/0236-235X.139.509-517.

For citation

Kurashkin S.O., Rogova D.V., Tynchenko V.S., Shutkina E.V. Developing software for mathematical modeling of temperature distribution in the process of electron beam welding. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 509–517 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.509-517.

УДК 004.89
DOI: 10.15827/0236-235X.139.518-526
Дата подачи статьи: 13.04.22, после доработки: 27.07.22
2022. Т. 35. № 3. С. 518–526

Разработка системы для управления профессиональным развитием студента на основе его цифрового следа

Ю.В. Боганюк [1], *аспирант, y.v.boganyuk@utmn.ru*
М.С. Воробьева [1], *к.т.н., доцент, m.s.vorobeva@utmn.ru*
И.Г. Захарова [1], *д.пед.н., профессор, i.g.zakharova@utmn.ru*

[1] *Тюменский государственный университет, г. Тюмень, 625003, Россия*

Большинство существующих в вузах информационных систем лишено функции глубокого анализа работ студента. Такой анализ должен включать тексты отчетов, реализованные проекты и программный код, в комплексе составляющие цифровой след студента. Авторы разработали интеллектуальную систему, решающую эти задачи и представленную набором модулей для мониторинга, управления и прогнозирования профессионального развития студента как ИТ-специалиста с помощью технологий Big Data и Data mining.

При разработке были учтены особенности текущего процесса: например, наличие нескольких информационных систем и файловых хранилищ в вузе, наличие различных ролей внутренних и внешних пользователей и учет потребностей и проблем пользователей, с которыми они сталкиваются в процессе работы и обучения. Одним из ключевых элементов системы является разработанное мультиуровневое хранилище данных, состоящее из двух компонентов: реляционной БД и NoSQL-хранилища. Система ориентирована не только на анализ успеваемости, но и на текстовые документы, продуцируемые самими студентами, а также документы, регламентирующие его образовательную траекторию.

Разработанная система позволяет расширить возможности принятия решений в управлении образовательным процессом на всех уровнях (студент, преподаватель, администрация университета) за счет применения современных методов и технологий интеллектуального анализа данных к менее изученной части цифрового следа студента. Кроме того, открываются новые возможности для взаимодействия университета с работодателями и абитуриентами.

Ключевые слова: *подготовка ИТ-специалистов, технологии Big Data и Data mining, NoSQL-хранилище, анализ текста на естественном языке.*

Информационные системы для автоматизации процессов в образовательных организациях выполняют в большей мере сбор данных. Формально они предназначены для управления образовательным процессом, однако использовать их с этой целью затруднительно, поскольку в них отсутствуют инструменты соотнесения планируемых и достигнутых результатов обучения. Кроме того, они имеют узкокорпоративный характер и поэтому не позволяют сравнивать развитие профессиональных компетенций студента с актуальными требованиями рынка труда.

Системы электронного обучения (например, Microsoft Teams, eLearning, системы на платформе Moodle и т.д.) расширяют возможности сбора данных, отражающих разные стороны образовательного процесса, и построения обобщенных отчетов, но не позволяют отслеживать цифровой след студента.

В последние годы активно развиваются методы и подходы интеллектуальной поддержки в области управления образовательным процессом и анализа цифрового следа студента. Например, авторы работ [1, 2] описывают разработанные для внутреннего использования системы управления подготовкой ИТ-специалистов и особенно отмечают важность оценки и учета личностных и психологических качеств студентов для формирования учебных команд и определения дальнейших обучающих программ и заданий. В исследовании [3] отмечена важность учета при разработке методов прогнозирования профессионального развития психологических особенностей цифрового поколения.

Также разрабатываются системы, позволяющие соотносить профессиональное развитие студентов с актуальными требованиями рынка труда с целью адаптации образовательных программ [4, 5]. Кроме того, проблема несоответствия количественного и качественного состава и компетенций выпускников вузов требованиям рынка труда актуальна также для работодателей и руководителей регионов, вследствие чего в стандартизации программ

высшего образования происходят процессы, направленные на переход к рамочной регламентации структуры образовательных программ, условий их реализации и результатов освоения, представленных в форме компетенций студентов [6].

Отмечаются и новые задачи, которые необходимо решать перед реализацией и внедрением интеллектуальных систем анализа данных, накопленных в вузах. Например, в статье [7] акцентировано внимание на потребности приведения хранимых разными вузами данных к единому формату для последующей агрегации, а также на необходимости перехода от множества локальных хранилищ образовательных организаций к общему. В свою очередь, работа с большими объемами данных требует внедрения современных Big Data-технологий [8].

В данной статье описывается разработанная интеллектуальная информационная система, которая позволяет проводить глубокий анализ данных цифрового следа студента и извлекать новые знания для управления образовательным процессом с помощью технологий Big Data и Data mining. Использование современных методов сбора и анализа данных дает возможность извлекать новые знания и анализировать их в различных разрезах (по отдельным студентам и группам, по курсам, направлениям, дисциплинам и др.), выявлять кластеры студентов, отражающие особенности профессионального развития, и соотносить их с требованиями стандартов.

Функциональная схема системы

При проектировании системы были учтены особенности образовательных процессов, существующих в *Институте математики и компьютерных наук* (ИМиКН) *Тюменского государственного университета* (ТюмГУ), а именно:

– наличие нескольких информационных систем и файловых хранилищ, в которых ведется работа сотрудниками и студентами университета;

– наличие различных ролей внутренних (студенты, преподаватели, администрация) и внешних (гостевых) (абитуриенты и работодатели) пользователей;

– учет потребностей и проблем пользователей, с которыми они сталкиваются в процессе работы и обучения.

