ISSN 2712-9942

# VCTEXIII KIMBEPHETIMKIM

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2023 T. 4 № 1

# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

# Успехи кибернетики

# Russian Journal of Cybernetics

**Tom 4** 

**№** 1

Vol. 4

No. 1

Москва

2023

#### Учредитель и издатель

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

«Успехи кибернетики» — это рецензируемый научный журнал, в котором публикуются научные статьи по следующим специальностям (физико-математические, технические науки):

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств;
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации.

Миссия журнала — развитие научных направлений по заявленной тематике в России и за рубежом, соответствующих приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, а также перечню критических технологий РФ.

Журнал ориентирован на пропаганду передовых идей в области физики, математики, технических наук, участие в реализации задач, сформулированных Президентом РФ в Указе от 01.12.2016 № 642, по научнотехнологическому развитию РФ, а также импортозамещению по приоритетным направлениям стратегического развития страны, соответствующим тематике журнала, обеспечение печатными площадями высококвалифицированных кадров, повышение качества диссертационных исследований в данных отраслях путем развития механизма профессионального и общественного обсуждения их научных результатов, воспитание молодого поколения ученых.

Журнал принимает к публикации оригинальные статьи; переводы статей, опубликованных в зарубежных журналах (при согласии правообладателя на перевод и публикацию); обзоры; эссе; комментарии; другие информационные материалы.

Издание будет полезно ученым, работающим в соответствующих областях наук, а также аспирантам и студентам.

#### Главный редактор

*Бетелин Владимир Борисович*, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва Заместитель главного редактора

Заместитель главного редактора

Галкин Валерий Алексеевич, д. ф.-м. н., профессор, директор, Сургугский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут

Члены редакционной коллетии

Власов Сергей Евгеньевич, д. т. н., директор, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Панченко Владислав Яковлевич, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, председатель Совета, Российский фонд фундаментальных исследований; заведующий кафедрой медицинской филики, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Савин Геннадий Иванович, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН — филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

Сойфер Виктор Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, главный научный соттупник научный соттупни Сойфер Виктор Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем научных исследований, Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С. П. Королева, Институт систем обработки изображений РАН, Самара

*Чубариков Владимир Николаевич*, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой математических и компьютерных методов анализа.

Чуоариков Влаоимир Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заведующии кафедрои математических и компьютерных методов анализа, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва Чаплыгин Юрий Александрович, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, Московский институт электронной техники, Москва Петров Игорь Борисович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой информатики, Московский физико-технический институт, Москва Смирнов Николаевич, д. ф.-м. н., профессор, заместитель декана механико-математического факультета, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

заместитель директора по стратегическим информационным технологиям, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва Тишкин Владимир Федорович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры вычислительных методов,

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Губайдуллин Амир Анварович, д. ф. м. н., профессор, директор, Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН, Тюмень

Якобовский Михаил Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. Москва

Шагалиев Рашит Мирзагалиевич, д. ф.-м. н.

Старков Сергей Олегович, д. ф.-м. н., профессор, начальник отделения интеллектуальных кибернетических систем, Обнинский институт атомной энергетики, Обнинск Еськов Валерий Матвеевич, д. ф.-м. н., д. б. н., профессор, заведующий отделом, Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут Паврентьев Михаил Михайлович, д. ф.-м. н., профессор, заведующий одслов, сур у текли филма У эти Птистити, сур у Паврентьев Михаил Михайлович, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск Ильш Валерий Павлович, д. ф.-м., профессор, важульшан выседой высмет высметраний государственный технический университет, Новосибирск Крыжановский Борис Владимирович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., руководитель, Центр оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва Нагорнов Олег Викторович, д. ф.-м. н., профессор, первый проректор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва Савченко Владимир Васильевич, РhD (Theoretical Mechanics), Университет Хосэй, Токио, Япония

Земпо Ясунари, PhD (Physics), Университет Хосэй, Токио, Япония
Пападопулос Атанас, Doctorat d'Etat (Habilitation), mathematics, Университет Страсбурга, Национальный центр научных исследований Франции, Страсбург, Франция

#### Ответственный секретарь

Гавриленко Тарас Владимирович, к. т. н. Ответственный редактор Чалова Анна Петровна, к. филол. н. Технический редактор Моргун Дмитрий Алексеевич, к. ф.-м. н., доцент **Переводчик** Троицкий Дмитрий Игоревич, к. т. н., доцент

Художественное оформление обложки © Горбунов Александр Сергеевич

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77-78857 от 04.08.2020. Решением Высшей аттестационной комиссии с 27 июня 2022 года журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Издается с 2020 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции: ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1. Телефон: +7 9226-54-57-88, факс: +7 (495) 719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Сайт: jcyb.ru.

#### Founder and Publisher

Federal State Institution

Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences (SRISA)

Russian Journal of Cybernetics is peer-reviewed.

The journal publishes papers on physics, mathematics, and engineering. The key areas of interest are:

- simulation, numerical methods, and simulation software
- electronic components for micro- and nanoelectronics, and quantum devices
- system analysis, control, and information processing.

Our mission is advancing these research areas in Russia and globally, supporting the national priority fields of research and development, and the critical technologies.

The Journal promotes advanced concepts in physics, mathematics, engineering, and facilitates the national research and technology development under the Russian President Decree No. 642 dated 01.12.2016, and phasing out strategic imports. We offer an opportunity for professional researchers to publish. We improve the doctorate research quality through public peer review and educate the new generation of researchers.

The Journal accepts original papers; translations of papers from international journals (consent of the right holders for the translation and publication is required); reviews; essays; remarks, and event reports.

The Journal is intended for researchers, university, and doctorate students.

#### Chief Editor

Prof. Vladimir B. Betelin, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Academic Director, SRISA, Moscov Vice Chief Editor

Prof. Valery A. Galkin. Doctor of Science (Phys&Math), Director, SRISA, Surgut Branch, Surgut

#### Editorial Board

Prof. Sergey E. Vlasov, Doctor of Science (Engineering), Director, SRISA, Moscow
Prof. Vladislav Ya. Panchenko, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairman of the Council, Russian Foundation for Basic Research, Chairperson of the Department of Medical Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscov

Prof. Gennady I. Savin, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math),

Academic Director, Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences, SRISA subdivision, Moscow Prof. Viktor A. Soifer, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, Chief Researcher Lab for Automated Research Systems, Korolev Samara National Research University, Academic Director, Institute of Image Processing Systems, RAS, Samara

Prof. Vladimir N. Chubarikov, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Mathematical and Computer Analysis Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow Prof. Yuri A. Chaplygin, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, National Research University of Electronic Technology, Moscow Prof. Igor B. Petrov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Informatics,

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow

Prof. Nikolay N. Smirnov, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Dean, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Deputy Director for Strategic Information Technology, SRISA, Moscow

Prof. Vladimir F. Tishkin, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Computational Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow

Prof. Amir A. Gubaidullin, Doctor of Science (Phys&Math), Director, Tyumen Division, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, RAS Siberian Branch, Tyumen Prof. Mikhail V. Iakobovski, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow Prof. Rashit M. Shagaliyev, Doctor of Science (Phys&Math)

Prof. Sergey O. Starkov, Doctor of Science (Phys&Math), Head, Division of Intelligent Cybernetic Systems, Obninsk Institute of Atomic Energy, Obninsk Prof. Valery M. Eskov, Doctor of Science (Phys&Math), Doctor of Science (Biology), Head of Division, SRISA, Surgut Branch, Surgut Prof. Mikhail M. Lavrentiev, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Institute of Automation and Electrometry, RAS Siberian Branch, Novosibirsk Prof. Sergey G. Pyatkov, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Further Mathematics, Yugra State University, Khanty-Mansiysk Prof. Valerii P. Ilyin, Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk Prof. Boris V. Kryzhanovskii, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Director, Opto-neural Technologies Center, Scientific Research

Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences (SRISA), Moscow
Prof. Oleg V. Nagornov, Doctor of Science (Phys&Math), First Vice-Rector, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow Prof. Vladimir V. Savchenko, PhD (Theoretical Mechanics), Hosei University, Tokyo, Japan Prof. Yasunari Zempo, PhD (Physics), Hosei University, Tokyo, Japan

Prof. Athanase Papadopoulos, Doctorat d'Etat (Habilitation), Mathematics, University of Strasbourg, French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France

#### **Executive Editor**

Taras V. Gavrilenko, Ph.D. (Engineering)

Managing Editor Anna P. Chalova, Ph.D. (Linguistics)

Technical Editor Dmitry A. Morgun, Ph.D. (Phys&Math), Assoc. Prof. Translator Dmitry I. Troitsky, Ph.D. (Engineering), Assoc. Prof. Cover Design

(C) Alexander S. Gorbunov

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Mass media registrated with the Feedback of Supervision of Communications, information rectinities of Mass media.

Mass media registration certificate EL No. FS 77-78857 dated on 04.08.2020.

On June 27, 2022 the National Board for Academic Degrees and Titles put the Russian Journal of Cybernetics on the list of leading journals for publishing papers by doctorate students.

Published since 2020. 4 issues per year.

Editorial Board Address: SRISA, Russia 117218, Moscow, Nakhimovsky pr., 36/1. Tel.: +7(922)654-5788, fax: +7(495)719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Web: jcyb.ru.

# СОДЕРЖАНИЕ

/0 лет Петрову Игорю Борисовичу	6
Н. В. Замятин, Г. В. Смирнов, В. И. Маковкин	
Методика ситуационного управления резервуарным парком	7
Д. В. Горбунов, Т. В. Гавриленко	
Математическое моделирование динамических процессов организма человека на основе диффе-	
ренциальных уравнений с разрывной правой частью	15
М. И. Зимин	
Математическое и программное обеспечение для анализа тренда температуры при проведении	
инфракрасной термографии	21
В. С. Петракова, О. И. Криворотько	
Несколько подходов к моделированию динамики доходов населения в условиях эпидемии	24
Ш. И. Мутаиров, К. И. Бушмелева	
Алгоритмы обработки и вычисления сходства текстовых данных пользователей социальных се-	
тей	33
М. С. Дьяченко, А. Г. Леонов	
Архитектура учебной системы с индивидуализацией обучения на основе накопленных данных	
результатов автоматизированной проверки заданий	39
Д. А. Абраменко, К. И. Бушмелева	
Проектирование модуля «Конструктор документов» для информационной системы	
«О, $\Phi$ ранчайзинг»	49
А. А. Чеповский	
О неявных сообществах на графе взаимодействующих объектов	56
А. Ю. Кухарева, В. В. Еськов, Н. Ф. Газя	
Гипотеза Эверетта и квантовая теория сознания	65
М. В. Романовский, А. И. Солдатов	
Спектральная обработка акустических сигналов в системах физической защиты магистральных	
τηνδοπηοροποι	72

# **CONTENTS**

70th Anniversary of Prof. Igor Petrov	6
N. V. Zamyatin, G. V. Smirnov, V. I. Makovkin	
Tank Farm Situational Management	7
D. V. Gorbunov, T. V. Gavrilenko	
Simulation of Dynamic Processes in the Human Body using Differential Equations with Discontinuous	
Right-Hand Side	15
M. I. Zimin	
Mathematical Model and Software for Analysing Infrared Thermography Temperature Trends	21
V. S. Petrakova, O. I. Krivorotko	
Approaches to the Simulation of Personal Income Variations During Epidemics	24
Sh. I. Mutairov, K. I. Bushmeleva	
Tools for Social Media User-Generated Content Similarity Assessment	33
M. S. Dyachenko, A. G. Leonov	
Adaptive learning System Architecture with Academic Performance Tracking	39
D. A. Abramenko, K. I. Bushmeleva	
Development of the Document Designer Module for the O, Franchising Franchise Management System	49
A. A. Chepovskiy	
Implicit Communities Defined on the Graph for Interacting Objects	56
A. Yu. Kukhareva, V. V. Eskov, N. F. Gazya	
H. Everett Hypothesis and Quantum Theory of Consciousness	65
M. V. Romanovskiy, A. I. Soldatov	
Spectral Processing of Acoustic Signals for Pipeline Security Systems	72



# 70 лет Петрову Игорю Борисовичу

8 февраля 2023 года исполнилось 70 лет доктору физико-математических наук, заведующему кафедрой информатики МФТИ, заведующему базовой кафедрой информатики факультета управления и прикладной математики, профессору, члену-корреспонденту РАН Игорю Борисовичу Петрову.

Игорь Борисович известен своими работами в области прикладной математики, численного моделирования, информатики, компьютерных методов обучения. Его основные научные результаты:

- разработан сеточно-характеристический метод и гибридные сеточно-характеристические схемы для численного решения многомерных динамических задач механики деформируемых твердых тел с различными реологическими свойствами в широком диапазоне давлений и температур на регулярных подвижных и нерегулярных расчетных сетках;
- реализован гибридный характеристический метод гладких частиц для численного решения задач противометеоритной защиты и астероидной опасности;
- получены численные решения задач о высокоскоростном взаимодействии деформируемых тел, о воздействии пучков заряженных частиц, лазерного и рентгеновского излучения на композитные и металлические пластины; о напряженном состоянии электродов рельсотрона; о динамическом деформировании и разрушении оболочек ядерных реакторов и перфорированных конструкций (например, высотных сооружений) под воздействием интенсивных нагрузок (задачи противодействия террористическим актам);
- получены численные решения широкого класса задач биомеханики с медицинскими приложениями;
- изучены процессы распространения волн и получена конфигурация волновых фронтов в средах многослойной структуры, а также в гетерогенных сплошных средах (задачи сейсморазведки в геофизике).

Вопросы, которые изучает Игорь Борисович и возглавляемый им коллектив, всегда имеют большую социальную значимость: медицинские приложения, исследование воздействий природных катастроф на наземные сооружения и т.п.

Активная научная и педагогическая деятельность, членство в редколлегиях журналов — например, в «Успехах кибернетики», другая организационная, научная и образовательная деятельность — все это достойно всяческого уважения и признания!

Развитие образования, науки и инноваций — залог успешного решения задач, поставленных Президентом в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Редакционная коллегия желает Игорю Борисовичу доброго здоровья, удачи во всех начинаниях и больших творческих успехов!

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-01

## МЕТОДИКА СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЗЕРВУАРНЫМ ПАРКОМ

# **Н. В.** Замятин $^a$ , Г. В. Смирнов $^\delta$ , В. И. Маковкин $^a$

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация

<sup>a</sup> La zamnv47(a)gmail.com, <sup>6</sup> smirnov(a)main.tusur.ru, <sup>6</sup> assorti2030(a)yandex.ru

Аннотация: добыча сырья и его переработка в готовую продукцию связаны с использованием резервуарных парков. С ростом резервуарного парка возрастают проблемы, обусловленные количественным учетом хранимых веществ и продуктов их переработки, Решение этих проблем невозможно осуществить без разработки эффективных систем управления.

Предложен подход к построению системы ситуационного управления резервуарным парком, позволяющий повысить эффективность функционирования технологических процессов за счет своевременного принятия управленческих решений по устранению нештатных ситуаций. Приведен пример перехода от нештатных ситуаций к штатным с использованием нечеткой ситуационной сети и правил перехода.

*Ключевые слова*: резервуарный парк, ситуационное управление, технологический процесс, нечеткая логика, функции принадлежности.

*Для цитирования*: Замятин Н. В., Смирнов Г. В., Маковкин В. И. Методика ситуационного управления резервуарным парком. *Успехи кибернетики*. 2023;4(1):7–14. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-01.

Поступила в редакцию: 15.01.2023. В окончательном варианте: 21.03.2023.

#### TANK FARM SITUATIONAL MANAGEMENT

## N. V. Zamyatin<sup>a</sup>, G. V. Smirnov<sup>b</sup>, V. I. Makovkin<sup>c</sup>

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation <sup>a</sup> zamnv47@gmail.com, <sup>b</sup> smirnov@main.tusur.ru, <sup>c</sup> assorti2030@yandex.ru

Abstract: the extraction and processing of raw materials requires the use of tank farms (TF). As the tank farm grows, there are issues with product metering, and an efficient management system is required.

We proposed an approach to the development of a tank farm situational management system. The system increases the process efficiency with its prompt management decisions to rectify any emergencies. The paper contains an example of restoring the normal operation with an fuzzy situational network and transition rules.

Keywords: tank farm, situational management, process, fuzzy logic, membership functions.

Cite this article: Zamyatin N. V., Smirnov G. V., Makovkin V. I. Tank Farm Situational Management. Russian Journal of Cybernetics. 2023;4(1):7–14. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-01.

Original article submitted: 15.01.2023. Revision submitted: 21.03.2023.

Резервуарные парки (РП) относятся к инженерным сооружениям в системе хранения и транспортировки веществ и продуктов переработки. Для их хранения современные перерабатывающие предприятия оснащены резервуарами различных конструкций. Выбор резервуаров зависит от видов сырья и продуктов переработки и отличается по назначению и физико-химическим свойствам хранимых веществ и продуктов переработки. Размер РП определяется объемами хранения каждого вида вещества в соответствии с установленной цикличностью первичной и последующей переработок [1, 2, 3].

Предприятия с РП оснащены соответствующим технологическим оборудованием, в том числе и резервуарами различных геометрических форм, предназначенных для хранения различных продуктов и веществ (цемент, зерно, химические продукты, бензин, мазут, дизельное топливо и т.п.). С ростом резервуарного парка все большее значение придают количественному учету хранимых веществ и продуктов переработки, проблемам контроля, качества сырья в процессе хранения, а также внедрению технических средств, сокращающих потери, возникающих по эксплуатационным и аварийным причинам [4].

Современные технологии обслуживания такого технологического оборудования, как резервуарный парк, предусматривают два различных подхода к организации этого процесса: обслуживание по регламенту и обслуживание по состоянию. На большинстве РП в настоящее время используется обслуживание по регламенту.

Обслуживание технологического оборудования по состоянию предполагает проведение профилактических или ремонтных мероприятий по фактическому состоянию этого оборудования в текущий момент времени, определяемому в результате периодического или непрерывного контроля его технических параметров [8].

Поскольку резервуарный парк может состоять из множества резервуаров, находящихся на большом расстоянии друг от друга, диспетчеру, управляющему резервуарным парком, бывает сложно быстро и четко реагировать на те или иные ситуации, возникающие в технологическом процессе работы резервуарного парка. Поэтому риски, связанные с принятием решений в области управления резервуарным парком, высоки, а последствия неверных решений могут стоить больших средств.

Цель данного исследования — разработка и построение прототипа нечеткой ситуационной сети для помощи диспетчеру в управлении резервуарном парком. Данная ситуационная сеть ускорит принятие решений диспетчером и повысит качество управления резервуарным парком, минимизировав при этом риск принятия ошибочных решений.

В резервуарном парке существует множество ситуаций, определяющих технологический процесс. Принципы ситуационного управления основаны на выборе нужных управленческих решений из набора допустимых управляющих воздействий, определяемых сложившейся ситуацией. Выбор управляющих воздействий сводится к оценке состояния объекта и среды, отнесению соответствующей текущей ситуации к одному из типовых классов и выбору такого управляющего воздействия, которое обеспечит переход из текущей нештатной ситуации в целевую, т.е. штатную. Поэтому ситуационное управление включает описание и понимание ситуации, ее анализ, классификацию и дальнейшее преобразование [6]. Основной проблемой ситуационного управления является понимание ситуации, которая требует обработки большого количества разнородной информации. Понимание ситуации обеспечивает слияние разнородной информации об окружающей обстановке и дает возможность быстрого принятия решения [7].

В работе Поспелова Д. А. по теории ситуационного управления [7] предлагается различать текущую и полную ситуации. Исходя из предложенных Поспеловым Д. А. принципов ситуационного управления, необходимо рассматривать текущую ситуацию как совокупность всех сведений о структуре объекта управления и его функционировании в данный момент времени. Полной ситуацией называется совокупность, состоящая из текущей ситуации, знаний о технологии управления (возможных управляющих воздействиях) и состоянии системы управления в данный момент [7].

Технологические процессы в РП протекают в определенных диапазонах текущих параметров, выход за которые означает появление нештатной (аварийной) ситуации, связанной с нарушением технологического процесса.

Системы ситуационного управления должны иметь механизм принятия управленческих решений в условиях частичной или полной неопределенности. Однако большинство этих систем не содержат решения задач управления с целью обеспечения эффективности и безопасности ситуаций в резервуарном парке, поэтому возникает необходимость создания таких систем. Трудности идентификации возникающих технологических и аварийных ситуаций связаны со сложностью резервуарного парка как объекта управления и условий его функционирования. Все это делает невозможным применение для описания технологических и аварийных ситуаций в резервуарном парке теории управления, основанной на аппарате математических уравнений. Решение данной проблемы для резервуарных парков может быть получено на основе ситуационного управления [9] и построении логико-лингвистических моделей, обеспечивающих высокую степень адекватности описания ситуаций, возникающих в РП.

Для ситуационного управления нужен язык, который должен формировать лексику, требующуюся для описания ситуаций, возникающих в технологическом процессе РП. В качестве основных компонентов языка должны выступать понятия, имена, отношения. Далее необходимы действия по преобразованию ситуаций и процедуры управления этим действиями [5].

Для реализации ситуационного управления нужно описать ситуации, которые существуют в резервуарном парке, определить класс ситуаций, к которым они относятся, и сформировать управляющие

действия для конкретных классов ситуаций. Возможные ситуации для резервуарного парка представлены на рис. 1. В основе описания ситуации лежит представление о ней в мышлении и действиях человека. Одной из особенностей этого представления является его структурированность, т.е. представление ситуации в виде совокупности объектов, имеющих определенные имена, между которыми установлены отношения.

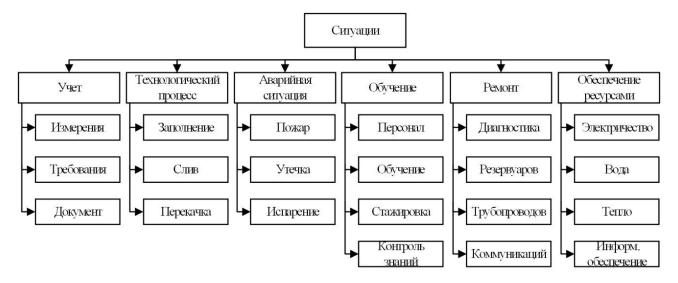


Рис. 1. Классы основных ситуаций резервуарного парка

Система ситуационного управления резервуарным парком представлена на рис. 2. Система датчиков регистрирует параметры резервуаров парка и передает их на вход системы.

Задача следующего модуля — преобразовать данные, выделить признаки описания ситуации и затем передать их на вход анализатора, который определяет необходимость вмешательства управляющего воздействия в систему и идентифицирует класс ситуации.

В ситуации могут одновременно присутствовать несколько классов, или ситуация принадлежит нескольким классам, в этом случае нужен классификатор, позволяющий вычислять приоритеты классов по определенным критериям.