Разработанная информационная система (рис. 1) включает в себя следующие компоненты.

- **Хранилище данных**, предназначенное для хранения структурированных и неструктурированных данных.
- **Интеграционная шина**, обеспечивающая централизованный и унифицированный

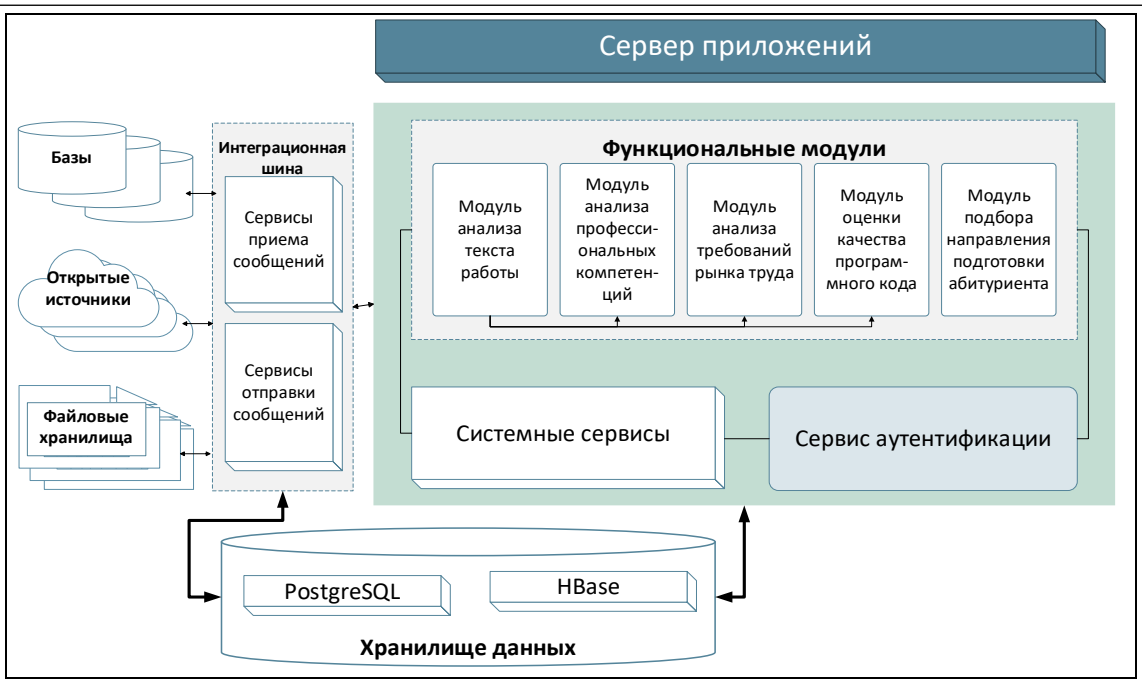


Рис. 1. Функциональная схема системы

Fig. 1. The system functional diagram

событийно-ориентированный обмен сообщениями с внешними системами на принципах сервис-ориентированной архитектуры. Она содержит сервисы приема-отправки данных, предназначенные для проверки поступающих сообщений на предмет соответствия форматам и отправки их в другие сервисы, а также внешним информационным системам.

- **Сервер приложений**, содержащий основные системные функции, в том числе функции разграничения доступа. В структуру входят следующие компоненты:

– функциональные модули, предоставляющие пользователям системы доступ к сырым данным и результатам их анализа, а также графический интерфейс для взаимодействия с системой;

– системные сервисы, предназначенные для выполнения внутренних функций – пополнения хранилища данными и включающие загрузку сырых данных, преобразование к различным форматам, извлечение метаданных, запись данных в таблицы реляционной и NoSQL-части хранилища.

– сервис аутентификации, предназначенный для управления доступом и позволяющий определять права доступа на просмотр и запрос данных.

- **Внешние системы**, представляющие собой корпоративные информационные системы вуза и внешние открытые рекрутинговые порталы.

Структура системы

Система спроектирована по принципу относительной независимости модулей, компонентов и системных сервисов, реализованных так, чтобы при функционировании они были связаны между собой как можно меньшим числом связей (параметров) и обладали максимально возможной независимостью во внешней среде без ущерба для реализации целей интегрирующей автоматизированной информационной системы.

В системе выделены и реализованы уровни доступа к данным, бизнес-логики, авторизации и управления доступом и пользовательский уровень, включающий пользовательские интерфейсы для доступа и управления функциями и данными системы (рис. 2).

Предусмотрены четыре уровня доступа к системе.

На уровне 1 осуществляется доступ к сырым данным, которые выгружаются в систему из внешних источников. С системой работают технические специалисты (системные администраторы, разработчики), решающие задачи реализации и поддержки высоконагруженных систем. Взаимодействие с системой происходит посредством модификации и написания программного кода и API, а также обезличивания и извлечения метаданных общего характера из сырых данных.

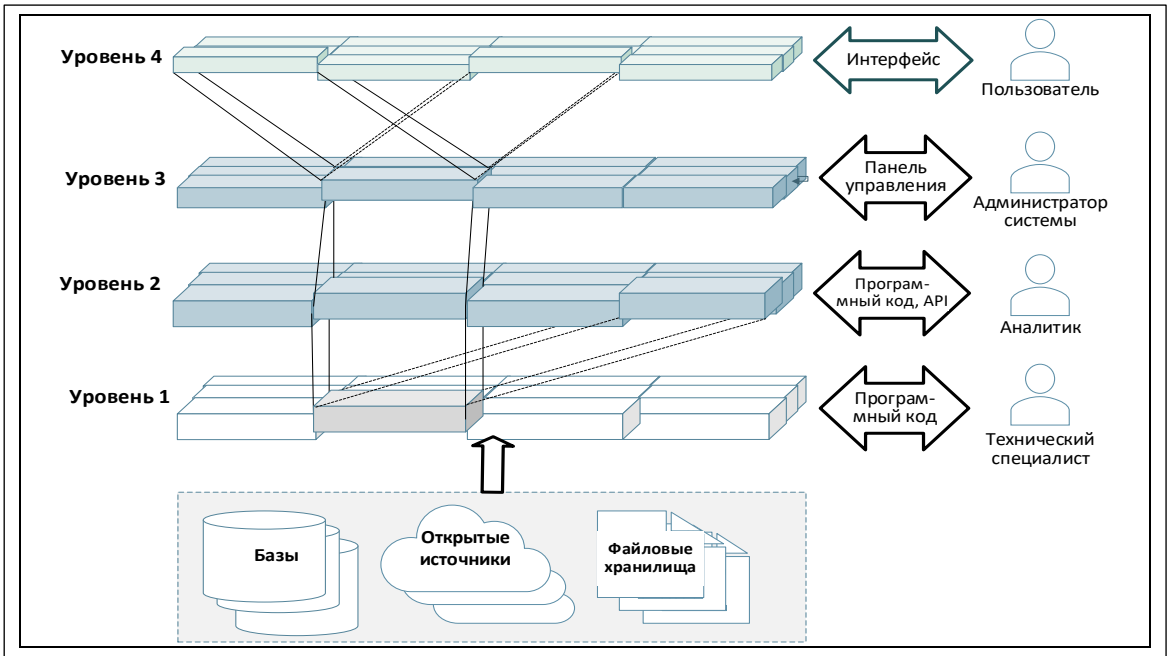


Рис. 2. Уровни доступа к системе

Fig. 2. System access levels

Уровень 2 – это уровень бизнес-логики. Исходными данными для работы являются предобработанные на системном уровне данные. С подготовленными исходными данными работают аналитики (исследователи, специалисты data science, UI/UX и frontend-разработчики), создавая программный код и выполняя запросы к API, реализованному техническими специалистами системного уровня.

На уровне 3 с системой работают администраторы, основная задача которых – разграничение прав доступа пользователей к функционалу системы.

Уровень 4 является пользовательским. На нем выполняется взаимодействие пользователей (студент, преподаватель, администрация, менеджер, гость) с системой через функциональные модули. Работа в системе на уровнях 3 и 4 осуществляется с помощью разработанного графического интерфейса.

Система имеет клиент-серверную архитектуру и состоит из двух частей.

- **Серверная часть.** Содержит основные системные функции, обеспечивающие работоспособность и взаимодействие компонентов системы друг с другом и хранилищем данных. В серверной части выделены три уровня:

– уровень доступа к данным, включающий описание правил и протоколов работы с хранилищем данных системы; с системой работают администраторы, технические специалисты и разработчики, взаимодействие с ней происходит посредством модификации и написания программного кода и запросов к хранилищу, а также обезличивания и извлечения метаданных общего характера из сырых данных;

– уровень бизнес-логики, включающий описание объектов системы, объектной модели, правила обработки информации; на данном уровне работают программисты-аналитики, исследователи, специалисты data science, UI/UX и frontend-разработчики, взаимодействие с системой происходит посредством написания программного кода и методов API;

– уровень авторизации и управления доступом, включающий данные и функции по администрированию прав доступа, контроль и предоставление доступа, обеспечение информационной безопасности по принципу разграничения доступа к данным.

- **Клиентская часть.** Это набор пользовательских интерфейсов, реализующих группу функциональных возможностей для обработки данных в модулях и управления ими.

Источники данных и хранилище

Ключевой элемент системы – информационное хранилище, спроектированное с учетом того, что данные о студентах распределены по различным источникам и в совокупности составляют цифровой след студента. Важно подчеркнуть, что данная интеллектуальная система ориентирована не только на анализ успеваемости, но и на определенную часть данных цифрового следа, которая исследована в меньшей степени. Это текстовые документы, продуцируемые самими студентами (отчеты по курсовым работам, практикам, выпускным квалификационным работам, научно-исследовательские работы), а также регламентирующие его образовательную траекторию (учебные планы, программы, стандарты). Кроме профессиональных стандартов, в системе анализируются тексты вакансий (www.hh.ru, www.superjob.ru).

Необходимые данные распределены по нескольким системам (см. таблицу).

Источники данных
Datasources

Источник	Выгружаемые данные
Образовательный портал на платформе Moodle	Лабораторные работы с исходным кодом программ студентов в формате XML
Информационная система управления вузом ModEUS	Данные об успеваемости студентов в виде файлов формата XLS. Данные о расписании и посещаемости
Корпоративная платформа Microsoft Teams	Тексты студенческих работ в виде документов DOC или файлов PDF
Образовательный портал eLearning.utmn.ru	Тексты практических работ студентов в виде файлов XML
Корпоративный портал «Вместе»	Портфолио студентов и списки достижений
Методический ресурс	Тексты *рабочих программ дисциплин* (РПД) в виде документов DOC или файлов PDF
Система 1С: Университет	Данные об успеваемости студентов в виде файлов формата XLS
Локальные хранилища институтов	Журналы и отчеты на кафедрах в виде файлов PDF или DOC

Информацию, полученную в образовательном процессе, фактически можно разделить на

два типа – неструктурированные и структурированные данные. Подробно проектирование мультислойного хранилища описано в статье [9]. Неструктурированные данные поступают из разрозненных источников, не имеют предопределенной модели данных и требуют предварительной обработки перед выполнением анализа. Например, к таким данным можно отнести тексты работ студентов, РПД, программный код и др. После загрузки из текстов извлекаются признаки, которые также сохраняются в хранилище и используются как исходные данные для последующего анализа и интерпретации в системе. Хранение неструктурированных данных реализовано в NoSQL-части хранилища на основе HBase.