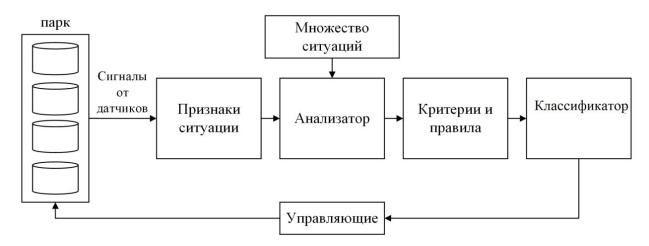


Рис. 2. Система ситуационного управления резервуарным парком

Классификатор на основе нейронной сети выбирает определенную модель ситуации (СМ), и если несколько моделей претендуют на текущую, то возникает нечеткость, которая определяется степенью нечеткости (функциями принадлежности).

Блок формирования управляющих воздействий (БФУВ) формирует управляющее воздействия, основываясь на классе и модели конкретной ситуации. БФУВ содержит конечное множество необходимых управляющих воздействий и логики, вычисляющие управляющие воздействия для каждого из

классов ситуаций. Таким образом, на выходе работы системы ситуационного управления формируется либо управляющее воздействие, направленное на выполнение действий и устранение нештатных ситуаций, либо выдаются советы и рекомендации диспетчеру РП.

В качестве меры близости для распознавания ситуации, в которой находится РП как объект управления, используется степень включения входной ситуации S0 в каждую из типовых нечетких ситуаций Si. В работе использована нечеткая ситуационная модель типа «ситуация — стратегия управления — действие» (С-СУ-Д), потому что такие модели менее критичны к качеству экспертной информации. При таком подходе предполагается хранение только набора типовых ситуаций и степеней предпочтения соответствующих управляющих решений, которые можно представить в виде нечеткой ситуационной сети (НСС).

Такой сложный объект, как резервуарный парк, обладает множеством независимых входных и выходных параметров, характеризующих состояние системы неоднозначным образом. Поэтому построение нечеткой модели требует большого количества продукционных правил, число которых экспоненциально возрастает с увеличением входов модели, что снижает качество нечеткого логического вывода. В этом случае целесообразно оперировать не конкретными параметрами системы, а классами ее состояний, что приводит к уменьшению объема базы знаний и повышению точности управления ситуацией. Поэтому управление таким сложным объектом, как резервуарный парк, должно осуществляться не по его параметрам, а по состояниям [10, 11].

Количество возможных управляющих воздействий зависит от числа кластеров, выявленных в процессе кластеризации, и определяется технологическим процессом РП. В соответствии с определенными управляющими воздействиями выделяется и набор признаков описания состояния объекта, значения которых необходимо учитывать при принятии решений. Для качественной классификации состояния желательно иметь оценку всех признаков, влияющих на выбор управляющего воздействия [12].

Каждый выделенный на первом этапе признак и управляющее воздействие представляются лингвистическими переменными. Функции принадлежности термов, являющихся значениями лингвистических переменных, формируются на основании опроса эксперта, оценивающего, насколько соответствует каждая точка предметной шкалы лингвистической переменной тому или иному терму.

Разработанный алгоритм нечеткого ситуационного управления содержит модуль кластеризации и модуль нечеткого ситуационного управления, формирующий вывод управляющих воздействий по нечеткой ситуационной сети в зависимости от изменения входной ситуации. В основе модуля классификации лежат процедуры нечеткого вывода по алгоритму нечетких средних. Результатом работы модуля является нечеткое покрытие пространства состояний объекта нечеткими классами типовых ситуаций (кластерами). Основными этапами модуля ситуационного вывода являются:

- сравнение текущей ситуации с набором эталонных ситуаций;
- расчет степени сходства на основе значения нечеткого включения;
- определение требуемой ситуации для определенной стратегии управления;
- расчет процедуры управления по нечеткой ситуационной сети.

Модули используют лингвистические переменные, правила вывода, целевые ситуации или стратегии управления из базы нечетких знаний.

Резервуарный парк может находиться в одном из множества возможных состояний (S). Каждое состояние Si может быть штатным и нештатным (аварийным). Также имеется набор управляющих действий R для перехода из одного состояния в следующее. Из состояний S и управляющих действий R построен ориентированный граф нечеткой ситуационной сети, где S — вершины графа, R — дуги. При этом каждому действию соответствует функция принадлежности, значения которой лежат в промежутке [0;1], определяющие приоритет управляющего воздействия.

Управляющее решение с большим значением функции принадлежности будет выбрано системой с большей вероятностью.

Методика ситуационного моделирования:

- 1. Определить, в каком из состояний, описанных в графе возможных ситуационных состояний, находится система в конкретный момент.
  - 2. Определить штатность текущего состояния.
  - 3. Если текущее состояние не является штатным, то найти по графу выход из текущего состояния

до штатного.

4. Предоставить пользователю список управляющих действий для перевода системы из нештатного состояния в штатное.

Для прототипа нечеткой ситуационной сети (НСС) был разработан граф нескольких возможных ситуаций с набором управляющих решений (рис. 3).

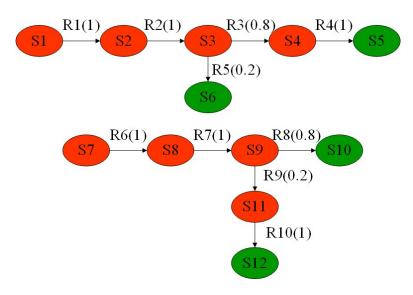


Рис. 3. Граф состояний для НСС резервуарного парка

Для описания состояний резервуарного парка использовались следующие параметры:

- 1. Объем вещества в резервуаре (минимальный, средний, максимальный).
- 2. Скорость заполнения резервуара (низкая, средняя, высокая).
- 3. Степень востребованности вещества (низкая, высокая).
- 4. Состояние подачи вещества (вкл., выкл.).

Штатные ситуации помечены зеленым цветом, нештатные — красным.

Условия функционирования:

- 1. Штатные состояния. Объем максимальный или средний. Скорость высокая или низкая. Востребованность высокая. Состояние подачи вещества выкл.
  - 2. Нештатные состояния. Остальные.

Подробное описание ситуаций приведено в табл. 1.

Подробное описание управляющих действий приведено в табл. 2.

В качестве примера для определения объема вещества в резервуаре приведена зависимость треугольной функции принадлежности, изображенной на рис. 4. Единицы измерения объема — тыс. кубометров; единицы измерения скорости заполнения резервуара — тыс. кубометров в час.

Разработанный программный продукт состоит из следующих модулей (рис. 5):

- 1. Модуль сбора данных.
- 2. Нечеткий логический модуль.
- 3. Модуль функций принадлежности.
- 4. Модуль вывода данных.

Вектор входных данных подается на вход. Его принимает модуль сбора данных, который представлен в виде веб-интерфейса. Полученные данные передаются в нечеткий логический модуль, в котором с использованием функций принадлежности вычисляется состояние системы (с наибольшей степенью уверенности). После этого осуществляется поиск полученного состояния по графу возможных состояний. Если состояние найдено, определяется его штатность. В случае, если текущее состояние системы определено как нештатное, алгоритм ищет путь до штатного состояния, сохраняя шаги управляющего воздействия. В модуль выходных данных подается текущее состояние системы, штатность состояния и список управляющих воздействий для перевода системы в штатное состояние, если текущее состояние оказалось нештатным.

Таблица 1

## Описание возможных ситуаций резервуарного парка

ID Ситуации	Объем	Скорость	Степень	Состояние	Штатность
			востребован-	подачи	ситуации
			ности	вещества	
S1	Низкий	Высокая	Высокая	Выкл.	Нештатная
S2	Средний	Высокая	Высокая	Вкл.	Нештатная
S3	Средний	Высокая	Высокая	Вкл.	Нештатная
S4	Максимальный	Высокая	Высокая	Вкл.	Нештатная
S5	Максимальный	Низкая	Высокая	Выкл.	Штатная
S6	Средний	Высокая	Высокая	Выкл.	Штатная
S7	Минимальный	Низкая	Низкая	Выкл.	Нештатная
S8	Минимальный	Низкая	Низкая	Вкл.	Нештатная
S9	Средний	Низкая	Низкая	Вкл.	Нештатная
S10	Средний	Низкая	Низкая	Вкл.	Штатная
S11	Максимальный	Низкая	Низкая	Вкл.	Нештатная
S12	Максимальный	Высокая	Низкая	Выкл.	Штатная

## Таблица 2 Описание управляющих действий резервуарного парка

ID управляющего	Описание
воздействия	
R1	Включить подачу вещества
R2	Измерить объем, оставить подачу включенной
R3	Измерить объем, оставить подачу включенной
R4	Выключить подачу вещества
R5	Выключить подачу вещества
R6	Включить подачу вещества
R7	Измерить объем, оставить подачу включенной
R8	Выключить подачу вещества
R9	Измерить объем, оставить подачу включенной
R10	Выключить подачу вещества

Модуль выходных данных также представлен в виде веб-интерфейса. Схема алгоритма нечеткого логического модуля приведена на рис. 6.

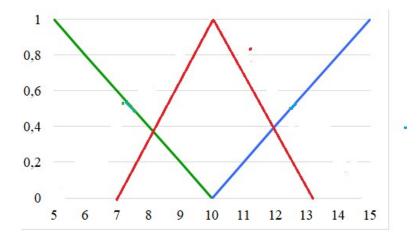
#### Пример работы НСС

Пусть на вход системы поданы следующие параметры:

- 1. Объем вещества в резервуаре 7 тыс. кубометров (минимум, доля уверенности 0.6).
- 2. Скорость заполнения резервуара 14 тыс. кубометров в час (максимум, доля уверенности 0.8).
- 3. Степень востребованности вещества 800 тыс. кубометров в месяц (высокая доля уверенности 0.6).
  - 4. Подача вещества в резервуар выключена.

Исходя из этих данных можно сделать вывод, что система находится в состоянии S1, которое является нештатным. Чтобы перевести систему из нештатного в штатное состояние, подобрана следующая цепочка управляющих воздействий:

- 1. R1 включить подачу вещества.
- 2. R2 измерить объем, оставить подачу включенной.
- 3. R3 измерить объем, оставить подачу включенной.
- 4. R4 выключить подачу вещества.



**Рис. 4.** График функции принадлежности для лингвистической переменной «Объем вещества в резервуаре»



Рис. 5. Структура программной системы

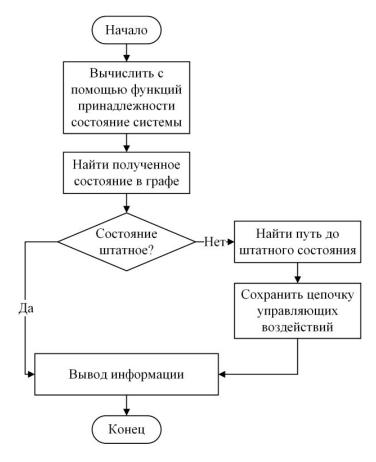


Рис. 6. Структурная схема алгоритма нечеткого модуля

После совершения этих действий система переходит в состояние S5, которое является штатным.

#### Заключение

На основе процедуры построения нечетких сетей создан прототип нечеткой ситуационной сети для управления резервуарным парком. Программный интерфейс предоставляет возможность ввода параметров сети, программный модуль определяет состояние резервуарного парка, оценивает благоприятность ситуации и предоставляет оператору список управляющих воздействий для перевода системы из нештатного состояния в штатное. Данный подход позволит автоматизировать управление резервуарными парками и снизить риски, связанные с ошибочными решениями, принимаемыми оператором.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Маковкин В. И., Замятин Н. В. Система мониторинга и обработки информации о состоянии резервуарного парка. Электронные средства и системы управления: матер. 11-й Междунар. научнопрактической конф. Томск. 2015;2:95–100.
- 2. Маковкин В. И., Замятин Н. В. Автоматизированная система мониторинга резервуарного парка. *Доклады ТУСУР*. 2010;19(4):93–97.
- 3. Смирнов Г. В., Замятин Н. В. Пат. 2 636 794 РФ, МПК G 01 F 23/292 (2006.01). Способ контроля параметров сыпучих или жидких материалов в резервуарах. № 2 016 117 229; заявл 29.04.2016; опубл. 28.11.2017.
- 4. Маковкин В. И., Замятин Н. А., Смирнов Г. В. Обеззараживание и использование антропогенных отходов в ресурсосберегающих строительных технологиях. *Известия Томского политехнического университета*. *Инжиниринг георесурсов*. 2018;9:164–174.
- 5. Барышникова Е. С., Иващенко В. А. Система ситуационного управления производством листового стекла. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009;2(1):91–96.
- 6. Кригер Л. С. Нечеткая ситуационная сеть для управления движением общественного транспорта. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013;1:90–96.
- 7. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: Теория и практика. Москва: Наука; 1986. 288 с.
- 8. Воронина О. А., Лобанова В. А. Информационное представление системы управления множеством нечетких ситуаций. *Известия ОрелГТУ. Серия: Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: информационные системы и технологии.* 2007;4:48–50.
- 9. Васильев Е. М., Головачев А. И. Выбор оптимальных параметров лингвистических экспертных систем. Электротехнические комплексы и системы управления. 2006;2:57–59.
- 10. Шопин А. В., Бучацкий П. Ю. Особенности нечеткого управления сложными техническими системами. *Труды докторантов, аспирантов и соискателей*. Ч. 1. Майкоп, 2000. С. 19-24.
- 11. Разин В. В., Тузовский А. Ф. Анализ ситуаций с применением семантических технологий. *Доклады ТУСУР*. 2010;22(2). Ч. 2. С. 238–240.
- 12. Matheus C. J., Kokar M. M., Baclawski K., Letkowsky J. J. An Application of Semantic Web Technologies to Situation Awareness. *Lecture Notes in Computer Science*. 2005;3729:944–958.

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-02

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С РАЗРЫВНОЙ ПРАВОЙ ЧАСТЬЮ

Д. В. Горбунов<sup>1,a</sup>, Т. В. Гавриленко<sup>1,2, $\delta$ </sup>

1 Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация 2 Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация а ☐ Gorbunov.dv@mail.ru, 6 taras.gavrilenko@gmail.com

Аннотация: в работе рассматривается задача математического моделирования функциональных систем организма человека в рамках исследований динамики изменения параметров подсистем с хаотической, самоорганизующейся структурой. Данная задача является актуальной ввиду необходимости изучения взаимодействия подсистем сложной системы организма человека, в том числе поиска причин возникновения патологических процессов. Разработанные методы математического моделирования на основе дифференциальных уравнений с разрывной правой частью позволяют учитывать процесс самоорганизации динамических подсистем. Задача удержания стационарного состояния базируется на приближении решений к уникальной линии разрыва системы, что позволяет эффективно воспроизводить динамику подсистемы организма человека. В свою очередь, линия разрыва генерируется в процессе моделирования и корректируется в зависимости от текущего состояния подсистемы и стационарного состояния, что существенно приближает к динамике реальной живой системы. Также в работе представлены результаты применения метода математического моделирования на примере работы биомеханической системы человека (частный случай). Апробация показала высокую адекватность метода математического моделирования и эффективность численного решения на основе сравнительного анализа результатов моделирования и данных натурных экспериментов. Результаты расчетов динамики движений биомеханической системы показали устойчивость на серии вычислительных экспериментов.

*Ключевые слова*: математическое моделирование, биомеханическая система, самоорганизация, хаотическая динамика.

Для цитирования: Горбунов Д. В., Гавриленко Т. В. Математическое моделирование динамических процессов организма человека на основе дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Успехи кибернетики. 2023;4(1):15–20. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-02.

Поступила в редакцию: 02.02.2023.

В окончательном варианте: 22.02.2023.

# SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES IN THE HUMAN BODY USING DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH DISCONTINUOUS RIGHT-HAND SIDE

D. V. Gorbunov<sup>1,a</sup>, T. V. Gavrilenko<sup>1,2,b</sup>

<sup>1</sup> Surgut State University, Surgut, Russian Federation

<sup>2</sup> Surgut Branch of Federal State Institute "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Surgut, Russian Federation

<sup>a</sup> Gorbunov.dv@mail.ru, <sup>b</sup> taras.gavrilenko@gmail.com

Abstract: this study considers the simulation of the human body's functional systems as part of the research into the parameter variation dynamics in subsystems with a chaotic, self-organizing structure. The problem is significant as we need to study the interaction between the subsystems of a complex system, the human body, and find the causes of pathologies. The proposed simulation method uses differential equations with a discontinuous right-hand side. It enables us to account for self-organization in dynamic subsystems. The stationary state is maintained as the solution approaches a unique discontinuity line in the system, as it correctly reproduces the dynamics of a subsystem in the human body. The discontinuity line is generated during the simulation and adjusted to match the current state of the subsystem and the stationary state, which is a much better representation of the dynamics of a real living system. The paper includes the simulation

results of a human biomechanical system (a special case). The tests proved the simulation results are in good agreement with the experiments. The biomechanical system motion simulation results show stability in a series of computational experiments.

Keywords: simulation, biomechanical system, self-organization, chaotic dynamics.

Cite this article: Gorbunov D. V., Gavrilenko T. V. Simulation of Dynamic Processes in the Human Body using Differential Equations with Discontinuous Right-Hand Side. Russian Journal of Cybernetics. 2023;4(1):15–20. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-02.

Original article submitted: 02.02.2023.

Revision submitted: 22.02.2023.

#### Введение

Ввиду того, что были установлены некоторые особенности работы функциональных систем организма человека [1–3], открывается возможность применения теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [4] для осуществления моделирования изменения тех или иных параметров. Решение подобных уравнений может быть определено с помощью предельного перехода с учетом физического смысла рассматриваемой задачи [5–8]. Известно, что динамика параметров функциональных систем организма человека ведет себя непредсказуемо с позиций математической статистики. Можно полагать, что эта хаотическая динамика связана с разрывной правой частью по x, по аналогии с поиском решений дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Для понимания решения подобных уравнений необходимо рассмотреть их связь с дифференциальным включением.

# Основные положения метода математического моделирования из теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью

Для начала необходимо установить связь математического моделирования функциональных систем организма человека с теорией дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Для этого рассмотрим уравнение или систему уравнений в векторной форме:

$$\frac{dx}{dt} = f(x,t). (1)$$

Здесь функция f является кусочно непрерывной в области G;  $x \in R^n$ . В этом случае большинство определений решения можно получить следующим образом: каждой точке (t,x) области G соответствует множество F(t,x) в n-мерном пространстве; если в конкретной точке (t,x) функция f(t,x) непрерывна, то F(t,x) содержит одну точку, эквивалентную функции f в этой точке; если точка (t,x) является точкой разрыва функции f(t,x), то F(t,x) должно задаваться тем или иным способом. Соответственно, решение уравнения (1) называется решением дифференциального включения и имеет вид:

$$\frac{dx}{dt} = F(x,t). (2)$$

Таким образом, абсолютно непрерывная функция x(t) определена на интервале или отрезке l, для которого почти всюду на l  $dx(t)/dt \in F(t,x(t))$ .

Неоспоримый интерес вызывают способы доопределения F(t,x) в точках разрыва функции f, при которых дифференциальное включение (2) применимо для приближенного описания процессов в реальных физических системах. Приближение должно осуществляться в достаточно малой  $\delta$ -окрестности множества точек разрыва функции f, тогда систему можно описать с помощью уравнений или системы (1).

А. Ф. Филиппов отмечал, что для построения множества F(t,x) необходимо обладать некоторыми сведениями о поведении физической системы в  $\delta$ -окрестности. Соответственно, для того чтобы осуществить переход к математическому описанию с помощью дифференциального включения (2) физической системы, необходимо продемонстрировать, что при достаточно малых  $\delta$  движение физической системы сколь угодно близко к некоторому решению (2).

Способ простейшего доопределения правой части применим к системе с малым запаздыванием. В этой связи стоит обратить внимание на процесс самоорганизации биосистем. По сути, задача удержания некоторых внутренних градиентов  $\nabla b$  (температура тела, тремор, теппинг, положение стоя или сидя) является процессом с запаздыванием. Проявления запаздывания заключаются в следующем:

если  $\nabla b$  отклоняется на  $x>\delta$ , то включается механизм регуляции для того, чтобы вернуть этот  $\nabla b$  в условно исходное положение. На примере из биомеханики в этом контексте положение конечности в пространстве можно рассматривать как нахождение системы в некоторой  $\nabla$ -окрестности, и при приближении к границе  $\nabla$  или выходе за пределы  $\nabla$  биосистема прилагает некоторые действия, чтобы вернуть биосистему в эту  $\nabla$ -окрестность. Какие именно действия предпринимает система, заранее неизвестно по аналогии с поиском решения дифференциального уравнения с разрывной правой частью, когда неизвестно, как продолжится решение при нахождении на линиях или плоскостях  $S_i$  разрыва. Наиболее подходящий подход к решению дифференциальных уравнений с разрывной правой частью для биосистем — это простейшее выпуклое доопределение.

#### Математическое моделирование функциональных систем организма человека

Изучение теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью позволило сформировать формализованный математический аппарат описания динамики поведения любых функциональных систем организма (ФСО) человека. Таким образом, на основе вышеизложенного, механизм регуляции  $\nabla b$  ФСО человека внутри некоторой  $\delta$ -окрестности представлен системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x, u_1(t, x), ..., u_r(t, x)), \tag{3}$$

где  $u_i(t,x)$  — независимые части биологической системы, которые могут независимо пробегать множества  $U_i(t,x)$ . Также необходимо наложить следующее ограничение: пусть физическая система вне  $\delta$ -окрестности  $M^{\delta}$  некоторого множества M, на которой функции уравнений (3) разрывны, x(t) должна удовлетворять уравнению (3), а в самой окрестности при почти всех t должно выполняться неравенство:

$$\left| \frac{dx(t)}{dt} - f(t, q(t)) \right| \le \delta, \tag{4}$$

где q(t) – любая функция из  $M^{\delta}$ , которая находится на расстоянии, не большем  $\delta$ , от областей непрерывности  $G_i, G_j, G_k, \dots$  Движение системы может осуществляться по любому из законов (в зависимости от ФСО и известных сведений о процессах в этой ФСО):

$$\frac{dx}{dt} = f_i(t, x, u_1(t, x), ..., u_r(t, x)) 
\frac{dx}{dt} = f_g(t, x, u_1(t, x), ..., u_r(t, x)) 
\frac{dx}{dt} = f_k(t, x, u_1(t, x), ..., u_r(t, x))$$
(5)

В случае математического описания процессов работы ФСО человека необходимо учесть и тот факт, что некоторые параметры  $u_1(t,x),...,u_r(t,x)$  в процессе самоорганизации удержания  $\nabla b$  в определенной  $\delta$ -окрестности могут независимо пробегать соответственные множества  $U_1(t,x),...,U_r(t,x)$ . Тогда пусть:

$$F_1(t,x) = f(t,x, U_1(t,x), ..., U_r(t,x))$$
(6)

является множеством значений функции  $f(t,x,u_1(t,x),...,u_r(t,x))$ , когда t и x постоянны. Решением дифференциального уравнения (3) называются решения дифференциального включения  $dx/dt \in F(t,x)$ , где  $F(t,x) \equiv F_1(t,x)$ . Таким образом, система дифференциальных уравнений (3) способна описать динамику удержания внутренних градиентов  $\nabla b$  внутри некоторой  $\delta$ -окрестности, которая представляет собой некоторое стационарное состояние. Соответственно, уравнение (3) является формализованным математическим аппаратом описания динамики поведения тех или иных параметров ФСО человека по некоторым известным процессам в реальных биосистемах.