Структурированные данные организованы в существующих системах и имеют определенную структуру, поэтому низка вероятность того, что они будут изменяться. Однако сложность их анализа заключается в сопоставлении информации, полученной из разных источников: параметры учебных планов и успеваемости студентов, метаданные работ студентов, РПД, опросы, лабораторные работы. Структурированные данные хранятся в реляционной части хранилища, реализованной с помощью PostgreSQL.

Авторизация и управление доступом

Авторизация пользователей в системе осуществляется через интерфейс главной страницы. Информация предоставляется пользователю в соответствии с установленными для него правами доступа (на создание, чтение, модификацию и удаление данных).

При проектировании и разработке функционала системы авторы ориентировались на широкий круг пользователей: студент, преподаватель, администрация (заведующий кафедрой, директор института), менеджер. Каждый из пользователей решает задачи управления образовательным процессом с учетом выданных ему прав доступа к информации. Например, студент имеет возможность просматривать информацию только о своем обучении в отличие от преподавателя, которому доступны сведения о разных студентах и группах обучающихся. Кроме этого, в системе предусмотрен специальный режим гостевого доступа (для абитуриента и работодателя) без регистрации в системе с возможностью просмотра агрегированной и обезличенной информации.

Функциональные модули

В системе реализованы модули для внутренних пользователей – студентов, преподавателей, а также внешних (гостевых) – абитуриентов и работодателей.

- Модуль анализа текста работы. Рассчитываются статистические характеристики и структурная сложность текста работы, происходит поиск вложений (изображений, таблиц, формул, приложений и др.) и проверяется корректность их оформления в соответствии с требованиями.
- Модуль анализа профессиональных компетенций. По текстам работ студентов определяются перечень используемых технологий и уровней владения ими, а также динамика развития студента как ИТ-специалиста.
- Модуль анализа требований рынка труда. Уровень профессиональной подготовки студента сопоставляется с актуальными требованиями работодателей, составляются рекомендации по повышению уровня знаний и подготовки студента [10].
- Модуль оценки качества программного кода. Рассчитываются метрики качества программного кода лабораторных работ студента. Определяются динамика уровня программирования и кластеризация по паттернам написания программного кода.
- Модуль подбора направления подготовки абитуриента. Составляются рекомендации абитуриенту по наиболее подходящему для него направлению подготовки по его предпочтениям в сфере ИТ.

На рисунке (см. http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-3/2022-3-dop/39.jpg) приведен интерфейс модуля анализа профессиональных компетенций студента. В модуле среди прочего отражена динамика приобретения компетенций студентом (по семестрам), была ли изучена технология самостоятельно или в рамках дисциплины, уровень владения технологией. Интерпретация и визуализация динамики получены в результате извлечения информации из корпуса текстов рабочих программ дисциплин, текстов работ студента и других дополнительных документов. Используемый подход к определению уровня владения профессиональными компетенциями отражен в статье [10].

Для реализации функциональных модулей были разработаны не менее важные системные сервисы, среди которых можно выделить сервисы конвертации файлов в форматы PDF,

DOC, TXT, извлечения метаданных файлов, сервис извлечения иерархической структуры текста, программного кода из текста, сервис поиска ключевых слов в тексте.

Рассмотрим работу внешних функциональных модулей и системных сервисов на примере загрузки текстов работ студентов (рис. 3).

Первым звеном является сервис импорта данных в хранилище, который вызывает системный сервис конвертации содержимого файла во внутренний формат TXT, необходимый для проведения дальнейшего анализа. Таким образом, на данном этапе формируется первый слой хранилища, содержащий сырые данные. Кроме того, из текста извлекаются метаданные, которые также сохраняются в реляционную компоненту хранилища.

После сервиса импорта отрабатывает и записывает результаты своей работы в хранилище сервис извлечения иерархической структуры текста, разделяющий целостный текст на взаимосвязанные части: содержание, главы, параграфы, пункты, фрагменты программного кода, приложения, список литературы. На данном этапе в хранилище появляется второй слой иерархии сохраняемых сервисами данных.

Благодаря установленной в рамках образовательного процесса структуре отчетов появляется возможность из необходимых частей текста (параграфов, приложения) извлекать используемые студентом в работе технологии, а также определять уровень владения ими. Список актуальных технологий и требуемых уровней владения ими в фоновом режиме обновляется из текстов вакансий работодателей. Извлеченные технологии и уровни сохраняются в третьем слое хранилища и отображаются в системе пользователю в интерфейсе модуля анализа профессиональных компетенций.

Аппаратно-программная часть

Для развертывания системы была предоставлена виртуальная машина (сервер) на платформе VMware со следующими характеристиками: 10 ядер Intel Xeon X5670 с частотой 2.93 GHz, 20 GB оперативной памяти, жесткий диск объмом 500 GB.