#### Математическое моделирование на примере биомеханической системы человека

На основании вышеизложенного математическая модель динамики движений биомеханической системы человека имеет вид:

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x, u_1^{br}(t, x), u_2^{br}(t, x), u_1^{fbr}(t, x, Q^+(t, x)), u_2^{fbr}(t, x, Q^-(t, x)), u_{tr}(t, x, Qq(t, x)), 
u_{1,o}^+(x, t, m_{1,o}^+(t, x), t_{se}^+(t, x)), u_{2,w}^+(x, t, m_{2,w}^+(t, x), t_{ak}^+(t, x)), u_{3,s}^+(x, t, m_{3,s}^+(t, x), t_{lj}^+(t, x)), 
u_{1,o}^-(x, t, m_{1,o}^-(t, x), t_{se}^-(t, x)), u_{2,w}^-(x, t, m_{2,w}^-(t, x), t_{ak}^-(t, x)), u_{3,s}^-(x, t, m_{3,s}^-(t, x), t_{lj}^-(t, x))), (7)$$

где o, w, s — количество мышечных волокон определенного типа,  $u_1^{br}(t,x), u_2^{br}(t,x)$  осуществляют установку верхней и нижней границы, являются непрерывными и пробегают множества  $U_1^{br}(t,x), U_2^{br}(t,x)$ . Особое внимание необходимо обратить на функции  $u_1^{fbr}(t,x,Q^+(t,x)), u_2^{fbr}(t,x,Q^-(t,x))$ , отвечающие за формирование коридора, в котором генерируется линия разрыва (траектория движения), при ее пересечении происходит переключение работы мышечных пучков. Эти функции являются разрывными и пробегают соответствующие множества  $U_1^{fbr}(t,x,QQ^B), U_2^{fbr}(t,x,QQ^H)$ . Соответственно, формирование траектории линии разрыва для воспроизведения динамики произвольных и непроизвольных движений осуществляется на основе функции  $u_{tr}(t,x,Qq(t,x)),$  где Qq(t,x) пробегает множество  $QQq(QQ^H,QQ^B)$ , а решение  $u_{tr}$  пробегает множество  $U_{tr}(t,x,Qqq)$ . Далее необходимо детально рассмотреть реализации работы мышечных волокон в системе дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Таким образом,  $u_{1,o}^+(x,t,m_{1,o}^+(t,x),t_{se}^+(x,t))$  осуществляет контроль работы мышечных волокон одного типа (всего в модели присутствуют 3 типа мышечных волокон, как и в мышечных пучках). Функция  $t_{se}^+(x,t)$  отвечает за величину потенциала мышечных волокон и пробегает множество  $T_{se}^+(x_{se},y_{se})$ , а решение для функции  $m_{1,o}^+(t,x)$  записывается в виде  $U_{1,o}^+(x,t,M_{1,o}^+,t_{se}^+)$ .

Решением системы дифференциальных уравнений (7) называется дифференциальное включение:

$$F_{1}(t,x) = f(t,x, U_{1}^{br}, U_{2}^{br}, U_{1}^{fbr}, U_{2}^{fbr}, U_{tr}(t,x,QQq), U_{1,o}^{+}(t,x,M_{1,o}^{+}, T_{se}^{+}),$$

$$U_{2,w}^{+}(t,x,M_{2,w}^{+}, T_{ak}^{+}), U_{3,s}^{+}(t,x,M_{3,s}^{+}, T_{lj}^{+}), U_{1,o}^{-}(t,x,M_{1,o}^{-}, T_{se}^{-}),$$

$$U_{2,w}^{-}(t,x,M_{2,w}^{-}, T_{ak}^{-}), U_{3,s}^{-}(t,x,M_{3,s}^{-}, T_{lj}^{-})).$$
 (8)

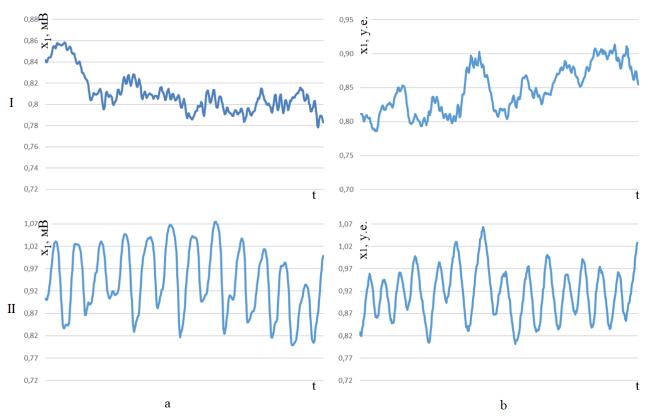
Стоит отметить, что механизм генерации уровня удержания позиции для произвольных и непроизвольных движений существенно отличается тем, что при моделировании произвольных движений необходимы дополнительные условия движения траектории уровня удержания позиции. Такой подход обусловлен тем, что несмотря на то, что произвольные движения управляются сознанием человека, в динамике поведения параметров теппинграм все равно наблюдается проявление особого хаоса. На основе полученных определенного рода закономерностей в области изучения произвольных движений [1–3] был разработан математический аппарат [9], который позволяет, с одной стороны, задавать однозначную траекторию движения, а с другой стороны — вносить хаос в эту траекторию.

Согласно представленной математической модели был разработан алгоритм для моделирования непроизвольных движений. Алгоритм для моделирования произвольных движений существенно отличается только частью генерации траектории движения. Для генерации случайных чисел был выбран алгоритм вихрь Мерсенна [10].

Результатами работы математической модели являются выборки, полученные в режиме реального времени. Пример временной развертки реальной выборки треморограммы представлен на рис. I-а, модельной выборки — на рис. I-b. Также на рис. II-а представлена временная развертка экспериментальной теппинграммы и на рис. II-b — временная развертка модельной теппинграммы.

#### Сравнительный анализ результатов моделирования с данными натурных экспериментов

При изучении экспериментальных данных использовался метод расчета энтропии Шеннона в рамках термодинамики неравновесных систем И.Р. Пригожина [11]. В соответствии с этим для модельных данных также производился расчет параметров энтропии Шеннона. Результат расчета энтропии H представлен в таблице.



**Рис.** Временная развертка непроизвольных (I) и произвольных (II) движений: a — экспериментальные выборки; b — модельные выборки

Таблица Значения энтропии Шеннона для экспериментальных  $H_e$  и модельных  $H_m$  выборок треморограмм при разном числе разбиений выборок на интервалы

	1	0	2	0	5	0	20	00	10	00
	$H_{e}^{10}$	$H_{m}^{10}$	$H_{e}^{20}$	$H_{m}^{20}$	$H_{e}^{50}$	$H_{m}^{50}$	$H_e^{200}$	$H_m^{200}$	$H_e^{1000}$	$H_m^{1000}$
1	2,8868	2,9867	3,8132	3,9421	5,0835	5,2182	6,7646	6,9832	6,9410	7,3952
2	3,0425	2,8654	4,0229	3,7949	5,2693	5,0467	6,9018	6,8075	7,0208	7,1888
3	2,7321	3,2107	3,6568	4,1708	4,9041	5,4271	6,5162	7,1913	7,3772	6,8097
4	3,1180	3,2027	4,0734	4,1849	5,3210	5,4442	7,0323	7,2072	6,6563	7,0716
5	3,0751	2,7724	4,0426	3,7140	5,2916	4,9792	6,9251	6,7476	6,3147	7,1573
6	2,8706	3,1459	3,8130	4,1123	5,0185	5,3983	6,7000	7,0733	7,3688	6,8923
7	3,1597	3,0152	4,0983	3,8843	5,3572	5,1557	6,9394	6,8843	7,3281	7,3960
8	3,0608	3,1524	4,0461	4,0814	5,2965	5,3559	6,9176	7,0952	6,6264	7,4352
9	2,5216	3,1680	3,4760	4,1472	4,7719	5,4255	6,4352	7,1716	6,4265	6,5857
10	2,5127	3,0031	3,4578	3,9522	4,6856	5,2281	6,3482	7,0220	6,7985	6,5579
11	2,9041	3,2195	3,8640	4,1887	5,1332	5,4458	6,7729	7,2263	7,3891	7,3033
12	3,0576	3,1672	4,0245	4,1473	5,2415	5,4324	6,8006	7,1967	6,5725	7,2281
13	3,1181	3,0361	4,0772	4,0088	5,3118	5,2759	6,8111	6,9864	6,5124	6,8183
14	3,0862	3,0361	4,0530	4,0184	5,3160	5,2843	6,8096	7,0245	7,3857	6,8024
15	2,9503	3,1397	3,8866	4,0735	5,1524	5,3143	6,7208	7,0601	6,6119	7,1486
< E >	2,9397	3,0747	3,8937	4,0280	5,1436	5,2955	6,7597	7,0451	6,8887	7,0527
	ypoi	вень	ypoi	вень	ypoi	вень	уровень		уровень	
		мости	значи	мости		мости	значимости			мости
	$p_1 =$	0,09	$p_2 =$	0,13	$p_3 =$	0,09	$p_4 =$	0,01	$p_5 =$	0,23

Исследование энтропии Шеннона на стадии расчета самого значения H не закончено. Был выполнен дополнительный анализ с использованием математической статистики. В качестве статистического анализа производилось парное сравнение реальных выборок треморограмм, полученных от испытуемых, и модельных выборок симуляционной модели. При таком сравнении было установлено, что динамика энтропии статистически не имеет различий. Уровень значимости в подавляющем большинстве (более 95 %) пар (реальная выборка — модельная выборка) больше p=0.05, что дает основания сделать вывод о том, что такая пара принадлежит некоторой одной генеральной совокупности. Такая динамика поведения энтропии H подтверждает высокий уровень адекватности симуляционной модели. Подобная динамика поведения значений энтропии Шеннона H наблюдается и для модельных теппинграмм.

#### Заключение

Реализованный метод математического моделирования позволяет более эффективно воспроизводить реальную динамику движений биомеханической системы организма человека. Объективная оценка результатов на основе математической статистики и на основе термодинамике неравновесных систем продемонстрировала высокую адекватность модельных данных при сравнении экспериментальных и модельных выборок как треморограмм, так и теппинграмм. Результаты математического моделирования, как и реальные выборки, подчиняются доказанной гипотезе Н.А. Бернштейна «повторение без повторений». Следует отметить, что если жестко зафиксировать начальные параметры модели  $x_0$  (что в живых системах невозможно), крайне маловероятно повторение некоторого промежуточного состояния  $x_n$  моделируемого процесса и тем более — конечного состояния  $x_k$ . Разработанная математическая модель может быть применена в исследовании патологических процессов, т.е. моделировании и нахождении закономерности в динамике движений биомеханической системы при различных внешних воздействиях, отслеживании проявлений некоторых генерализаций, которые могут привести к развитию патологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Еськов В. М., Еськов В. В., Гавриленко Т. В. и др. Формализация эффекта «повторение без повторения» Н.А. Бернштейна. *Биофизика*. 2017;62(1):168–176.
- 2. Берестин Д. К. Изменение квазиаттракторов треморограмм испытуемых в условиях гипотермии. *Сложность. Разум. Постнеклассика.* 2018;4:76–84.
- 3. Бетелин В. Б., Еськов В. М., Галкин В. А. и др. Стохастическая неустойчивость в динамике поведения сложных гомеостатических систем. Доклады Академии наук. 2017;472(6):642–644. DOI: 10.7868/S0869565217060044.
- 4. Филиппов А. Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. *Матем. сб.* 1960;51(1):99-128.
- 5. Бетелин В. Б., Галкин В. А. Математические и вычислительные проблемы, связанные с образованием структур в сложных системах. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2022;14(4):805–815.
- 6. Галкин В. А., Дубовик А. О. *Интеграл Лебега. сходимость численных методов решения систем дифференциальных уравнений.* Сургут: Сургутский государственный университет; 2021.
- 7. Галкин В. А., Дубовик А. О. *Теория меры. Сходимость численных методов решения законов сохранения*. Сургут: Сургутский государственный университет; 2021.
- 8. Галкин В. А. О неподвижных точках периодических непрерывных отображений на плоскости  $R^2$  и сфере  $S^2$ . Успехи кибернетики. 2022;3(2):8–10.
- 9. Горбунов Д. В. Симуляционное моделирование непроизвольных движений человека. *Вестник КРА-УНЦ. Физико-математические науки.* 2019;29(4):67–76. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-67-76.
- 10. Nishimura T. Tables of 64-bit Mersenne Twisters. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS). 2000;10(4):234–357.
- 11. Prigogine I. R. *The End of Certainty, Time, Chaos and the New Laws of Nature*. The Free Press: New York; 1997.

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-03

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ТРЕНДА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

#### **М.** И. Зимин<sup>а</sup>

2554620 ONTARIO LTD., г. Торонто, Канада <sup>a</sup> 🖾 zimin7@yandex.ru

Аннотация: описаны математическое и программное обеспечение для анализа тренда температуры при проведении инфракрасной термографии. Используется метод структурной минимизации риска. Приводятся примеры расчёта.

*Ключевые слова*: математическое и программное обеспечение, тренд, температура, инфракрасная термография, анализ.

*Для цитирования*: Зимин М. И. Математическое и программное обеспечение для анализа тренда температуры при проведении инфракрасной термографии. *Успехи кибернетики*. 2023;4(1):21-23. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-03.

Поступила в редакцию: 02.07.2022. В окончательном варианте: 21.12.2022.

# MATHEMATICAL MODEL AND SOFTWARE FOR ANALYSING INFRARED THERMOGRAPHY TEMPERATURE TRENDS

M. I. Zimin<sup>a</sup>
2554620 ONTARIO LTD., Toronto, Canada
<sup>a</sup> ∠ zimin7@yandex.ru

Abstract: this paper presents a mathematical model and software for analyzing infrared thermography temperature trends. We used structural risk minimization. Examples of the estimations are given.

Keywords: software, trend, temperature, infrared thermography, analysis.

Cite this article: Zimin M. I. Mathematical Model and Software for Analysing Infrared Thermography Temperature Trends. Russian Journal of Cybernetics. 2023;4(1):21–23. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-03.

Original article submitted: 02.07.2022. Revision submitted: 21.12.2022.

#### Введение

Тепловидение нашло применение во многих сферах человеческой деятельности [1]. Распределение температуры по поверхности объекта является основным параметром в тепловом контроле, так как несёт информацию об особенностях процесса теплопередачи, режиме работы объекта, его внутренней структуре и наличии скрытых внутренних дефектов [1]. Однако важно не только текущее значение температуры, но и её изменение во времени. Причём важен также и вид функции T(t), где T — температура, а t — время, то есть является ли она константой, возрастающей, убывающей или асимптотически стремящейся к какой-либо величине. При этом надо принимать во внимание и то, что измерения температуры выполняются с некоторой погрешностью.

Количество измерений в реальных условиях нередко достаточно ограниченно. Поэтому программа должна выбирать наиболее подходящую зависимость в условиях малых выборок, сопоставляя объём данных и сложность получаемой функции.

В этом случае наиболее подходящим является метод структурной минимизации риска [2], в котором эта возможность предусмотрена. Кроме того, в [3] описано использование сложных функций в этом методе, что важно для оценки тренда температуры. Однако эта проблема применительно к задачам инфракрасной термометрии до сих пор не рассмотрена.

Цель настоящей работы — разработка математического и программного обеспечения для анализа тренда температуры при проведении обследования оборудования.

#### Методика расчёта

В результате серии измерений можно получить значения  $T_1, T_2, \ldots, T_\ell$ , где  $\ell$  — число измерений. По ним восстанавливается зависимость T(t). Рассматриваются следующие варианты:

$$T = a, (1)$$

где a — коэффициент,

$$T = b + at, (2)$$

где b — коэффициент

$$T = c + a \cdot \text{th}(bt),\tag{3}$$

где c — коэффициент.

Если оптимальной оказывается зависимость (1), то можно сделать вывод о том, что температура не изменяется со временем; если наилучшее приближение обеспечивает функция (2), то температура либо возрастает, либо убывает; если лучше всего исходные данные аппроксимирует уравнение (3), то температура стремится к некоторому значению.

Для выбора оптимальной зависимости используется метод структурной минимизации риска. Задача восстановления регрессии сводится к минимизации следующей величины [4]:

$$J(k) = I_F(k)\Omega, (4)$$

где J(k) — средний риск,  $I_E(k)$  — эмпирический риск, k — параметр, определяющий конкретную функцию определённого класса функций (при использовании полиномов Чебышёва это степень полинома),  $\Omega$  — некоторая переменная.

С ростом объёма выборки величина  $\Omega$  всегда стремится к единице [4], хотя в каждом конкретном случае её вид различен, но если выборка мала, то она может существенно отличаться от 1. Тогда функция, доставляющая малую величину эмпирическому риску, может не обеспечить небольшой средний риск.

Оценка качества приближения, справедливая для любой случайной выборки с вероятностью  $1-\eta$ , даётся выражением [4]:

$$J(k) = \frac{I_M}{1 - \sqrt{\frac{(k+1)\left[\ln\left(\frac{l}{k+1}\right) + 1\right] - \ln\eta}{l}}},$$
(5)

где  $1 - \eta$  — вероятность, с которой справедлива оценка (5).

Выражение (5) зависит от степени полинома k. Та степень, при которой J(k) принимает наименьшее значение, является оптимальной степенью полиномиального приближения, а сама функция регрессии аппроксимируется полиномом этой степени, минимизирующим функционал эмпирического риска.

Поскольку полиномы Чебышёва ортогональны на отрезке [-1,1], то, если значения независимой переменной заданы не на этом отрезке, их надо привести к нему по формуле [4]:

$$t_i = \frac{(t_{gi} - c_1)}{c_2},$$

где  $t_i$  — значения независимой переменной, приведённые к отрезку [-1,1],  $t_{gi}$  — исходные значения независимой переменной,

$$c_1 = \frac{(t_{g \max} + t_{g \min})}{2},$$

$$c_2 = \frac{(t_{g \max} - t_{g \min})}{2},$$

где  $t_{g\, {\rm min}}$  — минимальное из заданных значение независимой переменной,  $t_{g\, {\rm max}}$  — максимальное из заданных значение независимой переменной.

При восстановлении зависимости (3) сначала вычисляются значения:

$$y_i = \operatorname{th}(bt_i),$$

Таблица 1

Таблица 2

а затем строится функция T(y). Если средний риск оказывается меньше, чем для зависимостей (1) и (2), то полученная функция рассматривается как наилучшее приближение. При этом оптимальное значение b определяется с помощью простейшего случайного поиска.

Описанный алгоритм был реализован в виде программы. В качестве исходных данных вводятся значения температуры. В результате выдаётся оптимальная зависимость T(t) и её график. Объём исходной выборки ограничен только техническими характеристиками компьютера и устанавливается индивидуально для каждого конкретного случая. Возможно также подключение Excel.

## Примеры расчёта

В качестве примера можно привести анализ тренда температуры редуктора по исходным данным, показанным в таблице 1.

Значения температуры редуктора для первого примера

t, часы	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T, <sup>o</sup> C	45,1	46,3	46,1	43,8	44,9	45,0	44,9	44,8	46,7	46,0	45,1	45,3

В этом случае оптимальной оказалась зависимость типа (1), что позволило сделать вывод о том, что состояние редуктора неопасно.

Другим примером является восстановление зависимости T(t) по информации, приведённой в таблице 2.

Значения температуры редуктора для второго примера

t, часы	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>T</i> , <sup>o</sup> C	32,2	33,4	33,1	35,8	36,4	36,0	38,3	38,8	40,0	40,1	41,1	40,4

Тогда в качестве оптимальной была выбрана зависимость (3). И, хотя в этот момент состояние редуктора было признано безопасным, в дальнейшем ему уделялось повышенное внимание.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Коротаев В. В., Мельников Г. С., Михеев С. В., Солдатов Ю. И. *Основы тепловидения*. СПб.: НИУ ИТМО; 2012. 122 с.
- 2. Vapnik V. *Estimation of Dependences Based on Empirical Data*. New York: Springer Science + Business Media, Inc.; 2006. 505 p.
- 3. Zimin M. I., Kumukova O. A., Zimin M. M. Mathematical Model and Software for Avalanche Forecasting. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(1):68–86. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-9.
- 4. Вапник В. Н., Глазкова Т. Г., Кощеев В. А., Михальский А. И., Червоненкис А. Я. *Алгоритмы и программы восстановления зависимостей* / под ред. В. Н. Вапника. М.: Наука; 1984. 816 с.

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-04

## НЕСКОЛЬКО ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ ДОХОДОВ НАСЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭПИДЕМИИ

## В. С. Петракова $^{1,a}$ , О. И. Криворотько $^{2,3,6}$

- <sup>1</sup> Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск, Российская Федерация <sup>2</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики, г. Новосибирск, Российская Федерация
  - <sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация <sup>a</sup> ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1126-2148, ♠ vika-svetlakova@yandex.ru <sup>6</sup> ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0125-4988, krivorotko.olya@mail.ru

Аннотация: в статье предлагаются две модели, описывающие влияние динамики распространения вируса на такие макроэкономические показатели, как численность рабочей силы и уровень среднедушевого дохода населения. Первая предложенная модель объединяет камерный подход SIR к моделированию распространения эпидемий и урбанистическую модель Лотки-Вольтерры. Вторая обобщает предложенную дифференциальную модель на задачу оптимального управления. Приведено сравнение результатов моделирования между собой и реальными данными на примере Новосибирской области за 2020–2021 гг. Для модели оптимального управления предложено несколько сценариев, которые могут быть использованы при расширении модели для моделирования отличной от рассматриваемой экономико-эпидемиологической ситуации.

Ключевые слова: COVID-19, макроэкономика, эпидемия, задачи оптимального управления.

*Благодарности*: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-71-10044- $\Pi$ ).

Для цитирования: Петракова В. С., Криворотько О. И. Несколько подходов к моделированию динамики доходов населения в условиях эпидемии. *Успехи кибернетики*. 2023;4(1):24–32. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-04.

Поступила в редакцию: 02.12.2022.

В окончательном варианте: 20.02.2023.

Revision submitted: 20.02.2023.

# APPROACHES TO THE SIMULATION OF PERSONAL INCOME VARIATIONS DURING EPIDEMICS

## V. S. Petrakova<sup>1,a</sup>, O. I. Krivorotko<sup>2,3,b</sup>

- <sup>1</sup> Institute of Computational Modeling, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation
- <sup>2</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Novosibirsk, Russian Federation <sup>3</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
  - <sup>a</sup> ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1126-2148, ♠ vika-svetlakova@yandex.ru b ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0125-4988, krivorotko.olya@mail.ru

Abstract: this study proposes two models representing the impact of the virus spread on such macroeconomic metrics as the labor force size and per capita income. The first model combines the SIR compartmental epidemics modeling and the Lotka-Volterra model. The second one extends the proposed differential model to the optimal control problem. The simulation results are compared with each other and real-world data for the Novosibirsk Region, 2020–2021. We used several scenarios for the optimal control model to further expand the model to other economic and epidemiological conditions.

Keywords: COVID-19, macroeconomics, epidemics, optimal control problems.

Acknowledgements: this work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 18-71-10044).

Cite this article: Petrakova V. S., Krivorotko O. I. Approaches to the Simulation of Personal Income Variations During Epidemics. *Russian Journal of Cybernetics*. 2023;4(1):24–32. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-04.

Original article submitted: 02.12.2022.

#### Введение

Масштабные эпидемии инфекционных заболеваний приводят к спаду экономической активности в исследуемом регионе за счет вводимых ограничительных мер правительственными структурами, а также к снижению количества рабочей силы. При этом дестабилизация экономики региона влияет на общее благосостояние его жителей, как правило, в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Так, экономические последствия распространения эпидемии COVID-19 в 2020–2022 гг. во всем мире по-казали необходимость учитывать экономические факторы при планировании противоэпидемических мероприятий [1].

Большинство сценариев распространения инфекционных заболеваний в математической эпидемиологии основывается на использовании дифференциальных уравнений и кластеризации популяции в зависимости от иммунного статуса ее агентов. Такие модели принято называть камерными моделями или SIR-моделями (первая SIR-модель предложена Кермаком и МакКендриком [2] еще в 1927 г.). К настоящему моменту разработано множество ее модификаций, начиная с увеличения количества состояний агентов (камер) и их характеристик (пространственное распределение населения, возраст) и заканчивая учетом стохастичности процесса распространения вируса (см. например, обзорную работу [3]). С развитием вычислительной техники большую популярность в прогнозировании развития эпидемий приобрели вычислительно более сложные агентные модели [3–6], которые позволили учитывать неоднородность населения и внешние ограничительные мероприятия. Помимо двух описанных подходов, некоторые исследования посвящены анализу эпидемиологического процесса в других контекстах, например, уравнениям в частных производных [7, 8], моделям «среднего поля» [9, 10], анализу временных рядов [3, 11, 12], нейронным сетям и машинному обучению [13].

Однако большинство исследований в математической эпидемиологии посвящено оценке динамики распространения заболеваемости и не описывает процесс с экономической точки зрения, а работы по экономике, предлагающие прогноз экономических последствий распространения инфекции, не показывают связи между характером эпидемического процесса и экономической деятельностью. Существует лишь небольшое количество работ, посвященных построению математических моделей в это области. Например, в статье [14] предложена абстрактная агенто-ориентированная модель в виде клеточного автомата без использования реалистичных предположений о распространении вируса и состоянии экономики. В работах [15, 16] оценено влияние различных сценариев развития эпидемии на бизнес и домохозяйства. В исследовании [17] представлена математическая модель влияния смертности от коронавируса на показатели потребления на душу населения и дохода популяции.

В данной работе представлена математическая модель, описывающая влияние распространения новой коронавирусной инфекции COVID-19 на два макроэкономических показателя региона: среднедушевой доход населения и численность его рабочей силы. Сложность оценки динамики доходов населения в долгосрочной перспективе связана с тем, что на их изменение влияет множество факторов (инфляция, производительность труда, уровень безработицы и т.д). В основе предложенной модели лежит гипотеза о существовании связи между среднедушевым доходом населения и величиной конечного производимого в регионе продукта. В качестве базовой эпидемиологической модели выбрана простейшая SIR-модель, которая, как правило, не используется для долгосрочного прогнозирования развития заболеваемости, но после небольших модификаций позволяет достаточно точно оценить качественное влияние пандемии на экономику региона.

# Базовая дифференциальная модель распространения инфекционного заболевания с учетом экономических процессов

Наиболее используемыми для описания вспышки распространения инфекционного заболевания моделями, как уже было сказано выше, являются камерная SIR-модель и ее различные модификации [2, 3]. Такие модели привлекательны за счет своей структурной простоты и наличия большого числа инструментов для анализа и численного решения прямых и обратных задач для таких моделей. Здесь предполагается, что вся популяция (в простейшем случае) в каждый момент времени t разделена на три группы (кластера, камеры): восприимчивые к вирусу  $m_S(t)$  (неинфицированные), инфицированные  $m_I(t)$  и иммунные  $m_R(t)$  (получившие иммунитет после болезни либо умершие). В этом случае Кермак и МакКендрик в 1927 году в своей работе показали, что динамика эпидемии внутри замкнутой популяции может быть описана следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dm_{S}(t)}{dt} = -\beta m_{S}(t) m_{I}(t), \\ \frac{dm_{I}(t)}{dt} = \beta m_{S}(t) m_{I}(t) - \gamma m_{I}(t), \\ \frac{dm_{R}(t)}{dt} = \gamma m_{I}(t) \end{cases}$$
(1)

с начальными условиями  $m_i(0) = m_{i0}, \ \forall i \in \{S,I,R\}$ . Дополним систему (1) следующими уравнениями

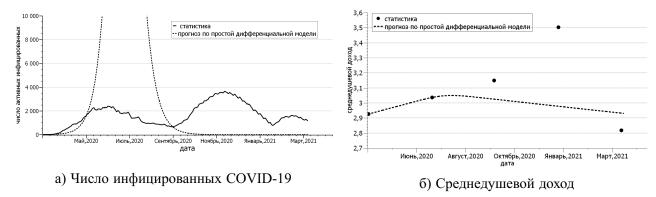
$$\begin{cases}
\frac{dm_{P}(t)}{dt} = m_{P}(t) \left(-\beta/\varepsilon \cdot m_{I}(t) - \omega + \rho m_{F}(t)\right) + \gamma \varepsilon m_{I}(t), \\
\frac{dm_{F}(t)}{dt} = m_{F}(t) \left(\sigma m_{P}(t) - \phi \left(m_{S}(t) + m_{I}(t) + m_{R}(t)\right)\right).
\end{cases} (2)$$

Система (2) представляет собой модификацию урбанистической модели Лотки-Вольтерры, описанной в работе [18]. Здесь  $m_P(t)$  — доля трудоактивного населения в каждый момент времени t, а изменение  $m_F(t)$  описывает динамику среднедушевого дохода населения в рассматриваемом регионе. В отличие от модели, описанной в [18], в (2) добавлена эпидемиологическая составляющая: трудоспособное население может заболеть и какое-то время не вкладываться в развитие экономики (члены  $\beta/\varepsilon \cdot m_I(t)$ ,  $\gamma \varepsilon m_I(t)$ ), а также рассмотрена нелинейная зависимость изменения среднедушевого дохода населения от текущей ситуации на рынке труда (составляющая  $\sigma m_P(t)$ ). Представленные системы дифференциальных уравнений (1) и (2) с начальными условиями  $m_i(0) = m_{i0}$ ,  $i \in \{S,I,R,P,F\}$ , будут рассмотрены далее как модель, описывающая влияние распространения заболеваемости на такие макроэкономические показатели региона, как численность активного трудоспособного населения и среднедушевой доход по региону. Описание параметров предложенной модели изложено в таблице 1.

Таблица 1 Описание параметров модели распространения инфекционного заболевания с учетом влияния макроэкономических процессов и их средние значения для вычислительного эксперимента

Символ	Описание	Значение
N	Численность популяции (Новосибирская область)	2785836
$m_{\mathcal{S}}(t)$	Доля популяции — подверженные заболеванию в каждый	$m_S(0) = (N-8)/N$
	момент времени $t$	
$m_I(t)$	Доля популяции — активные инфицированные в момент	$m_I(0) = 8/N$
	времени t	
$m_R(t)$	Доля популяции — получившие иммунитет к моменту	$m_R(0) = 0$
	времени t	
$m_P(t)$	Трудоактивная часть населения в момент времени $t$	$m_P(0) = \varepsilon m_S(0)$
$m_F(t)$	Среднедушевой доход населения в каждый момент вре-	$m_F(0) = 2.9265$
	мени $t$ (тыс. руб.)	
β	Контагиозность, скорость распространения вируса	0.5505
$\gamma$	Скорость выздоровления популяции	0.4607
ω	Коэффициент миграции трудоспособного населения в	0.99/N
	другие регионы	
ρ	Коэффициент миграции трудоспособного населения в	0.19/N
	рассматриваемый регион	
ε	Доля трудоактивного населения в рассматриваемом реги-	0.576
	оне	
$\sigma$	Коэффициент роста среднедушевого дохода за счет роста	0.0042
	числа работающего населения	
$\phi$	Коэффициент «старения» популяции, перехода части на-	0.002
	селения в пенсионный возраст	

Протестируем построенную дифференциальную модель на соответствие реальным статистическим данным. Данные по заболеваемости COVID-19 в Новосибирской области взяты из открытого источника [22]. Экономические параметры, используемые в модели, выбирались исходя из официальных данных из аналитического отчета Правительства Новосибирской области за 2020 год [19], а эпидемиологические параметры  $\beta$  и  $\gamma$  подбирались таким образом, чтобы приблизить первый подъем заболеваемости за период апрель—июнь 2020 г. Числовые значения параметров также представлены в таблице 1. На рисунке 1а показано сравнение реальных данных по заболеваемости в регионе за период с апреля 2020 года по апрель 2021 года в Новосибирской области с результатами моделирования (1)—(2). На рисунке 16 представлено аналогичное сравнение динамики среднедушевого дохода населения.



**Рис. 1.** Сравнение результатов моделирования на основе модели (1)–(2) с реальными данными в Новосибирской области за 2020 год

Из рисунка 1а видно, что модель SIR приближает статистические данные только на отрезке апрель-июнь 2020 года (для чего и подбирались соответствующие значения эпидемиологических констант). Далее происходит завышение показателей и резкий их спад, что не соответствует реальным измерениям. Такое поведение характерно для всех SIR-моделей, следствием чего является факт, что такие модели не используются для прогноза на долгосрочный или даже среднесрочный временные периоды. Вместе с тем на период апрель-июнь 2020 года модель хорошо приближает динамику среднедушевого дохода, резко занижая ее в последующем из-за ошибочного приближения количества инфицированных (рис. 1б).

Таким образом, для оценки влияния распространения вируса на макроэкономические показатели региона необходима адекватная базовая эпидемиологическая модель. Это требование приводит либо к построению модификаций модели SIR путем добавления новых групп населения и связей между ними. Например, для прогнозирования распространения COVID-19 за 2020–2021 гг. на основе различных предположений о вирусе было разработано более 100 камерных моделей [3], которые могут быть использованы вместо системы (1). Однако, как показало сравнение прогнозируемых данных с реальной статистикой, такие модели обладают большим числом чувствительных параметров, определение которых само по себе является сложной задачей и основано на многих предположениях. Неизвестные параметры необходимо оценивать путем решения обратных задач по данным предыдущего временного участка, что делает модель более неопределенной [6]. Более того, при длительном течении COVID-19 изменение параметров модели связано со многими факторами, например, введением карантинных ограничений, обязательного ношения масок или проведением эффективной кампании по вакцинации. В этом случае одним из способов улучшения модели может быть рассмотрение эпидемиологических параметров зависимыми от времени.

## Модель оптимального управления

Как известно [20], для моделей типа SIR параметры  $\beta$ ,  $\gamma$  наиболее чувствительные и определяют характер поведения кривых, являющихся решением модели (1). Критика таких моделей, помимо плохого прогноза на долгосрочный временной период, основывается на предположении однородности населения без учета дифференциации населения по социальным признакам: например, возраст или соблюдение/несоблюдение противоковидных ограничений. Для преодоления этих трудностей в следующем разделе сформулирована задача управления.

#### Постановка задачи оптимального управления

Пусть  $\alpha_{I_S}(t): [0,T] \to R$  — непрерывная функция, означающая кумулятивную лояльность населения к изоляции (соблюдению ограничений). Положим, что  $|\alpha_I(t)| \le 1 \ \forall t$ , а скорость распространения инфекции  $\beta$  в (1)–(2) изменяется по правилу

$$\beta = \beta_{\min} + (\beta_{\max} - \beta_{\min}) \frac{1 + \alpha_{Is}(t)}{2}.$$
 (3)

Будем искать набор функций  $\{m_S, m_I, m_R, m_P, m_F, \alpha_{Is}\}$ , доставляющий максимум функционалу вида

$$J = \int_{0}^{T} G(m_{SIRPF}, \alpha_{Is}) dt + \Phi\left(m_{SIRPF}\left(0\right), m_{SIRPF}\left(T\right)\right), \tag{4}$$

где обозначение  $m_{SIRPF}$  означает вектор функций состояния управляемой системы  $\{m_S(t), m_I(t),$  $m_R(t), m_P(t), m_F(t)$  Вдесь G определяет качество функционирования системы на всем промежутке управления, а  $\Phi$  — терминальные условия, конечный результат воздействия управления, определяемый совокупностью начальных  $m_i(0)$  и конечных  $m_i(T)$  данных.

Таким образом, задача оптимального управления формулируется следующим образом: максимизировать функционал вида (4) с ограничениями в виде дифференциальных уравнений (1)-(2) с учетом (3). Для решения задачи воспользуемся принципом максимума Понтрягина. Введем в рассмотрение гладкие функции  $\psi_i(t):[0,T] \to \mathbb{R}$  и помножим  $\psi_i(t)$   $\forall i \in \{S,I,R,P,F\}$  на соответствующее уравнение в (1)–(2). Выпишем функцию Понтрягина [21]:

$$H(m_{SIRPF}, \alpha_{Is}, \psi_{SIRPF}) = G(m_{SIRPF}, \alpha_{Is}) + \psi_{S}(t) (-\beta(\alpha_{Is}) m_{S}(t) m_{I}(t)) + + \psi_{I}(t) (\beta(\alpha_{Is}) m_{S}(t) m_{I}(t) - \gamma m_{I}(t)) + \psi_{R}(t) (\gamma m_{I}(t)) + + \psi_{P}(t) (-\beta(\alpha_{Is}) / \varepsilon \cdot m_{P}(t) m_{I}(t) - \omega m_{P}(t) + \rho m_{P}(t) m_{F}(t) + \gamma \varepsilon m_{I}(t)) + + \psi_{F}(t) m_{F}(t) (\sigma m_{P}(t) - \phi(m_{S}(t) + m_{I}(t) + m_{R}(t))).$$
(5)

Пусть  $\left\{m_{SIRPF}^{*}\left(t\right), \alpha_{Is}^{*}\left(t\right)\right\}$  – оптимальный процесс в задаче (1)–(4). Тогда найдутся одновременно не равные нулю множители  $\psi_{SIRPF}(t)$  такие, что выполнены следующие условия:

- 1. Функция Понтрягина  $H\left(m_{SIRPF},\alpha_{Is},\psi_{SIRPF}\right)$  задачи (1)–(4) при каждом  $t\in\left[0,T\right]$  достигает максимума по  $\alpha_{Is}$  в точках  $\alpha_{Is}^*(t)$  при  $m_{SIRPF}=m_{SIRPF}^*(t),\,\psi_{SIRPF}=\psi_{SIRPF}(t).$ 2. Вектор-функция  $\psi_{SIRPF}(t)$  удовлетворяет сопряженной системе дифференциальных уравнений
  - Вектор-функция  $\psi_{SIRPF}(t)$  удовлетворяет сопряженной системе дифференциальных уре  $\begin{cases} \frac{d\psi_S}{dt} = \beta\left(\alpha_I\right) m_I(t) \left(\psi_S\left(t\right) \psi_I\left(t\right)\right) + \phi\psi_F\left(t\right) m_F\left(t\right) \partial G/\partial m_S \,, \\ \frac{d\psi_I}{dt} = \beta\left(\alpha_I\right) m_S(t) \left(\psi_S\left(t\right) \psi_I\left(t\right)\right) + \gamma\left(\psi_I\left(t\right) \psi_R\left(t\right)\right) + \beta\left(\alpha_{Is}\right)/\varepsilon \cdot \psi_P\left(t\right) m_P\left(t\right) \gamma\varepsilon\psi_P\left(t\right) + \phi\psi_F\left(t\right) m_F\left(t\right) \partial G/\partial m_I \,, \\ \frac{d\psi_R}{dt} = \phi\psi_F\left(t\right) m_F\left(t\right) \partial G/\partial m_R \,, \\ \frac{d\psi_P}{dt} = \beta\left(\alpha_{Is}\right)/\varepsilon \cdot \psi_P\left(t\right) m_I\left(t\right) + \omega\psi_P\left(t\right) \rho\psi_P\left(t\right) m_F\left(t\right) \sigma\psi_F\left(t\right) m_F\left(t\right) \partial G/\partial m_P \,, \\ \frac{d\psi_F}{dt} = -\rho\psi_P\left(t\right) m_P\left(t\right) \sigma\psi_F\left(t\right) m_P\left(t\right) + \phi\psi_F\left(t\right) \left(m_S\left(t\right) + m_I\left(t\right) + m_R\left(t\right)\right) \partial G/\partial m_R \,. \end{cases}$ (6)

$$\begin{cases} \frac{d\psi_R}{dt} = \phi \psi_F(t) \, m_F(t) - \partial G/\partial m_R \,, \\ \frac{d\psi_P}{dt} = \beta \left(\alpha_{Is}\right) / \varepsilon \cdot \psi_P(t) \, m_I(t) + \omega \psi_P(t) - \rho \psi_P(t) \, m_F(t) - \sigma \psi_F(t) \, m_F(t) - \partial G/\partial m_P, \\ \frac{d\psi_F}{dt} = \frac{\partial \phi_F}{\partial t} \, m_F(t) + \frac{\partial \phi_F}{\partial t}$$

с условиями трансверсальности

$$\psi_{i}\left(0\right) = \frac{\partial\Phi\left(m_{i}\left(0\right), m_{i}\left(T\right)\right)}{\partial m_{i}\left(0\right)}, \, \psi_{i}\left(T\right) = \frac{\partial\Phi\left(m_{i}\left(0\right), m_{i}\left(T\right)\right)}{\partial m_{i}\left(T\right)}.$$
(7)

Исследуем (5) на выполнение необходимого условия максимума функции

$$\frac{\partial H}{\partial \alpha_{IS}} = \frac{\partial G}{\partial \alpha_{IS}} + \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{2\varepsilon} \left( \varepsilon m_{S}(t) m_{I}(t) \left( \psi_{I}(t) - \psi_{S}(t) \right) - \psi_{P}(t) m_{P}(t) m_{I}(t) \right) = 0. \tag{8}$$

В случае вогнутости функции G относительно функции управления  $\alpha_{Is}$  (8) представляет собой условия оптимальности выбранной популяцией стратегии.

#### Алгоритм решения задачи оптимального управления

Для численной реализации задачи оптимального управления воспользуемся следующим итерационным алгоритмом.

**Вход:** начальные значения  $m_{SIRPF}$  (0), отсутствие управления  $\alpha_{Is}$  (t)  $\equiv$  0, точность вычисления максимума  $\varepsilon_I$ .

- 1. Получить набор сеточных значений  $m_i^h(t_k)$  решением системы дифференциальных уравнений (1)–(2) с учетом (3).
  - 2. Получить приближенное значение функционала стоимости  $J^h$  согласно (4).
  - 3. Пока  $|J \max J| > \varepsilon_I$  выполнять:
- а. Получить набор сеточных значений  $\psi_i^h(t_k)$  решением системы дифференциальных уравнений (6) с учетом (3).
  - b. Получить набор сеточных значений  $\alpha_{Is}^h(t_k)$  из уравнения (8).
- с. Вычислить функцию Понтрягина H (5) с учетом текущих значений  $m_i^h(t_k), \, \psi_i^h(t_k), \, \alpha_{Is}^h(t_k).$  d. Вычислить функцию Понтрягина H (5) с учетом текущих значений  $m_i^h(t_k), \, \psi_i^h(t_k)$  и граничных значений  $\alpha_{Is}^h(t_k)$ .
- е. В качестве значений  $\alpha_{Is}^h(t_k)$  на новой итерации выбрать те, которые доставляют наибольшее значение функции H.
- f. Получить новый набор сеточных значений  $m_i^h(t_k)$  решением системы дифференциальных уравнений (1) с учетом (3).
  - g. Получить приближенное значение функционала стоимости  $J^h$  согласно (4).

**Выход:** выбрать полученные на последней итерации сеточные функции  $m_i^h(t_k), \, \psi_i^h(t_k), \, \alpha_{Is}^h(t_k)$ в качестве решения задачи оптимизации.

Для решения систем дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутты 4 порядка аппроксимации.

#### Вычислительные эксперименты для модели оптимального управления

Для тестирования построенного алгоритма будем рассматривать несколько сценариев развития эпидемиологической ситуации COVID-19 в Новосибирской области.

1. Оптимистический сценарий. Будем искать набор функций  $\{m_{SIRPF}, \alpha_{Is}\}$ , доставляющих максимум функционалу

$$J_1 = \int_0^T \left( d_1 m_F^2(t) - d_2 \left( 1 + \alpha_{Is} \right)^2 \right) dt + m_F(T). \tag{9}$$

Функционал  $J_1$  выбран таким образом, чтобы оптимальной для популяции являлась стратегия максимизации среднедушевого дохода, что заставляет население более лояльно относиться к противоковидным мерам и соблюдать их.

2. Пессимистический сценарий. Будем максимизировать функционал вида

$$J_2 = \int_0^T d_1 m_S(t) (1 + \alpha_{I_S})^2 dt + m_S(T).$$
 (10)

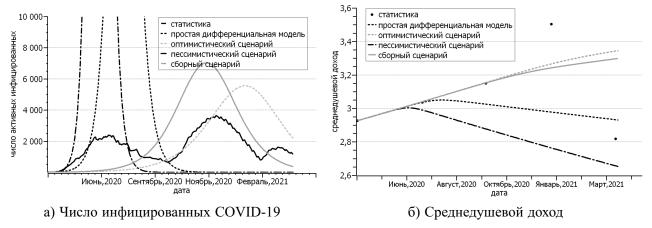
Здесь  $J_2$  есть функциональное представление так называемой «стоимости анархии» — ситуации, когда наибольшую выгоду получает та часть населения, которая не соблюдала ограничений, но при этом не заразилась.

3. Сборный вариант. Будем искать максимум функционала

$$J_3 = \int_0^T \left( d_1 m_S(t) (1 + \alpha_{Is})^2 + d_2 m_F^2(t) - d_3 (1 + \alpha_{Is})^2 \right) dt + m_S(T) + m_F(T). \tag{11}$$

Функционал вида (11) представляет собой обобщение двух противонаправленных процессов (9) и (10). Здесь  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  представляют собой весовые константы. Для (9)–(11) выбирались значения  $d_1 = 4.5, d_2 = 8, d_3 = 6.5$ . Будем считать, что параметр  $\beta$  изменяется в пределах  $[0.9\beta_0, 1.1\beta_0]$ , где  $\beta_0$ соответствует значение в таблице 1. На рисунке 2 представлено сравнение результатов вычислительного эксперимента для сценариев (9), (10), (11) с результатами, полученными при решении задачи (1)–(2), и реальными данными. Как и предполагалось, при выполнении сценария (9) заболеваемость в своем пике меньше, чем для модели (1)-(2), что приводит к повышению среднедушевого дохода населения. В

случае пессимистического сценария (10) ситуация обратная. Функционал (11) даёт средний результат относительно двух вышеизложенных.