На сервере установлена система из семейства Linux – CentOS 7. Доступ к серверу выполняется с помощью ssh-подключения. Для управления контейнерами с приложениями используются Docker и Docker-compose, для обеспечения доступа разработчиков к инфраструктуре – OpenVPN и iptables.

Для развертывания системы на сервере применяются контейнеры. Контейнер – это единица ПО, которая упаковывает код и все его зависимости, поэтому приложение быстро и надежно перемещается из одной вычислительной среды в другую. Каждому контейнеру задан IP-адрес из одной подсети, что позволяет разработчикам получать доступ к контейнерам через vpn-сеть.

На данный момент система состоит из следующих взаимосвязанных элементов, каждый из которых является контейнером: PostgreSQL, Hadoop + HBase, Python backend, C# backend, Nginx + Vue.js frontend, Keycloak, Hue, Apache NiFi (рис. 4).

Для организации бесперебойной и надежной работы системы настроены режимы:

– ежедневное копирование всей размещенной в системе информации и логов опера-

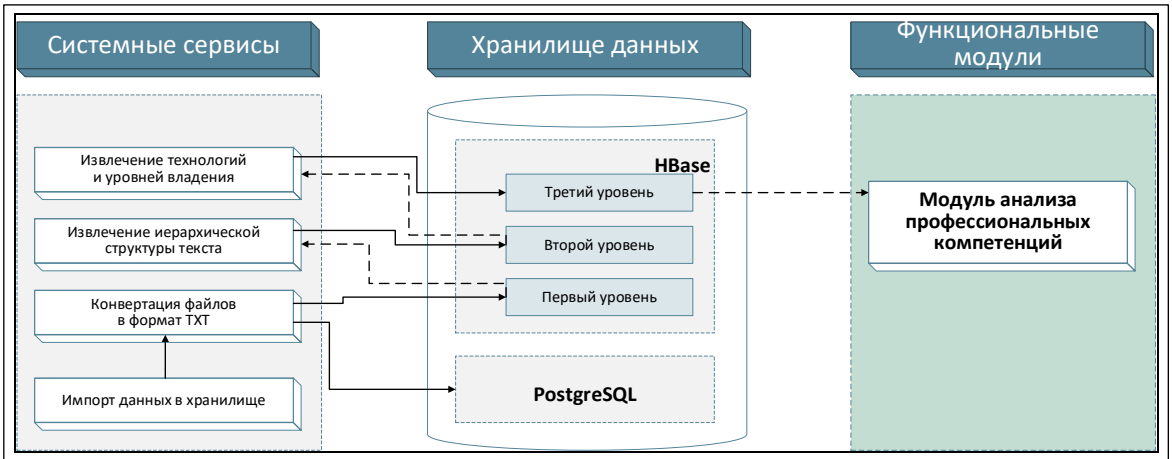


Рис. 3. Пример работы сервисов и модуля

Fig. 3. The example of an interaction between services and a module

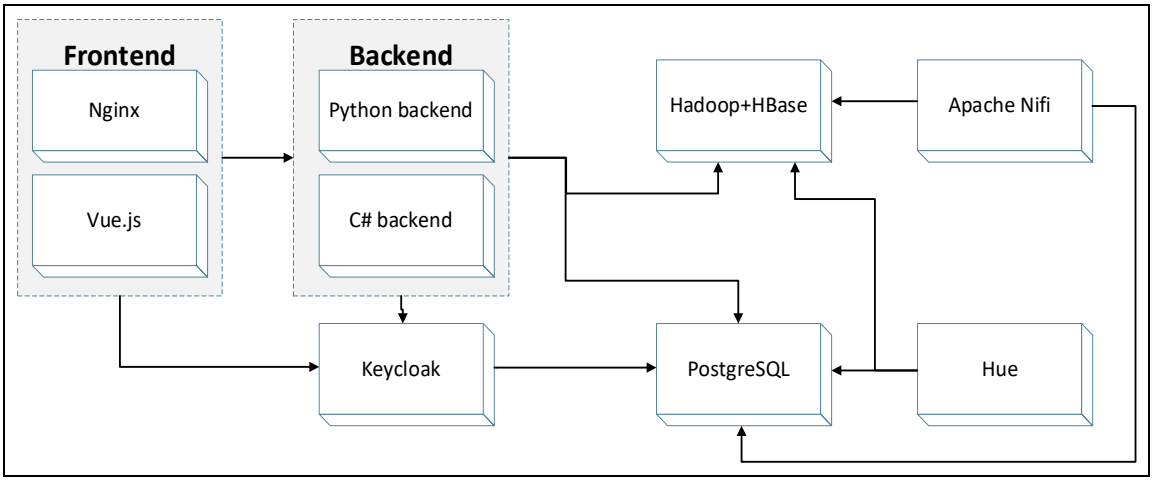


Рис. 4. Схема взаимодействия контейнеров

Fig. 4. A container interaction diagram

ций на резервный носитель, обеспечивающий возможность их восстановления;

– хранение резервной копии установочного пакета системы, а также актуальной версии конфигурационных файлов, обеспечивающих работоспособность системы.

Заключение

Разработанная система позволяет расширять возможности принятия решения в управлении образовательным процессом на всех уровнях (студент, преподаватель, администрация университета) за счет применения современных методов и технологий интеллектуального анализа данных к менее изученной части цифрового следа студента. Кроме того, открываются новые возможности для взаимодействия университета с работодателями и абитуриентами.