**Рис. 2.** Сравнение результатов, полученных при реализации сценариев оптимального управления распространением эпидемии COVID-19 с учетом экономических процессов в Новосибирской области, и реальных данных

Поскольку изменение макроэкономических показателей интересно, в первую очередь, в долгосрочной перспективе, а камерные модели обычно используются для моделирования на коротких временных промежутках, то одним из перспективных подходов может стать построение сценариев на некоторые небольшие промежутки времени и выбор наиболее подходящего под ситуацию сценария. Так, на рисунке 3 представлено последовательное применение сценариев (9)–(11) к моделированию ситуации сроком на 3 месяца. Здесь кривая, состоящая из точек, составлена из сценариев, показавших

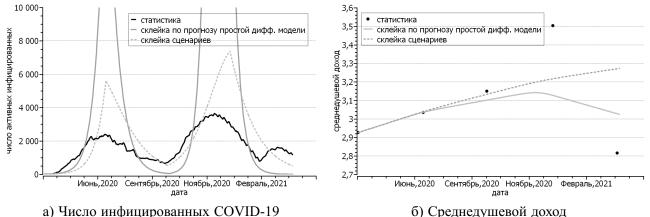


Рис. 3. Сравнение данных, полученных при склейке сценариев

наибольшее приближение с известными статистическими данными по заболеваемости. Из рисунка видно, что модель оптимального управления может дать более точный прогноз, чем простая дифференциальная модель (серая линия), но требует адекватной оценки ситуации при построения нового прогностического сценария. Описание используемых при моделировании параметров представлено в таблице 2.

#### Заключение

Таким образом, в работе последовательно построено две модели, описывающих влияние эпидемиологического процесса на макроэкономические показатели. Предложенная базовая дифференциальная модель основана на совокупности камерной модели SIR и урбанистической модели Лотки-Вольтерры. Такая модель вычислительно проста и может быть легко доработана за счет модификации модели SIR любой известной камерной моделью, что позволит дать более точный эпидемиологический прогноз.

Таблица 2 Описание эпидемиологических данных заболеваемости COVID-19, используемых при склейке сценариев

Для заданного промежутка времени	1 квартал	2 квартал	3 квартал	4 квартал
Значение параметра $\beta$ в простой диффе-	0.55	0.48	0.7	0.27
ренциальной модели				
Значение параметра $\gamma$ в простой диффе-	0.46	0.50	0.51	0.26
ренциальной модели				
Используемый сценарий, показавший наи-	(9)	(10)	(9)	(9)
лучшее приближение				
Значение $\delta$ , где $\beta_{min}=\beta-\delta\beta,\ \beta_{max}=\beta+$	3%	3%	17%	2%
$\delta eta$				

Далее, на основе базовой дифференциальной модели предложена модель оптимального управления, где скорость распространения вируса зависит от реализации популяцией стратегии изоляции (выполнения противоэпидемиологических мер). Сравнение с реальными статистическими данными результатов вычислительного моделирования показывает, что такая модель хорошо приближает количественные показатели, но нуждается в адекватной оценке текущей эпидемиологической ситуации (оценке параметров модели) и подборе правильного сценария развития эпидемии. Отметим, что рисунок 2 показывает, что, хотя развитие сценарного подхода позволяет строить более приближенные к реальности прогнозы, SIR модели с постоянными коэффициентами плохо приближают реальные данные заболеваемости СОVID-19 в долгосрочной перспективе (ввиду появления новых штаммов и административных воздействий).

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Zyatkov N., Krivorotko O. Forecasting Recessions in the US Economy Using Machine Learning Methods. *Proceedings – 2021 17th International Asian School-Seminar "Optimization Problems of Complex Systems"*. 2021:139–146. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588678.
- 2. Kermack W. O., McKendrick A. G. Contributions to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proc. R. Soc.* 1927;A115:700–721. DOI: 10.1098/rspa.1927.0118.
- 3. Krivorotko O. I., Kabanikhin S. I. *Mathematical models of COVID-19 spread*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/356985697 Mathematical models of COVID-19 spread.
- 4. Kerr C. C. et al. Covasim: An Agent-Based Model of COVID-19 Dynamics and Interventions. *PLoS Comput. Biol.* 2021;17(7):e1009149. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1009149.
- 5. Lin Q. et al. A Conceptual Model for the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in Wuhan, China with Individual Reaction and Governmental Action. *Int. J. Infec. Dis.* 2020;93:211–216. DOI: 10.1016/j.ijid.2020.02.058.
- 6. Krivorotko O. et al. Agent-Based Modeling of COVID-19 Outbreaks for New York State and UK: Parameter Identification Algorithm. *Infectious Disease Modelling*. 2022;7(1):30–44. DOI: 10.1016/j.idm.2021.11.004.
- 7. Viguerie A. et al. Diffusion–Reaction Compartmental Models Formulated in a Continuum Mechanics Framework: Application to COVID-19, Mathematical Analysis, and Numerical Study. *Comput. Mech.* 2020;66:1131–1152. DOI: 10.1007/s00466-020-01888-0.
- 8. Aristov V. V., Stroganov A. V., Yastrebov A. D. Simulation of Spatial Spread of the COVID-19 Pandemic on the Basis of the Kinetic-Advection Model. *Physics*. 2021;3(1):85–102. DOI: 10.3390/physics3010008.
- 9. Bremaud L. Mean Field Game Modeling of Epidemic Propagation. Paris: LPTMS; 2021.
- 10. Petrakova V. S., Krivorotko O. I. Mean Field Game for Modeling of COVID-19 Spread. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2022;514:126271–126271. DOI: 10.1016/j.jmaa.2022.126271.
- 11. Adarchenko V. A. et al. Modeling the Development of the Coronavirus Epidemic Using Differential and Statistical Models. *RFNC-VNIITF*. 2020;264:Preprint.
- 12. Brauer F. Mathematical Epidemiology: Past, Present, and Futures. *Infectious Disease Modelling*. 2017;2(2):113–127. DOI: 10.1016/j.idm.2017.02.001.

- 13. Wieczorek M., Silka J., Wo M. Neural Network Powered COVID-19 Spread Forecasting Model. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2020;140:110203. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110203.
- 14. Kano T. et. al. An Agent-Based Model for Interrelation Between COVID-19 Outbreak and Economic Activities. *Proc. R. Soc. A.* 2021;477(2245). DOI: 10.1098/rspa.2020.0604.
- 15. McAdams D. Nash SIR: An Economic-Epidemiological Model of Strategic Behavior During a Viral Epidemic. *MedRN: COVID-19 Research (Topic)*. Available at: https://www.semanticscholar.org/paper/Nash-SIR%3A-An-Economic-Epidemiological-Model-of-a-McAdams/be9875ba29b20b692fec23e6cb12761dfd93b9ce. DOI: 10.2139/ssrn.3593272.
- Silva P. et al. COVID-ABS: An Agent-Based Model of COVID-19 Epidemic to Simulate Health and Economic Effects of Social Distancing Interventions. *Chaos, Solitons and Fractals*. 2020 Oct;139:110088. DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110088.
- 17. Goenka A., Liu L., Nguyen M.-H. SIR Economic Epidemiological Models with Disease Induced Mortality. *Journal of Mathematical Economics*. 2021;93(3):102476. DOI: 10.1016/j.jmateco.2021.102476.
- 18. Kamann D., Nijkamp P. Technogenesis: Incubation and Diffusion. The Spatial Context of Technological Development at the Local Level. *Serie Research Memoranda*. 1988.
- 19. Novosibirsk Region Federal State Statistics Service. Available at: https://novosibstat.gks.ru/.
- 20. Chunfeng M. et al. Understanding Dynamics of Pandemic Models to Support Predictions of COVID-19 Transmission: Parameter Sensitivity Analysis of SIR-Type Models. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2022;26(6):2458–2468. DOI: 10.1109/JBHI.2022.3168825.
- 21. Yong J., Zhou X. Y. Maximum Principle and Stochastic Hamiltonian Systems. *Stochastic Controls. Applications of Mathematics*. 1999;43. Springer, New York, NY. DOI: 10.1007/978-1-4612-1466-3 3.
- 22. Inverse Problems. Available at: https://covid19-modeling.ru/data. (In Russ.)

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-05

# АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И ВЫЧИСЛЕНИЯ СХОДСТВА ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

## Ш. И. Мутаиров $^a$ , К. И. Бушмелева $^\delta$

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация  $^{a}$   $\stackrel{L}{\bowtie}$  usermage@gmail.com,  $^{6}$  bkiya@yandex.ru

Аннотация: в статье описаны алгоритм вычисления сходства текстовых данных пользователей социальных сетей, алгоритм нормализации текста, а также алгоритм рекомендации проектов участникам образовательного процесса.

Ключевые слова: обработка естественного языка, косинусная мера.

Для цитирования: Мутаиров Ш. И., Бушмелева К. И. Алгоритмы обработки и вычисления сходства текстовых данных пользователей социальных сетей. *Успехи кибернетики*. 2023;4(1):33-38. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-05.

Поступила в редакцию: 07.02.2023.

В окончательном варианте: 21.02.2023.

#### TOOLS FOR SOCIAL MEDIA USER-GENERATED CONTENT SIMILARITY ASSESSMENT

# Sh. I. Mutairov<sup>a</sup>, K. I. Bushmeleva<sup>b</sup>

Surgut State University, Surgut, Russian Federation

<sup>a</sup> a usermage@gmail.com, <sup>b</sup> bkiya@yandex.ru

*Abstract:* the paper describes the proposed algorithms for the similarity assessment in social media user-generated texts, text normalization, and project recommendation.

Keywords: natural language processing, cosine similarity.

Cite this article: Mutairov Sh. I., Bushmeleva K. I. Tools for Social Media User-Generated Content Similarity Assessment. Russian Journal of Cybernetics. 2023;4(1):33–38. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-05.

Original article submitted: 07.02.2023. Revision submitted: 21.02.2023.

#### Введение

В последнее время в образовании все большее распространение получает так называемый проектный подход. Одной из задач проектного подхода является поиск участников, заинтересованных в реализации проекта и соответствующих предъявляемым требованиям. Рекомендательная система может быть использована для составления списка наиболее подходящих кандидатов для выполнения поставленной задачи, но для начала необходимо получить информацию о самих кандидатах [1]. В современную эпоху вездесущего социального взаимодействия через Интернет можно попытаться собрать необходимые данные об участниках образовательного процесса из социальных сетей. Пользователи социальных сетей склонны раскрывать много личной информации. Эта информация может быть представлена в различных структурированных и неструктурированных формах. Накопление, анализ и последующая выработка рекомендаций на основе этих проанализированных данных может стимулировать участников образовательного процесса к совместной продуктивной деятельности.

В качестве механизма взаимодействия участников образовательного процесса предполагается использовать проектируемую социальную сеть университета, способную формировать рекомендации для ее пользователей с целью увеличения количества и повышения качества их социальных и профессиональных связей [8]. Для формирования релевантных рекомендаций необходимо для каждого участника рассчитать коэффициенты попарного его сходства с другими участниками по определенным атрибутам, которые, в большинстве, могут быть записаны в текстовом формате [9]. Для вычисления сходства некоторых атрибутов были разработаны алгоритмы, которые описаны далее в статье.

#### Алгоритм вычисления сходства текстовых строк

Для вычисления сходства между текстовыми строками, например, тем выпускных квалификационных работ (ВКР) участников образовательного процесса используется следующий алгоритм (рис. 1)

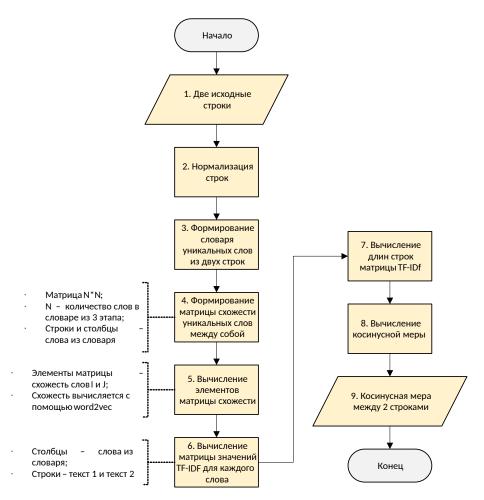


Рис. 1. Алгоритм вычисления сходства строк

На рисунке 2 изображен пример вычисления сходства двух строк. Для вычисления сходства между словами в матрице S (рис. 2) используется следующая система функций:

$$s_{ij} = \begin{cases} word2vec_{cxoдство}\left(cлово_i, cлово_j\right) & cxoдство \ge 0.6\\ 0 & cxoдство < 0.6 \end{cases}$$
 (1)

Word2vec — это общее название для набора моделей на основе искусственных нейронных сетей, предназначенных для генерации векторных представлений слов на естественном языке. Он используется для семантического анализа естественного языка на основе дистрибутивной семантики, машинного обучения и векторного представления слов [3, 4]. Названное «word2vec» ПО было разработано группой исследователей в Google в 2013 году. Библиотека Gensim, написанная на Python, является одной из самых популярных библиотек для использования моделей word2vec.

Элементы в матрице значений TF-IDF (рис. 2) вычисляются по следующей формуле:

$$\frac{n_{t,d}}{n_d} * \log_{10} \left( \frac{N}{N_t} \right) , \tag{2}$$

где  $n_{t,d}$  — количество вхождений слова t в тексте d;

 $n_d$  — общее количество слов в тексте d;

N- общее количество текстов;

 $N_t$  — количество текстов, содержащих слово t.

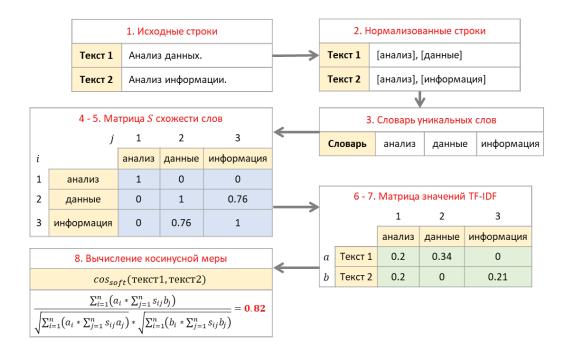


Рис. 2. Пример вычисления сходства двух строк

#### Алгоритм нормализации текста

В описанном выше алгоритме для повышения точности определения смыслового сходства двух строк выполняется их предварительная нормализация. Процесс нормализации позволяет убрать из исходного текста грамматическую информацию (падежи, числа, глагольные виды и времена, залоги причастий, род и так далее), оставляя только смысловую составляющую [5, 6].

Алгоритм нормализации текста изображен на рисунке 3.

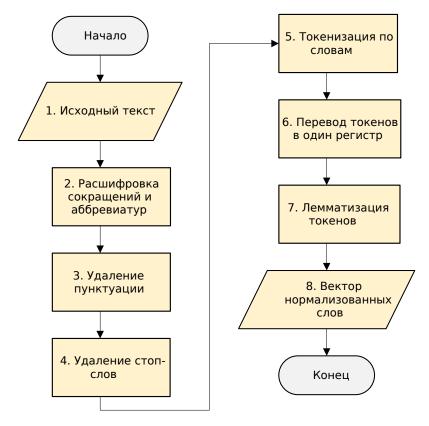


Рис. 3. Алгоритм нормализации текста

На шаге 2 расшифровка сокращений и аббревиатур проводится с помощью библиотеки Pymorphy2. Pymorphy2 – морфологический анализатор, написанный на языке Python (работает под 2.7 и 3.3+) [7]. Он умеет:

- приводить слово к нормальной (исходной) форме (например, «люди  $\to$  человек» или «гулял  $\to$  гулять»);
- ставить слово в нужную форму. Например, ставить слово во множественное число, менять падеж слова и т.д.;
  - возвращать грамматическую информацию о слове (число, род, падеж, часть речи и т.д.).

При работе используется словарь OpenCorpora; для незнакомых слов строятся гипотезы. Библиотека работает очень быстро: в настоящее время скорость работы составляет от нескольких тыс. слов/сек до свыше 100 тыс. слов/сек (в зависимости от выполняемой операции, интерпретатора и установленных пакетов); потребление памяти составляет 10 . . . 20 Мб; полностью поддерживается буква ё.

На шаге 4 с помощью свободной библиотеки NLTK удаляются стоп-слова. NLTK предназначена для символьной и статистической обработки естественного языка и написана на языке программирования Python. Отдельно искать словари стоп-слов не требуется, поскольку в NLTK они уже предустановлены, причем для многих языков мира, включая и русский.

Стоп-слова — это слова, которые удаляются из текста до или после его обработки, как правило, это союзы, междометия, артикли и т.д., не несущие семантической нагрузки. При применении машинного обучения в обработке текстов необходимо удалять нерелевантные слова, поскольку такие слова создают много шума.

На шаге 5 токенизация по словам проводится с помощью Рутогру2. Токенизация (иногда называемая сегментацией) по словам — это процесс разбиения предложения на составляющие его слова. В языках (например, в английском), в которых используется та или иная версия латинского алфавита, пробел является эффективным разделителем слов. Однако если производить разбиение текста только по пробелу, то может быть утрачен смысл составных существительных или словосочетаний, поэтому токенизацию необходимо выполнять с учетом контекста — Рутогру2 это умеет.

На шаге 7 лемматизация токенов проводится тоже с помощью Pymorphy2. Цель лемматизации — привести все встречающиеся словоформы к одной, нормальной (исходной) словарной форме для упрощения процесса программного анализа текста.

В таблице 1 продемонстрирован пример работы алгоритма нормализации текста.

Таблица 1 Пример работы алгоритма нормализации текста

№	Операция	Результат			
1	Исходный текст	Александр учится на направлении ИВТ.			
2	Расшифровка сокращений и	Александр учится на направлении информатика			
	аббревиатур	и вычислительная техника.			
3	Удаление пунктуации	Александр учится на направлении информатика			
		и вычислительная техника			
4	Удаление стоп-слов	Александр учится на направлении информатика			
		и вычислительная техника			
5	Токенизация по словам	[Александр] [учится] [направлении] [информа-			
		тика] [вычислительная техника]			
6	Перевод токенов в один ре-	[александр] [учится] [направлении] [информати-			
	гистр	ка] [вычислительная техника]			
7	Лемматизация токенов	[александр] [учиться] [направление] [информа-			
		тика] [вычислительный] [техника]			
8	Вектор нормализованных	<[александр], [учиться], [направление], [инфор-			
	слов	матика], [вычислительный], [техника]>			

### Алгоритм рекомендации проектов пользователю

Суть алгоритма заключается в следующем:

- 1. Берется вектор проектов  $\overrightarrow{P}$  и вектор интересов  $\overrightarrow{Y}$  пользователя.
- 2. Составляется матрица A, где строки это вектор проектов, а столбцы вектор интересов.
- 3. Вычисляются элементы матрицы A по следующей формуле:

$$a_{ij} = \frac{n_{j,i}}{n_i} * \log_{10} \left(\frac{N}{N_i}\right) * V, \tag{3}$$

где  $n_{j,i}$  — количество вхождений интереса j в тексте (название, описание) проекта i;

 $n_i$  — общее количество слов в описании проекта i;

N — общее количество проектов;

 $N_{i}$  — количество проектов, содержащих в описании интерес j;

V — вес интереса {высокий — 3, средний — 2, низкий — 1}.

4. Вычисляется вектор  $\overrightarrow{H}$  средних значений  $a_{ij}$ :

$$h_i = \sum_i a_{ij}. \tag{4}$$

5. Вычисляется вектор  $\overrightarrow{S}$  сходства проектов и темы ВКР:

$$s_i$$
= сходство ( $y_i$ , тема ВКР).

Для этого используется ранее описанный алгоритм вычисления сходства текстов.

6. Вычисляется вектор коэффициентов рекомендаций  $\overrightarrow{R}$  по формуле:

$$r_i = (h_i + s_i)/2.$$
 (5)

- 7. Сортируется (по убыванию) вектор проектов по их коэффициентам рекомендации, следует понимать, что i-ый проект имеет i-ый коэффициент рекомендации.
  - 8. Пользователю отображается отсортированный вектор проектов. Выполнение описанных выше шагов проиллюстрировано на рисунке 4.

Пример матрицы модифицированных значений TF-IDF интересов								
	j	1	2	3	4			
i		Интерес 1	Интерес 2	Интерес 3	Интерес 4	Среднее коэфф-ов	Схожесть с темой ВКР	Коэфф. рекомендации
1	Проект 1	0.6	0.3	0.6	0.2	0.4	0.7	0.57
2	Проект 2	1.2	0.7	1.3	0.7	1.0	0.42	0.70
3	Проект 3	0.4	1.0	0.9	0.2	0.6	0.65	0.64
	$N_t$	4	2	3	2			
	N	100						

Итоговый список рекомендаций

Место	Проект
1	Проект 2
2	Проект 3
3	Проект 1

Рис. 4. Алгоритм рекомендации проектов пользователю

В зеленых ячейках таблицы (рис. 4) содержатся коэффициенты TF-IDF, вычисленные по формуле 3, в синих — средние коэффициентов TF-IDF (по строке), в оранжевых — степени схожести названий

проектов с названием темы ВКР, в розовых — коэффициенты рекомендации проектов, вычисленные по формуле 5. В итоговой таблице представлен отсортированный по рекомендуемости список проектов.

#### Заключение

В результате проведенных исследований разработаны алгоритм вычисления сходства текстовых строк, алгоритм нормализации текста, алгоритм рекомендации проектов пользователю. Данные алгоритмы являются частью метода автоматизированного вычисления интегрального показателя сходства участников образовательного процесса по различным атрибутам [8–9].

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Анатомия рекомендательных систем. Часть первая. *Habr*. Режим доступа: https://habr.com/ru/company/lanit/blog/420499/.
- 2. Sidorov G. et al. Soft Similarity and Soft Cosine Measure: Similarity of Features in Vector Space Model. *Computación y Sistemas*. 2014;18(3):491–504.
- 3. Векторная модель. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Векторная\_модель#«Мягкая»\_коси нусная мера.
- 4. Word2vec. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Word2vec.
- 5. Основы Natural Language Processing для текста. *Habr*. Режим доступа: https://habr.com/ru/company/Voximplant/blog/446738/.
- 6. Математические методы анализа текстов Семинар 1. *Machinelearning*. Режим доступа: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/5/53/Mel lain msu nlp sem 1.pdf.
- 7. Морфологический анализатор pymorphy2. *Pymorphy2*. Режим доступа: https://pymorphy2.readthedocs.io/en/0.2/user/index.html.
- 8. Mutairov Sh. I., Bushmeleva K. I. Method and Algorithms for Organizing Joint Activities of Participants in the Educational Process. *Information Innovative Technologies*. Prague: International scientific-practical conference; 2022.
- 9. Мутаиров Ш. И., Бушмелева К. И. Алгоритмы вычисления сходства пользователей социальной сети. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции / под. ред. С. У. Увайсова. Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского; 2022. С. 388.