В настоящий момент проводится апробация реализованных в системе методов на данных студентов бакалавриата и специалитета ИТ-направлений Института математики и компьютерных наук Тюменского государственного университета. Так, для апробации подхода к диагностике профессиональной компетентности студентов были обработаны тексты рабочих программ дисциплин ИТ-направлений, 542 выпускные квалификационные работы и 879 текстов вакансий работодателей. Для проверки результативности подхода были также привлечены дополнительные данные – информация о фактическом трудоустройстве выпускников. В результате сопоставления реально занимаемых студентами позиций и диагностированного уровня подготовки был сделан вывод о результативности предложенного подхода. Результаты опубликованы в статье [10].

К особенностям предложенного решения можно отнести:

– оригинальность подхода к разработке архитектуры Big Data to Smart Data для создания распределенного мультислойного хранилища больших данных с учетом поэтапного преобразования данных цифрового следа;

– наличие трех уровней доступа (системный, прикладной, пользовательский), что позволяет обеспечить взаимодействие ИТ-специалистов и пользователей с системой с учетом их ролей и прав.

Постоянная работа системы осуществляется благодаря разработанным системным сервисам, реализующим обработку данных в соответствии с описанными ETL-процессами, а также интеграции с внешними источниками данных.

Подходы и методы, реализованные в информационной системе, могут быть масштабированы для анализа цифрового следа студентов других направлений, отличных от ИТ-области. Для этого необходимо проработать терминологические словари компетенций требуемых профессиональных областей, перечень требований к работам студентов и правил оформления и выполнения работ.

Разработка поддержана грантом РФФИ, проект № 19-37-51028.

Литература

1. Борисов В.В., Янукович С.П., Мрочек Т.В., Ореховский Д.С. Программный комплекс управления подготовкой IT-специалистов SkillsForYou // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 2. С. 177–185. DOI: 10.15827/0236-235X.130.177-185.
2. Борисов В.В., Янукович С.П., Захарченков К.В., Вайнилович Ю.В. Метод управления процессом обучения промышленному программированию на основе алгоритмов роевого интеллекта // Cloud of Science. 2020. Т. 7. № 1. С. 189–206.
3. Зеер Э.Ф., Церковникова Н.Г., Третьякова В.С. Цифровое поколение в контексте прогнозирования профессионального будущего // Образование и наука. 2021. Т. 23. № 6. С. 153–184. DOI: 10.17853/1994-5639-2021-6-153-184.
4. Ботов Д.С. Интеллектуальный анализ учебных курсов с учетом требований рынка труда // Интеллектуальные технологии обработки информации и управления: тр. Междунар. конф. 2014. С. 189–191.
5. Деев М.В., Гамидуллаева Л.А., Финогеев А.Г., Финогеев А.А. Разработка системы адаптивного управления компонентами интеллектуальной образовательной среды // Информатика и образование. 2021. № 4. С. 26–35. DOI: 10.32517/0234-0453-2021-36-4-26-35.
6. Зрелов П.В., Кореньков В.В., Кутовский Н.А. и др. Автоматизированная система мониторинга и анализа кадровых потребностей по номенклатуре специальностей вуза // Федерализм. 2016. № 4. С. 63–76.
7. Guo S., Zeng D., Dong S. Pedagogical data analysis via federated learning toward Education 4.0. American J. of Education and Information Technology, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 56–65.
8. Mjhool A.Y., Alhilali A.H., Al-augby S. A proposed architecture of big educational data using hadoop at the University of Kufa. IJECE, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 4970–4978. DOI: 10.11591/ijece.v9i6.pp4970-4978.
9. Vorobyova M., Zakharova I., Ivanenko O., Baklanov I., Vorobev A. An approach to building a multilayer data repository of the university learning process. In: Lecture Notes in Networks and Systems, 2022, pp. 66–76. DOI: 10.1007/978-3-030-89477-1_8.
10. Захарова И.Г., Боганюк Ю.В., Воробьева М.С., Павлова Е.А. Диагностика профессиональной компетентности студентов ИТ-направлений на основе данных цифрового следа // Информатика и образование. 2020. № 4. С. 4–11. DOI: 10.32517/0234-0453-2020-35-4-4-11.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.139.518-526

Received 13.04.22, Revised 27.07.22
2022, vol. 35, no. 3, pp. 518–526

Developing a system for managing student's professional development based on his digital footprint

Yu.V. Boganyuk [1], *Associate Professor, y.v.boganyuk@utmn.ru*
M.S. Vorobeva [1], *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, m.s.vorobeva@utmn.ru*
I.G. Zakharova [1], *Dr.Sc. (Education), Professor, i.g.zakharova@utmn.ru*

[1] *University of Tyumen, Tyumen, 625003, Russian Federation*

Abstract. Most existing information systems in universities lack the possibility to analyze a student's work in detail. Such analysis should include student's report texts, implemented projects and a program code that make up student digital footprint. The authors have developed an intelligent system that solves these problems. The system is represented by a set of modules for monitoring, managing and predicting the professional development of a student as an IT specialist using Big Data and Data mining technologies.

The development takes into account the features of the current process: for example, several information systems and file storages in the university, various roles of internal and external users, users' needs and problems that they face in the process of work and learning. One of the key elements of the system is a multi-level data storage, which consists of two components: a relational database and a NoSQL storage. The system is focused not only on the academic performance analysis, but also on text documents produced both by the students themselves and documents regulating their educational trajectory.

The developed system allows expanding the ability to make decisions in the educational process management at every level (student, teacher, university administration) through applying modern data mining methods and technologies to the less studied part of the student's digital footprint. In addition, the developed system

gives new opportunities for interaction between a university and employers and applicants. The system was tested using the data of students of the Institute of Mathematics and Computer Science of the Tyumen State University.