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-06

# АРХИТЕКТУРА УЧЕБНОЙ СИСТЕМЫ С ИНДИВИДУАЛИЗАЦИЕЙ ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАКОПЛЕННЫХ ДАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ ЗАДАНИЙ

**М.** С. Дьяченко<sup>1,a</sup>, А. Г. Леонов<sup>1,2,3,4, $\delta$ </sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Государственный университет управления, г. Москва, Российская Федерация
 <sup>3</sup> Московский педагогический государственный университет, г. Москва, Российская Федерация
 <sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

<sup>a</sup> ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5809-4981, ♠ mdyachenko@niisi.ru 
<sup>6</sup> ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9622-1526, dr.l@vip.niisi.ru

Аннотация: в условиях первоочередной потребности в технологической независимости Российской Федерации от системы образования ждут гибкого подхода к обучению, при котором каждый студент может полностью раскрыть свой потенциал и получить максимальную пользу от обучения. Для внедрения индивидуализации образования применяются технологии адаптивного обучения, которые построены на регулярной проверке знаний и автоматическом выборе темы и уровня сложности материала, который должен изучать студент для достижения наилучших доступных ему результатов по итогам обучения. Современные адаптивные технологии разрабатываются с использованием больших объемов накопленных данных, которые формируют цифровой след обучения. Авторы применили для исследования процесса внедрения адаптивных технологий имитационное моделирование методом системной динамики. Разработанная авторами модель процесса внедрения описывает систему взаимосвязанных процессов обучения студентов, накопления данных для разработки, реализации адаптивной технологии, апробации адаптивной технологии и ее распространения. По результатам анализа для каждого этапа внедрения предложены архитектурные решения, нацеленные на ускорение процесса внедрения технологий индивидуализированного обучения за счет построения учебной среды, состоящей из локальных систем учебных заведений, единых внешних образовательных платформ и авторских учебных платформ.

*Ключевые слова*: адаптивные технологии, цифровой след обучения, внедрение адаптивных технологий, имитационное моделирование процесса внедрения.

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-14057.

Для цитирования: Дьяченко М. С., Леонов А. Г. Архитектура учебной системы с индивидуализацией обучения на основе накопленных данных результатов автоматизированной проверки заданий. Успехи кибернетики. 2023;4(1):39-48. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-06.

Поступила в редакцию: 08.02.2023. В окончательном варианте: 22.02.2023.

# ADAPTIVE LEARNING SYSTEM ARCHITECTURE WITH ACADEMIC PERFORMANCE TRACKING

M. S. Dyachenko $^{1,a}$ , A. G. Leonov $^{1,2,3,4,b}$ 

- <sup>1</sup> Federal State Institution "Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences", Moscow, Russian Federation
  - <sup>2</sup> The State University of Management, Moscow, Russian Federation
  - <sup>3</sup> Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russian Federation
  - <sup>4</sup> M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
  - <sup>a</sup> ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5809-4981, M mdyachenko@niisi.ru
    - <sup>b</sup> ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9622-1526, dr.l@yip.niisi.ru

Abstract: as the Russian Federation strives for technological independence, the educational system is expected to present a new, agile approach to learning to help each student unleash their potential and get the top value from learning. Adaptive learning is a way of customizing the learning path based on frequent assessment and automatic selection of the content and its level of complexity that the student should study to achieve the best academic performance available. Modern adaptive learning uses large amounts of student digital footprints. The authors applied simulation and system dynamics to analyze the adaptive learning implementation. The model defines a system of interrelated learning processes, data accumulation for adaptive learning support, adaptive technology validation, and dissemination. We also proposed architectural solutions for each stage of the system implementation. The solutions would accelerate the adoption of adaptive learning by building an educational environment consisting of local educational systems, unified external educational platforms, and instructors' educational platforms.

*Keywords*: adaptive technologies, digital learning footprint, implementation of adaptive technologies, simulation of the implementation process.

Acknowledgements: the research is supported by the RFBR grant No. 19-29-14057.

Cite this article: Dyachenko M. S., Leonov A. G. Adaptive learning System Architecture with Academic Performance Tracking. Russian Journal of Cybernetics. 2023;4(1):39–48. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-06.

Original article submitted: 08.02.2023.

Revision submitted: 22.02.2023.

#### Введение

Необходимость технологической независимости Российской Федерации становится стимулом для дальнейшего повышения уровня подготовки выпускников вузов. В глазах работодателей современный молодой специалист-выпускник должен обладать знаниями в фундаментальных областях, знаниями о современном состоянии науки и одновременно навыками применения этих знаний при решении практических задач по созданию конкурентоспособных продуктов. От системы образования ждут гибкого подхода к обучению, при котором каждый студент может полностью раскрыть свой потенциал и получить максимальную пользу от обучения, а не только продемонстрировать освоение дисциплины на уровне выше среднего. Для достижения таких результатов требуется индивидуализация процесса обучения с возможностью (при общих целях учебной группы) обеспечить каждому студенту уникальную программу подготовки, соответствующую его возможностям.

Для реализации индивидуализации образования применяются технологии адаптивного обучения [1], которые построены на регулярной проверке знаний и автоматическом определении темы и уровня сложности материала, который должен изучать студент для достижения наилучших доступных ему результатов по итогам обучения. Результаты частой проверки знаний и данные о характере работы студента в процессе обучения вместе образуют детальный цифровой след обучения [2], который при использовании применительно к отдельному студенту дает возможность повышать эффективность его обучения за счет применения адаптивных технологий [1], а при накоплении данных большого количества студентов служит для обобщения и дальнейшего совершенствования учебных курсов [3]. Наблюдаемое преимущественно экспериментальное распространение адаптивных технологий и ограниченный выбор применяемых технологий вызваны несколькими факторами: большой трудоемкостью разработки учебных материалов [4], высокой сложностью реализации технологии [5, 6], длительностью проверки эффективности и организационной сложностью масштабирования использования адаптивных технологий.

# Постановка проблемы

Высокий спрос на рынке труда на высококвалифицированных специалистов требует от системы образования в сжатые сроки внедрять методы индивидуализации в учебный процесс. Однако современные подходы к внедрению методов индивидуализации обучения не позволяют выполнять эти работы быстро из-за растянутого во времени этапа сбора данных перед разработкой и длительного периода проверки эффективности внедряемых методов до начала широкомасштабного распространения новой технологии. На практике при реализации систем адаптивного обучения исследователи или выбирают решения, не требующие большого объема накопленных данных, например, как в исследовании Кречетова [4, 5], или используются данные тысяч студентов для реализации более сложных алгоритмов с использованием глубокого обучения [6]. Современным развитием преобладающей технологии

адаптивного обучения «отслеживание знаний» (knowledge tracing) является «глубокое отслеживание знаний» (deep knowledge tracing) [7], использующее нейронные сети при оценке уровня подготовки обучаемого. Для автоматизированной оценки уровня подготовки по результатам проверки заданий по программированию лучших результатов позволяет достичь «глубокое отслеживание знаний на основе кода» (code-based deep knowledge tracing) [8], использующее в дополнение к бинарной информации об успешном или неуспешном выполненном задании непосредственно содержание решения, предложенного обучаемым. Для снижения потребности в данных для разработки моделей применяют предобученные модели и доменную адаптацию [9], что позволяет снизить требования к объему необходимых начальных данных при повторном использовании моделей, но для создания предобученных моделей все еще необходим большой объем данных детального цифрового следа обучения. При текущих подходах к сбору данных необходимый объем данных для разработки будет накапливаться годами. Авторы проводили эксперименты по внедрению учебных технологий на основе глубокого обучения [10, 11], по результатам которых можно заключить, что для разработки универсальных решений требуются большие объемы накопленных данных, которые генерируются студентами за несколько лет использования автоматизированной системы обучения. Таким образом, актуальной проблемой является разработка подходов к ускоренному внедрению методов адаптивного обучения, требующих накопления больших объемов данных об учебном процессе, и разработка архитектуры системы, воплощающей эти подходы.

#### Методы исследования

Исследуемый процесс внедрения может быть представлен в виде сложной параметризованной системы, описывающей изменение исследуемого процесса во времени. Для исследования процесса внедрения авторы применяют имитационное моделирование методом системной динамики, использующимся для анализа процессов, например процесса разработки программного обеспечения [12]. Разработанная модель описывает систему взаимосвязанных процессов обучения студентов, накопления данных для разработки, реализации, апробации и распространения адаптивной технологии. Использование имитационного моделирования создает предпосылки для исследования растянутых на годы процессов, протекание которых можно анализировать при различных начальных условиях и характеристиках внедряемых адаптивных методов. К преимуществам системной динамики можно отнести хорошо формализованное визуальное представление сложной системы, описанное в терминах предметной области, которое поддается интерпретации и модификации.

#### Модель процесса внедрения

Исследованная авторами модель описывает процесс внедрения адаптивной технологии, разрабатываемой с использованием накопленных данных об обучении. Процесс внедрения условно разделен на этапы: выбор адаптивной технологии и разработка методологии ее применения в учебном процессе; разработка инструментальных средств для создания учебных материалов этапа накопления данных и разработка средств для сбора данных об обучении с использованием подготовленных материалов; этап накопления данных об обучении и характере взаимодействия обучаемого с учебной системой; реализация адаптивной технологии на основе накопленных данных; разработка средств поддержки внедряемого метода в системе (индивидуализации учебной программы); проведение эксперимента; оценка краткосрочной и долгосрочной эффективности внедряемой адаптивной технологии; масштабирование использования адаптивной технологии. Модель описывает сложную систему взаимосвязанных процессов, таких как обучение студентов, накопление данных для разработки и проверки эффективности, разработки системы и ее масштабирования.

В основе модели обучения лежат потоки и накопители студентов, обучающихся на двух последовательных автоматизированных курсах (рисунок 1). По результатам обучения студенты оставляют цифровой след, данные которого используются для разработки и последующей проверки эффективности адаптивных методов. Обучение на двух последовательных курсах, при условии, что второй курс использует знания, полученные при обучении на первом курсе, создает предпосылки для оценки эффективности новой методики в долгосрочной перспективе. Обучение выполняется на двух потоках, где первых поток описывает обучение студентов автоматизированного курса, а второй поток — на курсе с исследуемой адаптивной технологией. На этапе накопления данных студенты обучаются только на автоматизированном курсе. После накопления необходимых данных и разработки технологии и материалов адаптивного курса поток обучающихся студентов начинает разделяться на два потока

пропорционально пропускной способности автоматизированного и адаптивного курсов.

Пропускная способность автоматизированного курса ограничена уровнем охвата студентов системой автоматизации, с допущением, что охват студентов одним курсом в одном учебном заведении в рамках одного семестра ограничен по организационным причинам. Поэтому для дальнейшего увеличения пропускной способности необходимо масштабирование системы — использование автоматизированного курса в других учебных заведениях. В свою очередь пропускная способность адаптивного курса изменяется исходя из текущего этапа проверки внедряемой технологии. Этапами проверки являются оценка краткосрочной эффективности, оценка долгосрочной эффективности, после чего выполняется контроль результатов широкомасштабного внедрения. Состав и порядок этапов проверки могут варьироваться в зависимости от внедряемой технологии.

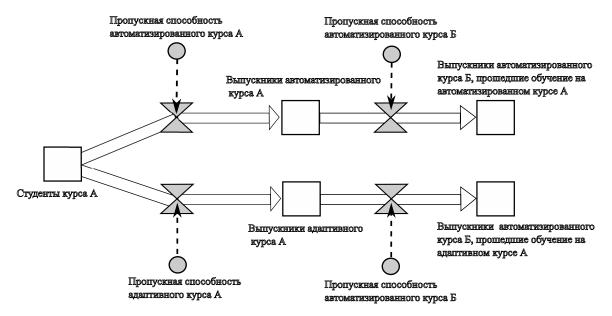


Рис. 1. Модель процесса обучения студентов на автоматизированном и адаптивном курсах

Модель процесса накопления цифрового следа построена в виде входящего и выходящего потоков с накопителем (рисунок 2). Центральный накопитель модели отражает текущий объем накопленных данных о цифровом следе обучения. Модель учитывает эффект устаревания данных, исключая из общего объема цифровые следы обучаемых, полученные раньше, чем за определенное параметром эксперимента время актуальности этих данных. Объем накопленных данных является ограничением для начала процесса разработки адаптивной технологии.

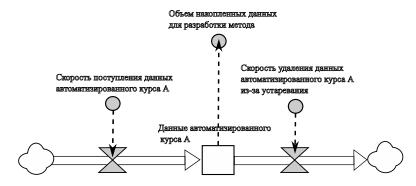


Рис. 2. Модель процесса накопления данных для разработки адаптивной технологии

Аналогично модели накопления данных для разработки построены модели накопления данных для контроля результатов эксперимента (рисунок 3) в краткосрочной перспективе — сразу после завершения курса — и долгосрочной перспективе — по результатам оценки остаточных знаний при обучении на следующем автоматизированном курсе. Поскольку обучение одновременно проходит на автоматизированном и адаптивном курсах, то данные о результатах обучения на автоматизированном курсе могут

быть использованы в качестве контрольных данных для сравнения при оценке эффективности новой технологии.

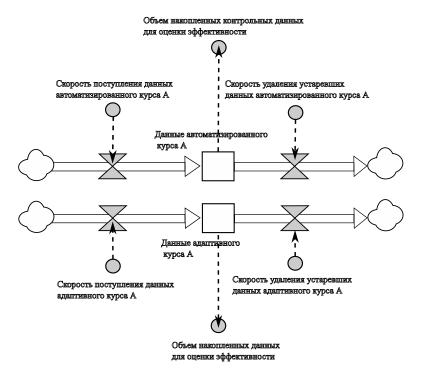


Рис. 3. Модель процесса накопления данных для оценки эффективности

Модель процесса разработки и внедрения описана в виде потока внедрения системы в учебные заведения (рисунок 4), где за каждый период времени происходит определенное количество внедрений — подключений новых учебных заведений к экспериментальной среде. Общее количество подключенных учебных заведений влияет на охват системой одновременно обучающихся студентов, то есть на пропускную способность автоматизированного и адаптивного курсов. Заметим, что это не единственный фактор, определяющий пропускную способность курсов. Пропускная способность курсов ограничена количеством использующих систему преподавателей, а пропускная способность адаптивного курса дополнительно ограничена уровнем его готовности к масштабированию.

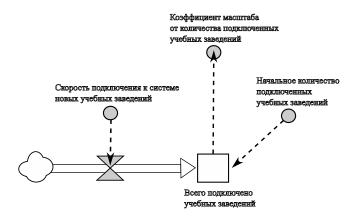


Рис. 4. Модель процесса масштабирования системы

Важным ограничивающим фактором пропускной способности курсов является количество преподавателей, работающих в автоматизированной системе (рисунок 5). Подключение новых учебных заведений создает запрос на подготовку преподавателей для работы в автоматизированной учебной системе, в том числе преподавателей для обучения на адаптивном курсе. Модель отражает организационные ограничения скорости обучения преподавателей для работы в системе, что является существенным ограничением охвата студентов, так как автоматизированная система может быть внедрена в учебном заведении, но ограниченное количество работающих в ней преподавателей не позволит в действительности охватить всех доступных студентов. Допустимое количество студентов, обучаемых одним преподавателем, является параметром моделирования.

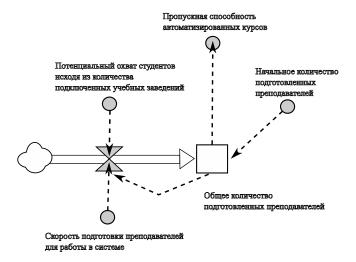


Рис. 5. Модель процесса масштабирования системы

Начальные параметры моделирования определяются характеристиками внедряемых адаптивных технологий и начальным состоянием экспериментальной среды. К параметрам внедряемой технологии относятся минимальные объемы данных, необходимые для начала разработки и для оценки эффективности технологии в краткосрочной и долгосрочной перспективах, а также время устаревания данных. Основными параметрами, характеризующими состояние экспериментальной среды, являются предельная пропускная способность учебного курса одного учебного заведения, количество подключенных учебных заведений и скорость подключения новых учебных заведений, количество подготовленных преподавателей и скорость их подготовки, начальная пропускная способность и скорость масштабирования адаптивного курса на этапе оценки краткосрочной и долгосрочной эффективности, допустимое количество студентов, обучаемых одним преподавателем.

Имитационное моделирование выполнено в системе AnyLogic 8 (https://www.anylogic.ru/).

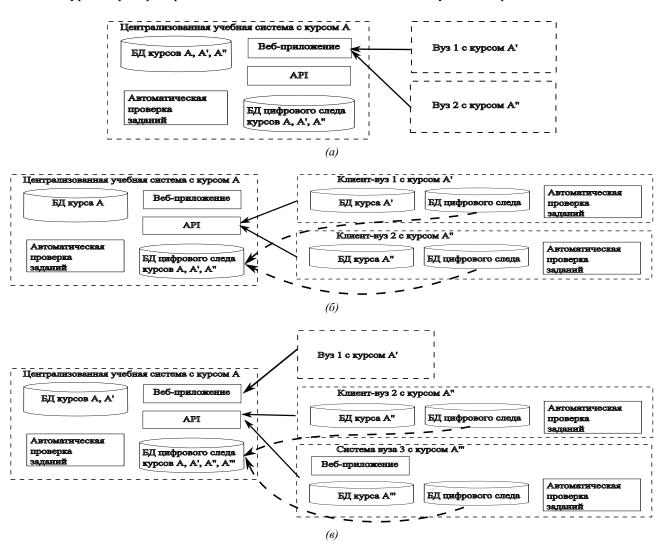
#### Результаты исследования

Целью моделирования было выявить параметры, оказывающие основное влияние на скорость внедрения при условии минимизации используемых ресурсов, участвующих в эксперименте преподавателей и учебных заведений. Экспериментально определено, что основной вклад в скорость внедрения со стороны среды вносит начальный охват обучаемых автоматизированной системой и связанные с этим возможности по подключению к системе новых учебных заведений и подготовке преподавателей.

Интерпретация полученных результатов: процесс накопления данных является основным ограничивающим фактором процесса внедрения, поскольку текущий охват студентов автоматизированным курсом является постоянной величиной, которая не меняется за время учебного семестра. Дополнительно к этому для увеличения охвата необходимо вовлекать в процесс новые учебные заведения, инструктировать преподавателей, дорабатывать автоматизированные курсы под программу новых учебных заведений – это затратная по времени и ресурсам организационно сложная активность.

Сформулируем требования к целевой архитектуре адаптивной системы с учетом каждого этапа внедрения для реализации оптимального процесса внедрения новых технологий.

На этапе накопления данных необходимо обеспечить одновременно обучение на автоматизированном курсе сотен, а в ряде случаев тысяч студентов за счет подключения нескольких учебных заведений. Единый автоматизированный курс может не соответствовать локальным требованиям образовательной программы учебного заведения, поэтому система должна предоставлять техническую возможность вносить изменения в учебный курс под требования каждого учебного заведения, участвующего в накоплении данных. На этом этапе возможны различные варианты архитектуры: централизованная архитектура с сетевым доступом, вариант распределенной архитектуры с использованием локальных ресурсов учебного заведения, гибридная архитектура с обменом автоматизированными курсами и цифровым следом между разнородными учебными системами (рисунок 6). Централизованная архитектура имеет минимальные затраты на внедрение, поскольку для использования системы достаточно проинструктировать преподавателей, подключить учебное заведение к единой системе обучения и доработать курс. Распределенная архитектура подходит для автоматизированных курсов с ресурсоемкой проверкой знаний, масштабирование которых в рамках единой системы ограничено ресурсами учебной системы. Поэтому учебные заведения могут, оставаясь связанными с единой системой, часть процессов выполнять локально, например, проверять ресурсоемкие задания, хранить данные о курсах, накапливать цифровой след. Гибридная архитектура возможна только в условиях стандартизации формата цифрового следа обучения и формата распространения автоматизированных курсов. В ситуации отсутствия общепринятых стандартов потребуется дорабатывать все подключаемые системы для обмена данными с централизованной системой, возникающая при этом необходимость разработки снизит скорость внедрения технологии. Выбор варианта архитектуры на данном этапе зависит от уровня стандартизации информации о цифровом следе и автоматизированных курсов, ресурсоемкости проверки знаний и уровня распространения какой-либо отдельной системы в учебной среде.



**Рис. 6.** Архитектура системы этапа накопления данных для разработки: централизованная (а), распределенная (б) и гибридная (в)

Разработанный адаптивный курс распространяется среди участников эксперимента для накопления данных этапа проверки эффективности внедряемой технологии. На этом этапе требуется меньший охват, но все еще шире, чем возможности отдельного учебного заведения. Поскольку адаптивные технологии требуют выполнения разработки для поддержки реализуемого варианта модификации программы обучения, то оптимальным вариантом будет использование единой централизованной системы для накопления данных на этапе проверки эффективности (рисунок 7). Перед началом эксперимента преподаватели-участники эксперимента проходят инструктаж, но в силу экспериментального харак-

тера технологии для контроля эксперимента система должна предоставлять средства аналитики для раннего выявления отклонений и средства поддержки преподавателей, поскольку фактически преподаватели также обучаются использованию новой технологии и им нужна автоматизированная поддержка при обучении студентов на адаптивном курсе.

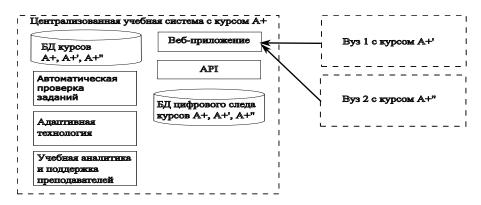


Рис. 7. Архитектура системы этапа накопления данных для проверки эффективности технологии

После подтверждения эффективности технологии начинается ее масштабирование: создаются новые адаптивные курсы за счет появления инструментов для разработки учебных материалов и появляются реализации технической поддержки адаптивной технологии в учебных системах. В системе высшего образования уже используются автоматизированные курсы, работающие в локальных системах учебных заведений, например «Цифровой тьютор» [13], на единых внешних образовательных платформах, например «Открытое образование» (https://openedu.ru/), и на авторских учебных платформах, например «Мирера» [14], поэтому целесообразно дорабатывать существующие курсы, а не создавать их заново в новой системе. Возможны варианты архитектуры с интеграцией адаптивного курса в систему учебного заведения без реализации в ней адаптивной технологии, вариант реализации адаптивной технологии непосредственно в учебной системе и вариант использования учебной системой адаптивной технологии в качестве внешнего сервиса (рисунок 8). Во всех этих вариантах важно продолжать накапливать данные для контроля эффективности адаптивной технологии, поэтому данные о цифровом следе продолжают собираться централизованно. Примерами архитектуры с подключением к внешним системам-поставщикам адаптивных курсов являются системы Squirrel AI (https://squirrelai.com/) и German Tutor [3]. Архитектура с адаптацией курсов за счет внешнего сервиса реализуется с использованием сервиса Knewton (https://www.knewton.com/). Эти адаптивные системы централизованно накапливают данные цифрового следа обучаемых для дальнейшего развития адаптивных методов и улучшения материалов адаптивных курсов.