Keywords: training IT specialists, Big Data technologies, Data mining, NoSQL storages, natural language processing.

Acknowledgements. *The system has been developed within the framework of the RFBR grant, project no. 19-37-51028.*

References

1. Borisov V.V., Yanukovich S.P., Mrochek T.V., Orekhovsky D.S. Software complex SkillsForYou for the IT specialists training management. *Software & Systems*, 2020, vol. 33, no. 2, pp. 177–185. DOI: 10.15827/0236-235X.130.177-185 (in Russ.).
2. Borisov V.V., Yanukovich S.P., Zakharchenkov K.V., Vaynilovich Yu.V. A method for managing the process of teaching industrial programming based on swarm intelligence algorithms. *Cloud of Science*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 189–206 (in Russ.).
3. Zeer E.F., Tserkovnikova N.G., Tretyakova V.S. Digital generation in the context of predicting the professional future. *The Education and Science J*., 2021, vol. 23, no. 6, pp. 153–184. DOI: 10.17853/1994-5639-2021-6-153-184 (in Russ.).
4. Botov D.S. Intelligent analysis of training courses taking into account market requirements. *Proc. ITIPM*, 2014, pp. 189–191 (in Russ.).
5. Deev M.V., Gamidullaeva L.A., Finogeev A.G., Finogeev A.A. Development of a system for adaptive control of the components of an intelligent educational environment. *Informatics and Education*, 2021, no. 4, pp. 26–35. DOI: 10.32517/0234-0453-2021-36-4-26-35 (in Russ.).
6. Zrelov P.V., Korenkov V.V., Kutovsky N.A. et al. Automated system for monitoring and analysis of compliance of the labour resources needs according the specialties' nomenclature of higher educational institution. *Federalism*, 2016, no. 4, pp. 63–76 (in Russ.).
7. Guo S., Zeng D., Dong S. Pedagogical data analysis via federated learning toward Education 4.0. *American J. of Education and Information Technology*, 2020, vol. 4, no. 2, pp. 56–65.
8. Mjhool A.Y., Alhilali A.H., Al-augby S. A proposed architecture of big educational data using hadoop at the University of Kufa. *IJECE*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 4970–4978. DOI: 10.11591/ijece.v9i6.pp4970-4978.
9. Vorobyova M., Zakharova I., Ivanenko O., Baklanov I., Vorobev A. An approach to building a multilayer data repository of the university learning process. In: *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, pp. 66–76. DOI: 10.1007/978-3-030-89477-1_8.
10. Zakharova I.G., Boganyuk Yu.V., Vorobyova M.S., Pavlova E.A. Diagnostics of professional competence of IT students based on digital footprint data. *Informatics and Education*, 2020, no. 4, pp. 4–11. DOI: 10.32517/0234-0453-2020-35-4-4-11 (in Russ.).

Для цитирования

Боганюк Ю.В., Воробьева М.С., Захарова И.Г. Разработка системы для управления профессиональным развитием студента на основе его цифрового следа // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 3. С. 518–526. DOI: 10.15827/0236-235X.139.518-526.

For citation

Boganyuk Yu.V., Vorobeva M.S., Zakharova I.G. Developing a system for managing student's professional development based on his digital footprint. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 3, pp. 518–526 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.139.518-526.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Аглямов Ф.Р., Кугураков В.С. Тренажер для реабилитации пациентов с проблемами мобильности руки, построенный с использованием технологий виртуальной реальности 285
Бикбулатов Т.Х., Тумаков Д.Н. Использование частичной параллелизации для триангуляции двумерных областей 293
Гиниятова Д.Х., Маркина А.Г. Решение задачи дифракции электромагнитной волны на экранах произвольной формы с использованием технологии CUDA 305
Кетов И.В., Октябрьская А.О., Спиридонов А.О., Карчевский Е.М. Истинные и фиктивные собственные значения системы граничных интегральных уравнений Мюллера 316
Козар Б.А., Кугуракова В.В., Сахибгареева Г.Ф. Структуризация сущностей естественного текста с использованием нейронных сетей для генерации трехмерных сцен 329
Конюхов В.М., Храмченков М.Г., Конюхов И.В. Фильтрационная модель и параллельные вычисления характеристик кровотока в системе кровообращения при наличии закупоривающего кольцевого тромба 340
Кугуракова В.В., Хафизов М.Р., Кадыров С.А., Зыков Е.Ю. Удаленное управление роботизированным устройством с использованием технологий виртуальной реальности 348
Латыпова Д.С., Тумаков Д.Н. Применение технологии CUDA для обучения нейронной сети Кохонена 362
Шараева Р.А., Кугуракова В.В., Селезнева Н.Э. Методика упрощения таск-трекинга в проектах игровой индустрии 374
Пальчевский Е.В., Антонов В.В., Еникеев Р.Р. Прогнозирование на основе искусственной нейронной сети второго поколения для поддержки принятия решений в особо значимых ситуациях 384
Нгуен Тхань Вьет, Кравец А.Г. Прогнозирование технологических тенденций на основе анализа разнородных данных 396
Щукарев И.А., Маркова Е.В. Разработка генератора паролей с использованием GUI MATLAB 413
Власова С.А., Каленов Н.Е. Автоматизированная система анализа ключевых терминов 420
Рыбаков А.А., Фрейлехман С.А. Автоматическое детектирование аудиодефектов с применением параллельных вычислений 428
Калабин А.Л., Морозов А.К. Метод испытания радиолокационных станций с использованием беспилотного летательного аппарата и бортового оборудования 438
Мешков В.В., Филатова Н.Н., Федосов Ю.А. Компьютерное моделирование для интеллектуальной оценки динамического взаимодействия твердых тел 444
Коробейников А.Г. Применение искусственных нейронных сетей в системах автоматического управления магнитной левитацией 452
Мешалкин В.П., Бутусов О.Б., Кантюков Р.Р., Чистякова Т.Б. Контрольно-пиксельно-кластерный алгоритм оценки воздействия химических загрязнений на лесные массивы по спутниковым фотоизображениям 458
Кириллов Н.Д., Кольцова Э.М. Разработка информационной системы в области композитных материалов с применением современных средств 466
Глушков И.В., Чистякова Т.Б., Аверина Ю.М. Программный комплекс моделирования реактора гидрохлорирования кремния 472
Фураев Д.Н., Чистякова Т.Б. Компьютерная система для разработки цифровых информационных моделей процессов вторичной переработки нефти 482
Шелест М.Н., Татарникова Т.М. Оценка граничных значений среднего времени отклика на запрос пользователя информационной системы 488
Провоторов Н.В., Таратонов И.Н., Филиппович Ю.Н. Метод межсегментной оценки выделения паттернов движения из кинематических траекторий, регистрируемых средствами экзоскелетной системы 493
Орехов В.А., Бобков В.И., Панченко С.В. Разработка информационной системы расчета, накопления информации и паспортизации теплофизических свойств фосфоритов 502
Курашкин С.О., Рогова Д.В., Тынченко В.С., Шуткина Е.В. Разработка программного обеспечения для математического моделирования распределения температуры в процессе электронно-лучевой сварки 509
Боганюк Ю.В., Воробьева М.С., Захарова И.Г. Разработка системы для управления профессиональным развитием студента на основе его цифрового следа 518

C O N T E N T

Aglyamov F.R., Kugurakov V.S. A rehabilitation simulator for patients with hand mobility problems using virtual reality technologies 285

Bikbulatov T.Kh., Tumakov D.N. Using partial parallelization to triangulate 2D domains 293

Giniyatova D.Kh., Markina A.G. Solving the problem of electromagnetic wave diffraction on arbitrary shape screens using CUDA....305

Ketov I.V., Oktyabrskaya A.O., Spiridonov A.O., Karchevskii E.M. True and fictitious eigenvalues of the set of Muller boundary integral equations 316

Kozar B.A., Kugurakova V.V., Sakhibgareeva G.F. Structuring natural text entities using neural networks for generating 3D-scenes 329

Konyukhov V.M., Khramchenkov M.G., Konyukhov I.V. A filtration model and parallel computing of the blood flow characteristics in the circulatory system in case of an occluding circular clot....340

Kugurakova V.V., Khafizov M.R., Kadyrov S.A., Zykov E.Yu. Remote control of a robotic device using virtual reality 348

Latypova D.S., Tumakov D.N. Applying CUDA technology for training the Kohonen neural network 362

Sharaeva R.A., Kugurakova V.V., Selezneva N.E. A method for simplifying task tracking in video game development projects....374

Palchevsky E.V., Antonov V.V., Enikeev R.R. Forecasting based on the second generation artificial neural network for decision support in especially significant situations 384

Nguyen Thanh Viet, Kravets A.G. Forecasting technological trends based on the heterogeneous data analysis 396

Shchukarev I.A., Markova E.V. Developing a password generator using GUI MATLAB....413

Vlasova S.A., Kalenov N.E. An automated system for key terms analysis 420

Rybakov A.A., Freylekhman S.A. Automatic detection of audio defects using parallel computing 428

Kalabin A.L., Morozov A.K. A method for testing radar stations using an unmanned aerial vehicle and airborne equipment 438

Meshkov V.V., Filatova N.N., Fedosov Yu.A. Computer modeling for intelligent evaluation of dynamic interaction of solids 444

Korobeynikov A.G. Applying artificial neural networks in automatic control systems for magnetic levitation 452

Meshalkin V.P., Butusov O.B., Kantyukov R.R., Chistyakova T.B. A control pixel clustering algorithm for assessing the chemical pollution impact on forest tracts from satellite photographic images 458

Kirillov N.D., Koltsova E.M. Developing an information system in the field of composite materials using modern tools....466

Glushkov I.V., Chistyakova T.B., Averina Yu.M. A software package for simulating a silicon hydrochlorination reactor....472

Furaev D.N., Chistyakova T.B. A computer system for developing digital information models of oil recycling processes....482

Shelest M.N., Tatarnikova T.M. Boundary values evaluation for average response time to an information system user request....488

Provotorov N.V., Taratonov I.N., Philippovich Yu.N. The method of intersegment estimation of the motion patterns from kinematic trajectories registered by exoskeleton system tools 493

Orekhov V.A., Bobkov V.I., Panchenko S.V. Information system for calculation, information accumulation and certification of phosphorite thermophysical properties 502

Kurashkin S.O., Rogova D.V., Tynchenko V.S., Shutkina E.V. Developing software for mathematical modeling of temperature distribution in the process of electron beam welding 509

Boganyuk Yu.V., Vorobeva M.S., Zakharova I.G. Developing a system for managing student's professional development based on his digital footprint 518

Вниманию подписчиков

Международный журнал
«Программные продукты и системы»
распространяется по подписке
в странах СНГ и за их пределами.
В Каталоге подписных изданий
Агентства «Роспечать» индекс журнала
70799

Телефон (482-2) 39-91-49
Факс (482-2) 39-91-00

www.swsys.ru
red@cps.tver.ru