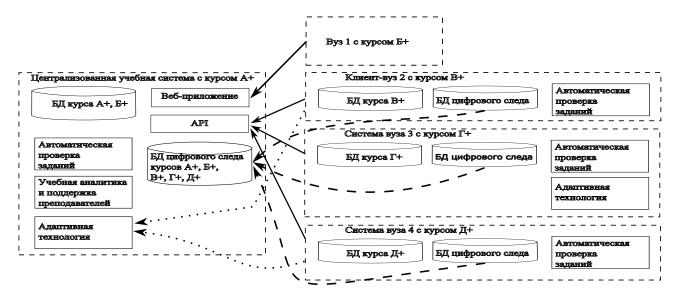


Рис. 8. Архитектура системы этапа масштабирования

#### Выволы

- 1. Предложенную авторами параметрическую модель процесса внедрения возможно использовать для имитационного моделирования внедрения новых адаптивных технологий. Помимо установления общих закономерностей процесса внедрения, модель также полезна при определении этапов, вносящих наибольшие задержки в процесс внедрения, и для поиска оптимального варианта внедрения выбранной технологии. В работе рассмотрен вариант накопления полного цифрового следа студента за все время обучения на курсе, однако предлагаемая модель может быть доработана для моделирования накопления данных при разработке адаптивных технологий, основанных на результатах выполненных заданий (это сотни заданий для каждого студента за семестр), на биометрических данных, данных о поведении студента при взаимодействии с системой и так далее.
- 2. Для ускорения накопления данных необходимо обеспечить широкий охват студентов, достичь которого организационно проще при обучении фундаментальным дисциплинам на младших курсах. По мере специализации студентов на старших курсах сбор данных для адаптивного обучения замедляется за счет снижения общего числа обучающихся студентов по каждому направлению. Для обучения на курсах с малым количеством студентов также могут быть применены адаптивные технологии, например цифровой двойник студента, учитывающий особенности восприятия информации. Цифровой двойник студента создается с использованием данных, полученных на младших курсах, и далее применяется для адаптивного обучения на старших курсах.
- 3. Для каждого этапа внедрения существуют оптимальные конфигурации архитектуры системы, обеспечивающие высокую скорость внедрения. На этапах накопления данных для разработки и проверки эффективности оптимальна централизованная система, на этапе масштабирования важно внедрять адаптивные технологии в существующие автоматизированные курсы, поэтому применимы централизованная архитектура, включая распределенную, и архитектура с внешним сервисом адаптации.
- 4. Распространение адаптивных курсов в централизованной архитектуре предполагает, что преподаватель учебного заведения вносит изменения в единый курс, чтобы приводить его к требованиям учебной программы. Технически это реализуется созданием копии базового курса с последующим ее редактированием или сборкой курса из учебных модулей, хранящихся в централизованном репозитории. Для гибридной архитектуры возникает вопрос о принятии единого стандарта описания адаптивных курсов, без решения которого обмен курсами без их конвертации и переработки затруднителен.
- 5. Вовлечение в процесс обучения на адаптивных курсах большого количества преподавателей из разных учебных заведений повышает требования к инструментам поддержки учебного процесса. Фактически преподаватели осваивают навык обучения студентов с использованием адаптивных технологий, еще недавно считавшихся экспериментальными. В адаптивных курсах требуется подсистема учебной аналитики для непрерывного анализа индивидуальных результатов и своевременного отслеживания отклонений в поведении или ожидаемых результатов студентов. Также необходима подсистема автоматизированной поддержки преподавателя, которая будет обращать внимание преподавателя на потенциальные проблемы и предлагать их решения, исходя из наработанной практики.

### Заключение

Описанная в работе модель учитывает внедрение одного метода индивидуализации на определенном курсе, а на практике параллельно может внедряться несколько различных методов для разных курсов из-за рационального соображения, что параллельные эксперименты сокращают общее время на отбор эффективных учебных технологий. В результате этого исследовательская среда должна учитывать все параллельные эксперименты при формировании выборок обучаемых для сравнения и контроля эффективности, чтобы снизить вероятность некорректных выводов.

Проведенное исследование показало, что для оптимизации внедрения адаптивных технологий важно не только выбрать правильную архитектуру, но и создать полноценную экспериментальную среду. Эта среда за счет объединения большого количества учебных заведений не только ускорит процесс исследования, но и упростит создание и распространение новых адаптивных курсов. До момента создания подобной экспериментальной среды разработчики адаптивных технологий будут вынуждены ограничиваться реализацией методов, не требующих больших объемов накопленных данных.

Авторы на текущем этапе развития не предлагают создавать централизованную систему для учебных заведений, понимая, что в учебном процессе уже применяются платформа «Открытое образование» (https://openedu.ru/), а также различные локальные системы и авторские среды, содержа-

щие наработки, перенос которых в какую-либо единую централизованную систему будет сопряжен с большим объемом работы, а в некоторых случаях потребует создать учебные материалы с нуля. Реалистичным путем развития авторы считают поэтапную трансформацию систем из неадаптивной в адаптивную форму [15] для создания экспериментальной среды, стандартизацию форматов обмена данными о курсах и цифровом следе, разработку инструментов для автоматизированного преобразования неадаптивных курсов в адаптивные, что в свою очередь является предпосылкой для ускорения внедрения новых технологий в образование.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Decoding Adaptive. Режим доступа: https://www.edsurge.com/research/reports/adaptive-learning-close-up.
- 2. Дьяченко М. С., Леонов А. Г. Цифровой след в образовании как драйвер профессионального роста в цифровую эпоху. *E-Management*. 2022;5(4):23–30. DOI: 10.26425/2658-3445-2022-5-4-23-30.
- 3. Heift T. Web Delivery of Adaptive and Interactive Language Tutoring: Revisited. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. 2015. DOI: 10.1007/s40593-015-0061-0.
- 4. Кречетов И. А., Дорофеева М. Ю., Дегтярев А. В. Раскрываем потенциал адаптивного обучения: от разработки до внедрения. *Материалы международной конференции*, *Москва*, 05–06 декабря 2018 года / Отв. ред. Е. Ю. Кулик. Москва: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»; 2018. С. 76–88.
- 5. Кречетов И. А., Романенко В. В. Реализация методов адаптивного обучения. *Вопросы образования*. 2020;2:252–277. DOI: 10.17323/1814-9545-2020-2-252-277.
- 6. Tang H., Jiang G., Wang Q. Personalized Learning Behavior Evaluation Method Based on Deep Neural Network. *Scientific Programming*. 2022;2022:9993271. DOI: 10.1155/2022/9993271.
- 7. Miao D., Jui-Long H., Xu D., Hengtao T., Hao L. Knowledge Tracing: A Review of Available Technologies. *Journal of Educational Technology Development and Exchange*. 2021;14(2):1. DOI: 10.18785/jetde.1402.01.
- 8. Shi Y. et al. Code-DKT: A Code-based Knowledge Tracing Model for Programming Tasks. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2206.03545. DOI: 10.48550/arXiv.2206.03545.
- 9. Cheng S., Liu Q., Chen E. *Domain Adaption for Knowledge Tracing*. Режим доступа: http://arxiv.org/abs/2001.04841. DOI: 10.48550/arXiv.2001.04841.
- Leonov A. G., Matyushin M. A., Dyachenko M. S. Neural Networks for a priori Estimates of the Student Outcomes in Mirera. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;210:475–486. DOI: 10.1007/978-3-030-90843-0 55.
- 11. Дьяченко М. С., Леонов А. Г., Матюшин М. А. Исследование и разработка методов машинного обучения и архитектур нейронных сетей для применения в области проверки. *Труды НИИСИ РАН.* Математическое и компьютерное моделирование сложных систем: теоретические и прикладные аспекты. 2021;11(3):48–53.
- 12. Cocco L., Mannaro K., Concas G., Marchesi M. Simulating Kanban and Scrum vs. Waterfall with System Dynamics. *Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming. XP 2011. Lecture Notes in Business Information Processing* / Eds: Sillitti A., Hazzan O., Bache E., Albaladejo X. Vol. 77. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-20677-1 9.
- 13. Комлева Н. В., Вилявин Д. А. Цифровая платформа для создания персонализированных адаптивных онлайн курсов. *Отврытое образование*. 2020;24(2):65–72. DOI: 10.21686/1818-4243-2020-2-65-72.
- 14. Бесшапошников Н. О., Леонов А. Г., Прилипко А. А. Цифровизация образования новые возможности управления образовательными треками. *Вестник кибернетики*. 2018;2:154–160.
- 15. Дьяченко М. С., Леонов А. Г. Применение подхода поэтапной трансформации при построении системы адаптивного обучения на примере цифровой образовательной платформы Мирера. *Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании: материалы VI Международной науч. конф., г. Красноярск, 20–23 сентября 2022 г.:* в 3 ч. Ч. 3 / под общ. ред. М. В. Носкова. Красноярск: Красноярский государственный педагогический университет им. В. П. Астафьева; 2022. С. 166–172.

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-07

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ «КОНСТРУКТОР ДОКУМЕНТОВ» ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «О,ФРАНЧАЙЗИНГ»

# Д. А. Абраменко $^{a}$ , К. И. Бушмелева $^{6}$

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация abramenkd@gmail.com, <sup>6</sup> bkiya@yandex.ru

Аннотация: статья посвящена проектированию информационной системы управления франчайзингом «О,Франчайзинг» в части проектирования модуля «Конструктор документов». В статье приводится информация об аналогах и их преимуществах/недостатках, требованиях, предъявляемых к модулю, описывается прототип интерфейса.

*Ключевые слова*: франчайзинг, франшиза, интерфейс, конструктор документов, веб-технологии, информационная система, модуль.

*Для цитирования*: Абраменко Д. А., Бушмелева К. И. Проектирование модуля «Конструктор документов» для информационной системы «О,Франчайзинг». *Успехи кибернетики*. 2023;4(1):49–55. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-07.

Поступила в редакцию: 14.02.2023. В окончательном варианте: 17.02.2023.

# DEVELOPMENT OF THE DOCUMENT DESIGNER MODULE FOR THE O, FRANCHISING FRANCHISE MANAGEMENT SYSTEM

# D. A. Abramenko<sup>a</sup>, K. I. Bushmeleva<sup>b</sup>

Surgut State University, Surgut, Russian Federation

<sup>a</sup> A abramenkd@gmail.com, b bkiya@yandex.ru

Abstract: the study presents the development of the *O, Franchising* franchise management system, specifically, the development of the *Document Designer* module. The paper reviews similar solutions, and their advantages/disadvantages, requirements for the module, and the interface prototype.

*Keywords*: franchising, franchise, interface, document designer, web technology, information system, module.

*Cite this article*: Abramenko D. A., Bushmeleva K. I. Development of the Document Designer Module for the O, Franchising Franchise Management System. *Russian Journal of Cybernetics*. 2023;4(1):49–55. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-07.

Original article submitted: 14.02.2023. Revision submitted: 17.02.2023.

#### Введение

Информационная система «О,Франчайзинг» предназначена помочь предпринимателям в подготовке к организации франчайзинговой деятельности своего бизнеса, упростить и ускорить процессы упаковки бизнеса во франшизу. Одним из обязательных этапов является подготовка необходимой документации.

С целью подготовки обязательных юридически значимых документов для пользователей информационной системы (ИС) «О,Франчайзинг» необходимо добавить возможность создания таких документов в системе. Предлагается разработать модуль «Конструктор документов» с учетом специфики области применения в рамках данной информационной системы.

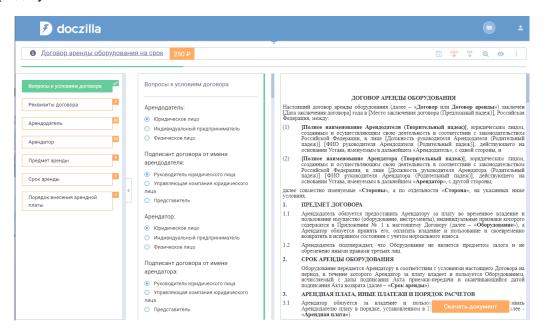
Основная информация по моделированию и проектированию основной схемы и модулей ИС «О,Франчайзинг» приведена в статьях [1, 2]. Целью данной работы является формирование документов в ИС «О,Франчайзинг». В рамках цели поставлены задачи:

- провести обзор аналогов систем;
- выявить требования к модулю «Конструктор документов»;
- описать требования и алгоритмы работы модуля «Конструктор документов».

На первоначальном этапе проектирования модуля «Конструктор документов» был проведен обзор аналогов подобного рода сервисов, который позволил сделать заявленный модуль унифицированным. В статье представлены два конструктора документов, обладающих как достоинствами, так и недостатками.

### Конструктор документов Doczilla

Цифровая платформа, предлагаемая компаниями БФТ и LexBorealis для удобной работы с документами: их формирования, проверки и корректировки. Основная задача данного конструктора — это подготовка и редактирование различных видов документов по выбранным шаблонам. Имеет определенную базу документов. Подготовка документов занимает незначительное время. Как заявлено на сайте, ошибки при составлении документов исключены [3]. На рисунке 1 представлен интерфейс конструктора документов Doczilla.



Puc. 1. Интерфейс конструктора документов Doczilla

Перечислим преимущества и недостатки конструктора документов Doczilla. Преимущества:

- содержит около 330 различных шаблонов документов;
- имеется чат технической поддержки;
- совместный доступ к документам;
- автоматическое заполнение полей переменных. Недостатки:
- отсутствует юридическая информация об актуальности документов;
- отсутствуют подсказки по блокам и переменным;
- отсутствует адаптивный дизайн. Возможность использования только с персонального компьютера;
  - высокая стоимость, от 1000 рублей в месяц при оплате за год.

### Конструктор документов FreshDoc

Представляет собой веб-решение для создания юридических документов. Основная задача данного конструктора — это подготовка и редактирование различных видов документов по выбранным шаблонам [4].

Имеет расширенную базу документов. На составление сложных документов уйдет примерно 15 минут, простых — несколько секунд: конструктор задает вопрос, пользователь выбирает ответ, заполняет реквизиты и другие данные [5]. На рисунке 2 представлен интерфейс конструктора документов FreshDoc.

Перечислим преимущества и недостатки конструктора документов FreshDoc.

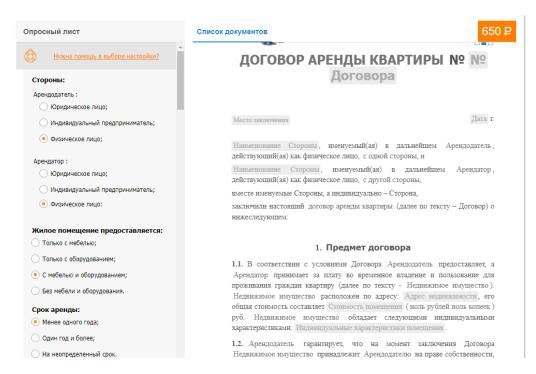


Рис. 2. Интерфейс конструктора документов FreshDoc

### Преимущества:

- веб-платформа с адаптивным дизайном;
- содержит более 500 различных шаблонов документов;
- совместный доступ к документам;
- автоматическое заполнение полей переменных;
- создание собственных шаблонов;
- интеграция по АРІ с различными системами учета;
- информация об актуализации шаблона;
- подсказки для пользователя;
- экспорт документов в Word/PDF;
- защита от копирования.

### Недостатки:

• высокая стоимость, от 2200 рублей в месяц.

#### Требования к конструктору документов для ИС «О,Франчайзинг»

Конструктор документов в ИС «О,Франчайзинг» будет представлен в конструкторе франшиз в виде одного из модулей и является обязательным этапом упаковки франшизы. Перечислим основные требования, предъявляемые к конструктору документов:

- веб-платформа с адаптивным дизайном;
- автоматическое заполнение полей переменных:
  - о из данных других модулей;
  - о из данных, выбранных пользователем;
- информация об актуализации шаблона;
- наличие подсказок для пользователя;
- экспорт документов в Word/PDF;
- защита от копирования;
- удобство при работе пользователя (usability).

Приведем краткую характеристику вышеуказанных требований, которые будут учитываться при проектировании модуля ИС.

Адаптивный дизайн конструктора документов достигается за счет использования CSS, который позволяет настроить все аспекты документа в зависимости от размера рабочей области.

Автоматическое заполнение полей из других модулей. Перед запуском редактора документов в хранилище переменных документа добавляются данные, введенные из других разделов. Данные переменные будут неизменяемы в конструкторе документа, их можно настроить только в соответствующих разделах конструктора франшизы.

Информация об актуализации шаблона выбирается из хранилища данных по дате последнего изменения шаблона.

Подсказки для пользователя содержат информацию о конкретных переменных (сведения законодательного характера и прочую информацию), хранящиеся в модуле нормативно-справочной информации.

Экспорт документов в Word/PDF используется для удобства использования документа пользователем в дальнейшем.

Защита от копирования может быть выполнена средствами CSS и JS на стороне сайта с конструктором франциз.

# Проектирование конструктора документов

Для описания вариантов применения конструктора используется диаграмма деятельности. На ней изображены потоки передачи управления между узлами. Процесс использования конструктора документов представлен на рисунке 3.

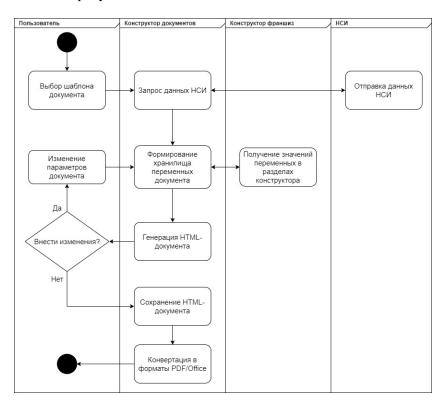


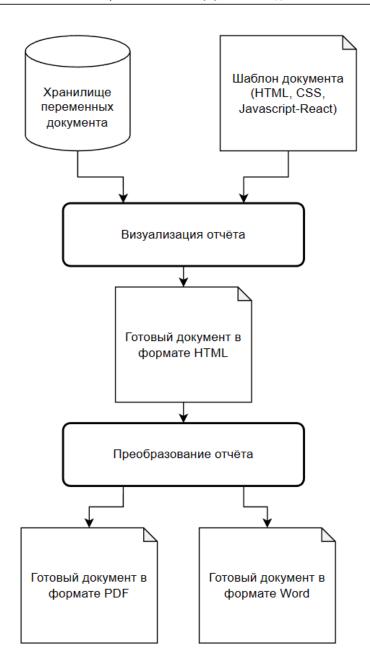
Рис. 3. Варианты использования конструктора документов

В диаграмме используются следующие модули. «Конструктор франшиз» — хранит информацию, ранее введенную пользователем в систему при работе с конструктором франшиз. На основе этих данных большинство переменных автоматически принимают необходимые значения.

«НСИ» (нормативно-справочная информация) – содержит информацию о шаблонах документов и их переменных.

Для разработки модуля «Конструктор документов» предлагается использовать следующий стек веб-технологий:

- HTML:
- CSS;
- Javascript;
- React.



**Рис. 4.** Алгоритм функционирования модуля «Конструктор документов»

Алгоритм функционирования модуля «Конструктор документов» представлен на рисунке 4.

Шаблон документа — содержит HTML-разметку документа, стили в формате CSS, а также встроенный JavaScript-код, определяющий поведение документа при изменении переменных из хранилища переменных документа.

В хранилище переменных документа могут находиться как переменные из редактора документов, так и параметры, полученные из других разделов конструктора франшиз. Технически представляет собой словарь (набор «ключ-значение»), к которому можно обратиться с помощью кода внутри шаблона документа.

При визуализации отчета происходит выполнение кода шаблона на языке JavaScript (с использованием фреймворка React), в результате работы которого формируется HTML-разметка документа. Готовый HTML-файл может быть преобразован в форматы PDF и Office путем конвертации.

В качестве конвертера из HTML в PDF/Word предлагается использовать Pandoc. Pandoc — универсальная утилита для работы с текстовыми форматами. Основная сфера применения — форматирование технических текстов [6, 7].

Входные форматы: docs, doc, xml и другие. Выходные форматы: на основе HTML.

# Структура шаблона документа

Шаблон документа с технической точки зрения будет представлять собой React-компонент. Компонент в React представляет собой структуру, содержащую HTML-разметку документа, а также встроенный код, позволяющий управлять разметкой в зависимости от переданных на вход данных.

Рассмотрим создание шаблона документа на примере следующей задачи. Нужно реализовать параграф, описывающий срок действия договора коммерческой концессии. Он может быть как бессрочным, так и действовать до конкретной даты. На рисунке 5 представлена структура переменных для шаблона.

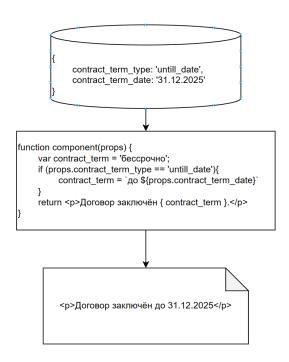


Рис. 5. Структура переменных для шаблона

На вход компонента-параграфа передается JSON-объект, содержащий тип договора: бессрочный или со сроком. Если выбран тип договора со сроком, то дополнительно необходимо указать дату окончания договора.

При выполнении JavaScript-функции на выходе будет получена готовая HTML-разметка с учетом переменных. При этом компонент обладает свойством реактивности, что позволяет автоматически перегенерировать документ при изменении входных параметров. При этом отсутствует необходимость в дополнительном программировании.

К примеру, в императивном программировании присваивание:

$$a = b + c, (1)$$

будет означать, что переменной a будет присвоен результат выполнения операции b+c с использованием текущих (на момент вычисления) значения переменных. Позже значения переменных b и c могут быть изменены без какого-либо влияния на значение переменной a.

Гибкая система компонентов React позволяет:

- строить иерархию компонентов, что дает возможность делать шаблоны типовых HTML-блоков;
- менять содержимое в зависимости от любого описанного кодом условия;
- с помощью программных циклов делать любые перечисления, что позволит строить списки и таблицы.

Для пользователя предлагается вариант usability веб-интерфейса. Даже умный человек чувствует себя подчас дураком, пытаясь сообразить, на какую кнопку нажать, чтобы включить свет, как разжечь духовку и что делать с дверью — тянуть, толкать или сдвигать. Причина тому — дизайн, не соответствующий нуждам пользователей [8].

Usability — это удобство пользования интерфейсом, когда пользователь не испытает трудностей. Интерфейс должен быть простым, в нем должны применяться знакомые пользователям элементы. В качестве прототипа будущей разработки веб-интерфейса предложен следующий вариант, который представлен на рисунке 6.

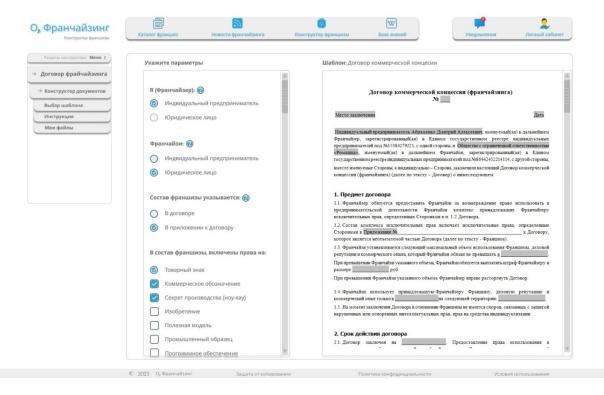


Рис. 6. Прототип веб-интерфейса модуля «Конструктор документов»

Левая часть экрана модуля «Конструктор документов» содержит меню: «Выбор шаблона», «Инструкция», «Мои файлы». Рабочая область (основная часть экрана) содержит информацию о параметрах, которые заполняются как пользователем, так и автоматически. Формируется шаблон обрабатываемого документа с указанием изменяемых переменных.

# Заключение

Осуществленное проектирование отвечает всем поставленным требованиям, описанным в статье. В дальнейшем планируется непосредственно разработка модуля «Конструктор документов» и встраивание его в информационную систему «О,Франчайзинг».

# ЛИТЕРАТУРА

- 1. Абраменко Д. А., Бушмелева К. И. Методы и этапы организации франчайзинговой деятельности посредством реализации информационной системы. *Инновационные, информационные и коммуни-кационные технологии*: Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции. Москва, 2021. С. 16–21.
- 2. Абраменко Д. А., Бушмелева К. И. Проектирование информационной системы «О,Франчайзинг». *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*: Сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции. Москва, 2022. С. 34–38.
- 3. Конструктор документов и договоров «Doczilla». Режим доступа: https://doczilla.ru/.
- 4. Конструктор документов. Режим доступа: https://www.freshdoc.ru/.
- 5. БФТ-Холдинг. Режим доступа: https://bftcom.com/products/doczilla-pro/doczilla-pro/.
- 6. Pandoc. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Pandoc.
- 7. *Реактивное программирование*. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Peaктивное\_ программирование.
- 8. Норман Д. Дизайн привычных вещей / пер. с англ. А. Семиной. М.: Манн, Иванов и Фербер; 2018.

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-08

# О НЕЯВНЫХ СООБЩЕСТВАХ НА ГРАФЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

#### А. А. Чеповский

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Российская Федерация

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0938-3517, aachepovsky@hse.ru

Аннотация: в работе рассматриваются текущие и перспективные задачи анализа графов, представляющих сложные сети взаимодействующих объектов. Описаны предметные области, для которых актуальны данные модели, рассматриваются практика, проблемы анализа графов социальных сетей и выделения на них неявных сообществ. Обсуждаются основные алгоритмы выделения сообществ на графах и проблема тестирования качества получаемых разбиений. Автором предложены перспективные, на его взгляд, направления развития данной тематики для графов, полученных при импорте данных из реальных социальных сетей. Показана актуальность подходов, предложенных в предыдущих работах автора.

*Ключевые слова*: сложные сети, граф взаимодействующих объектов, выделение неявных сообществ, анализ социальных сетей.

Для цитирования: Чеповский А. А. О неявных сообществах на графе взаимодействующих объектов. Успехи кибернетики. 2023;4(1):56–64. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-08.

Поступила в редакцию: 05.12.2022. В окончательном варианте: 17.02.2023.

#### IMPLICIT COMMUNITIES DEFINED ON THE GRAPH FOR INTERACTING OBJECTS

#### A. A. Chepovskiy

National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russian Federation ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0938-3517, 🔎 aachepovsky@hse.ru

Abstract: the paper considers the problems of analyzing graphs that represent complex networks of interacting objects. The relevant domains are described, social network graph analysis and implicit community detection are considered. The key graph-based community detection algorithms and the quality assessment of their results are discussed. The author proposed promising development trends using the graphs representing actual social networks. The relevance of the approaches proposed in the author's previous works is also highlighted.

Keywords: complex networks, graph for interacting objects, implicit community detection, social networks analysis.

Cite this article: Chepovskiy A. A. Implicit Communities Defined on the Graph for Interacting Objects. Russian Journal of Cybernetics. 2023;4(1):56–64. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-08.

Original article submitted: 05.12.2022. Revision submitted: 17.02.2023.

### Введение

Многие системы, состоящие из большого числа объектов, можно изучать, представляя их как сетевые структуры, образованные взаимодействием их элементов между собой. Речь идет, например, о биологических, технологических, телекоммуникационных, социальных сетях, которые принято объединять под термином «сложные сети» («complex networks»). Анализ построенных на их основе графов взаимодействующих объектов является актуальной на сегодняшний день проблемой, в ходе исследования которой возникают задачи построения алгоритмов и методов выделения ключевой информации, разработки прикладного программного обеспечения для обработки данных.

# Графы взаимодействующих объектов в разных предметных областях

Существенный интерес к методам анализа графов взаимодействующих объектов наблюдается в предметных областях, связанных с вопросами информационной безопасности, криминальных расследований, борьбы с экстремизмом и терроризмом. Также интерес к таким методам имеется и для задач, возникающих в биологии, экономике, социологии, маркетинге и многих других дисциплинах.

Проблемы из таких разнообразных предметных областей объединяет то, что в реальных задачах исследуемые модели сводятся к описанию сетевого взаимодействия, требующего анализа устройства достаточно больших по размеру и сложных по структуре графов [1]. Для графов, представляющих реальные сети, часто можно выделить подграфы с высокой плотностью ребер внутри них и сравнительно низкой плотностью ребер между такими подграфами. Разбиение графа на такие подграфы и называется выделением неявных сообществ [1–4].

Телекоммуникационные сети могут быть представлены как граф взаимодействующих объектов. Сеть контактов абонентов мобильной связи, которая обычно обозначается термином «биллинг», может представлять из себя как «классический» биллинг, включающий звонки и SMS-сообщения абонентов, так и соединения в рамках мобильного Интернета. Анализ биллинга является актуальной задачей информационных технологий и задач информационной безопасности [5–7]. Задачи обеспечения информационной безопасности информационно-коммуникационных сетей рассматриваются в [8, 9].

Одной из задач анализа биллинга является использование его результатов для раскрытия преступлений [6]. Целью такого анализа соединений между абонентами в следственной ситуации, когда фигуранты дела неизвестны, является как геопозиционирование абонентов, так и очерчивание круга абонентов, которые потенциально могут иметь отношение к совершенному преступлению. Для решения таких задач полезно выделять неявные сообщества в графе телекоммуникационного взаимодействия.

Биологические сетевые структуры могут представлять собой, например, пищевые сети, метаболические сети, белок-белковые сети взаимодействия [10]. Анализ биомолекулярных сетей актуален для понимания молекулярного механизма биологических систем, в диагностике, лечении и разработке лекарств для сложных заболеваний или расстройств [11].

Важно также отметить применение сетевого анализа как набора инструментов для решения задач реинжиниринга программного обеспечения при проектировании информационных систем [12, 13].

Встречаются и иные задачи, для которых применяется анализ структуры графа взаимодействующих объектов, в том числе включающий в себя выделение неявных сообществ. Например, для оценки социально-экономических моделей городского хозяйства с целью инфраструктурного и транспортного планирования, разработки политики в области недвижимости и социально-экономического развития [14].

В работе [15] сетевые методы анализа применяются для описания геофизических транспортных процессов (например, океанических или атмосферных циркуляций), продемонстрирована их эффективность в оценке транспортировки и смешивания течений в геофизических расчетах.

В качестве примера использования сетей для маркетинговых целей можно привести работу [16], в которой рассматриваются подходы по проектированию сети клиентов на основе рейтинговых данных участников электронной коммерции.

Сетевые структуры могут быть построены на основе данных с сайтов, позволяющих своим пользователям взаимодействовать друг с другом, например, по профессиональной направленности. В таких случаях выделение неявных сообществ на основе взаимодействия пользователей актуально для достижения разных задач. Так, в [17] приведен пример анализа части сети LinkedIn и выявления сообществ среди практиков в сфере социальной работы. Часто сетевые структуры с последующим выделением в них сообществ строятся на основании данных с сайтов размещения вакансий и поиска работников [18].

Всемирную информационно-телекоммуникационную сеть Интернет можно интерпретировать как граф, вершинами которого являются сайты, а ребрами — гиперссылки между ними. Моделирование сети Интернет в общем случае связано с описанием взаимодействия с помощью разреженных графов, что позволяет разным авторам рассматривать, в первую очередь, модели случайных графов для описания такого взаимодействия [1, 19]. Возможно проводить исследование графов, построенных на основе отдельных тематических фрагментов сети Интернет. Например, в работах [20, 21] рассматриваются сайты академических учреждений РАН и их разбиение на сообщества.

Еще одной задачей, возникающей при анализе сетевых структур, является поиск часто встречающихся подграфов в заданном графе, что представляет теоретический интерес для задач обнаружения групп атак в социальных сетях [22, 23]. Также актуальна и постановка схожей задачи поиска часто встречающихся вхождений шаблонов в базах данных, содержащих много небольших графов.

### Задачи анализа графов социальных сетей

Одним из самых актуальных направлений исследований сетевых систем является анализ социальных сетей, в том числе социальных онлайн-сетей [3, 4, 24–33]. При построении графов тут в качестве вершин обычно рассматриваются аккаунты пользователей. Ребра и вес на них (при необходимости) определяются, как правило, действиями пользователей каждой конкретной социальной сети: отношениями «дружбы», «подписки», простановкой «лайков» или иными подобными средствами коммуникации. В результате получается граф взаимодействующих объектов. Структура построенных на основе реальных данных графов сложных сетей, к которым относятся и графы социальных сетей, имеет свои особенности. Для таких графов характерны в том числе следующие свойства: маленький диаметр графа (эффект «малого мира»), высокие значения кластерного коэффициента (эффект «транзитивности»), медленно спадающее распределение вершин по их степеням («большой хвост распределения»), структура неявных сообществ [1–3, 33].

Замечено, что асимптотическая зависимость распределения вершин для больших степеней («в хвосте») близка к степенному закону. Т.е. у небольшого числа вершин в таких сетях высокие показатели их степени. Поэтому иногда в литературе такие сети называются безмасштабными (scale-free networks), так как распределение сохраняется и в локальных фрагментах — при «изменении масштаба». Это, в свою очередь, связано с тем, что степенная функция является единственным решением соответствующего функционального уравнения [33, 34].

Среди сложных сетей, в свою очередь, обычно выделяют социальные, биологические, технологические [35]. Графы социальных сетей обладают содержательной структурой неявных сообществ, представляющих группы пользователей, объединенных либо активной коммуникацией друг с другом, либо по набору дополнительных признаков (например, это могут быть однокурсники, подписчики определенных тематических сайтов). Тут возникают задачи выделения неявных сообществ, выявления лидеров мнений, исследований в части распространения информации по сети.

Построение моделей распространения информации и информационного влияния в социальных сетях рассматривалось в [26, 27]. В этих работах предложены методы описания информационных потоков и психологических операций для задач информационного противоборства. Обзор инструментария для анализа распространения информации и информационного влияния в социальных сетях, включая выделение неявных сообществ, можно найти в работах [9, 26, 27].

Задачи выявления путей распространения информации, повышения уровня защищенности от информационно-психологического воздействия в социальных сетях, в том числе выявления источников и ретрансляторов информации, освещены в [36]. В данной работе авторы приводят методику построения графа распространения информации, но далее построенный так граф предлагается рассматривать методами визуального анализа, что накладывает определенные ограничения на размер обрабатываемых так графов.

Для социологов важной задачей является мониторинг общественных изменений посредством анализа структуры явных и неявных групп пользователей в социальных сетях. Как пример решения таких задач в [37] рассматривается метод, названный его авторами «алгоритмом зерновой кластеризации». Данный метод соединяет в себе этапы экспертного определения целевых групп и их дополнения на основе данных из социальной сети. Выделение сообществ в графах взаимодействующих объектов онлайн социальных сетей дает возможность обнаруживать лидеров мнений и экспертов, осуществлять управление и контроль деятельности групп, представляющих угрозу для национальной безопасности [9].

В научной литературе рассматривается множество классических мер центральности вершины графа [2, 3, 38, 39], характеризующих степень ее влияния на другие вершины (центральность по посредничеству, центральность по Кацу, Pagerank и т.д.). Возможности применения таких характеристик для анализа графов социальных сетей представлены в [40] на примере алгоритмов ранжирования вершин. При этом классические меры центральности учитывают различные локальные или глобальные свойства вершины, но не учитывают структуру сообществ графа. Между тем, для целей сетевого анализа часто важно учитывать именно структуру сообществ, поэтому в последнее время внимание исследователей обращено на основанные на сообществах меры центральности (community-aware centrality measures) [41]. Это означает, что центральности вершин считаются после выделения сообществ и учитывают отдельно инцидентные этой вершине ребра внутри сообщества и между сообществами.

В обзоре [41] приведены исследования 7 таких мер центральности, правда, стоит отметить, что все рассмотренные меры центральности и эксперименты приведены для невзвешенных графов.

# Методы выделения сообществ на графах

Как уже было сказано ранее, под выделением неявных сообществ на графе подразумевается разбиение графа на подграфы, такое что плотность связей внутри этих подграфов сильно выше плотности связей между ними. Понятие сообщества на графах встречается во множестве работ. При этом можно рассмотреть и задачу выделения на графе пересекающихся сообществ. В этом случае подразумевается наличие общих вершин, принадлежащих сразу двум или более сообществам. Алгоритмы поиска неявных сообществ в указанном смысле являются актуальной темой публикаций последних 20 лет [42–45].

Один из иных интуитивно понятных способов выделения сообществ на графе — поиск такого его разбиения, при котором максимизируется/минимизируется некоторый функционал, характеризующий качество этого разбиения. Такой функционал, называемый модулярностью, может сравнивать разбиение графа с некоторой «нулевой гипотезой», заключающейся в том, что ребра распределены случайно, но сохранены некоторые свойства исходного графа. Значение этого функционала будет зависеть от выбранной «нулевой гипотезы», такая была предложена в работе [46–48], а модулярность, рассматриваемая в ней, носит название авторов (Ньюмана–Гирвана). Данная модель сохраняет исходные степени вершин графа, и при этом предполагает случайное распределение ребер между ними, т.е. нет закономерностей в распределении плотности ребер внутри и между выделенными сообществами. Такая модулярность может быть использована для взвешенных графов и является одной из наиболее популярных характеристик качества разбиения графа на сообщества, за последние 20 лет ей было посвящено множество работ [49].

Подходы по оптимизации данного функционала качества за эти годы были предложены разные, это и жадный алгоритм, и алгоритм симуляция отжига. Одним из быстрых алгоритмов, основанных на активном использовании модулярности Ньюмана–Гирвана, является аггломеративный иерархический алгоритм Louvain быстрой оптимизации модулярности [50]. Данный алгоритм находит разбиения больших графов с высокой степенью модулярности за короткое время, кроме того, предоставляет информацию о полной иерархической структуре сообществ, тем самым давая доступ к различным расширениям выделенных сообществ.

Другой популярный подход к выделению сообществ заключается в имитации условного динамического процесса на графе. С точки зрения структуры сообществ малая плотность связей между ними влечет за собой с большей вероятностью протекание процесса внутри сообществ, чем переход между ними. Самый популярный на сегодня алгоритм, реализующий данный подход [51–53], предусматривает сжатие информации о динамическом процессе, проходящем в графе, а именно о случайном блуждании. Этот динамический алгоритм сводит задачу нахождения наилучшего структурного разбиения графа на сообщества к задаче оптимального сжатия информации о структуре графа. Для вычисления показателя качества заданного разбиения используется энтропия, описывающая среднюю длину кодового слова, взятого для кодирования вершины. Показатель качества полученного разбиения, выраженный через энтропию, может быть легко подсчитан для любого разбиения. Обновление и пересчет этого показателя являются быстрой операцией. В дальнейшем были предложены пути развития этого алгоритма, в том числе и для пересекающихся сообществ [54–56].

Встречаются и иные подходы к выделению сообществ. Например, теоретико-игровой метод в работе [57], где рассматривается выявление академических сообществ российских ученых в сети Интернет. А работа [45] посвящена алгоритму выделения пересекающихся сообществ с помощью рассмотрения полных подграфов заданного размера и его применению в биологических сетях.

В недавней статье [49] исследователей, стоящих у истоков текущей теории сложных сетей, в том числе в вопросах выделения сообществ, были указаны некоторые актуальные, по мнению авторов, аспекты. Как одна из задач указана проблема предела разрешения («resolution limit») [58] — ограничения снизу по размеру выделяемого в большой сети сообщества, что мешает находить маленькие сообщества на крупных графах.

Решение такой проблемы видится в реализации корректного итерационного перехода от анализа исходного графа к отдельным его подграфам.

### О тестировании алгоритмов выделения сообществ

Отсутствие в общем случае строгого определения для сообщества и однозначного решения задачи выделения как пересекающихся, так и непересекающихся сообществ ставит проблему оценки корректности и эффективности работы алгоритмов и методов выделения сообществ на графах взаимодействующих объектов.

Стандартным тут может быть подход по генерации случайных графов для проведения на них тестирования алгоритмов и оценки полученного разбиения на сообщества. Первая предложенная в свое время для анализа сетей модель — модель Эрдеша—Реньи, плохо соответствует реальным сложным сетям, особенно социальным (онлайн) сетям [1–3, 35]. Модель Эрдеша—Реньи симулирует эффект «малого мира», но остальные свойства реальных сложных сетей в этой модели не реализуются, например, «эффект транзитивности», а биноминальное (пуассоновское для больших графов) распределение степеней вершин нехарактерно для графов реальных сетей.

Для описания растущих сетей, которые развиваются со временем и которые нельзя описать моделью Эрдеша-Реньи, рассматриваются различные варианты модели Барабаши-Альберт. Модель Барабаши-Альберт при добавлении каждой новой вершины реализует метод предпочтительного присоединения между новой вершиной и старыми. Он заключается в построении ребер между новой вершиной и старыми с вероятностями, пропорциональными степеням старых вершин. В графах, сгенерированных по модели Барабаши-Альберт, больше вершин с малой степенью, чем в случайных графах; более вероятны вершины с высокой степенью. Т.е. распределение степеней вершин ближе к степенному закону. При этом модель симулирует и эффект «малого мира». Однако данная модель не реализует «эффект транзитивности»: при увеличении размера генерируемого графа его кластерный коэффициент существенно падает [33]. Это противоречит свойству реальных сложных сетей.

Возникает запрос на генерацию графов, подходящих под условия сложных сетей. На первых этапах работы над алгоритмами нахождения сообществ на графах небольших размеров использовались составленные простые тесты. Наиболее известный тест был предложен Гирваном и Ньюманом (тест GN) [42] и содержал графы размером 128 вершин, которые разбиваются на сообщества одинаковых размеров. Но вершины у таких сгенерированных графов имели примерно одинаковые степени, а сообщества состояли из одинакового числа вершин. Таким образом, данная модель также была далека от реальных сложных сетей.

Многие разработчики применяют LFR-модели [59] генерации случайных графов, обладающих структурой сообществ. Получаемые в рамках этих моделей графы обладают распределением степеней вершин по степенному закону. При этом размеры встроенных при построении сообществ также реализуются моделью по степенному закону, что нельзя однозначно отнести к положительным или отрицательным свойствам данных моделей.

Логичным развитием разработки моделей генерации графов для тестирования алгоритмов является выбор меры качества для сравнения получаемых алгоритмами разбиений сгенерированного графа на сообщества и исходно встроенного в него разбиения на сообщества. Можно выделить три наиболее распространенных подхода для решения этой задачи [3]. Первый из них основан на сравнении полученных сообществ для пар вершин, т.е. подсчете числа таких пар вершин, попавших в единое сообщество при обоих разбиениях, и попавших в разные сообщества в обоих разбиениях, и попавших в разные сообщества только при одном из разбиений. Наиболее известным из первой группы является индекс Жаккара. Для такого сравнения характерен недостаток, который заключается в том, что расхождения на локальном фрагменте графа могут дать существенное снижение общего результата для всего графа.

Второй возможный подход для сравнения двух разбиений состоит в поиске наибольших пересечений пар сообществ из разных разбиений. Но у этого подхода имеются свои недостатки, связанные с небольшими пересечениями сообществ из разных разбиений.

Третий вариант решения данной задачи основан на методах из теории информации и заключается в предположении о том, что для близких разбиений достаточно сообщить небольшое количество информации, чтобы получить из одного другое. Одним из наиболее популярных тут является подсчет NMI — нормированной взаимной информации (Normalized Mutual Information) [60]. Во многих работах последних лет сравнение результатов алгоритмов произведено с помощью NMI, между тем выявлены и недостатки у этой меры качества, связанные со случайными разбиениями на большое число маленьких сообществ. Поэтому ряд авторов предлагают свои корректировки для NMI [61].

Как было ранее отмечено, реальные сложные сети обладают рядом свойств, которые не во всех моделях генерируемых графов реализуются. Более того, как показывают разные исследования, сложные сети тоже нельзя считать однородными, ибо имеются характерные для того или иного типа сетей (социальные, биологические, технологические) топологические свойства [1, 2, 35]. Кроме этого, стоит отметить, что во многих работах последних 20 лет детально рассматриваются случаи невзвешенных графов, тогда как для социальных сетей важную роль играют атрибуты ребер и вершин [62]. Например, интенсивность взаимодействия между пользователями удобно описывается взвешенными графами. Поэтому важным видится исследование моделей импорта данных из реальных сетей и построение на их основе взвешенных графов взаимодействующих объектов [63-66]. Распределение степеней вершин в таких графах слабо соответствует существующим на текущий момент искусственным моделям. В работе [49] также поднят как актуальный вопрос об оценке качества выделения сообществ на сгенерированных графах. Авторами отмечено, что сравнение с заранее заданным разбиением на искусственных сетях дает сбой для разреженных графов, что как раз характерно и для социальных сетей.

Для оценки качества выделения сообществ на графе взаимодействующих объектов для социальных онлайн-сетей целесообразным видится анализ получаемых сообществ на основе тематических, социально-политических факторов, обработки текстов и иных характеристик и атрибутов пользователей. Это поможет решать проблему оценки качества разбиения при импорте данных из телекоммуникационных сетей с помощью исследования атрибутивных данных вершин и ребер выделенных сообществ. Пример такого использования дан в работе [67], где проводится психолингвистический анализ текстов и их характеристик у получившихся сообществ для предлагаемого в статье метода их выделения.

#### Заключение

За прошедшие годы текущего века многие ученые по всему миру развили теорию сложных сетей: были построены различные их модели, исследованы свойства таких сетей, разработаны алгоритмы выделения неявных сообществ. Между тем стоит отметить, что для реальных сетей во многих случаях ключевыми, оказывающими влияние на их топологию, являются свойства объектов и связей межу ними. Поэтому одним из актуальных направлений дальнейших исследований видится эффективный импорт данных из реальных сетей с последующим построением взвешенных графов взаимодействующих объектов, выделением на них неявных сообществ, в том числе с использованием механик, основанных на переходе от анализа всего исходного графа к его подграфам. Примеры такого подхода, названные «комбинированный метод», «метод ядра», «метод Галактик», были предложены в работах автора [67–69].

С точки зрения актуальных прикладных задач, в том числе задачи выявления лидеров мнений, информационного воздействия и распространения информации в социальных сетях целесообразно применять сочетание алгоритмического выделения сообществ с психолингвистическим анализом полученных в них текстов. Также перспективным видится поиск основанных на сообществах мер центральности для взвешенных графов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Евин И. А. Введение в теорию сложных сетей. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2010;2(2):121–141. DOI: 10.20537/2076-7633-2010-2-2-121-141.
- 2. Newman M. E. J. Networks: An Introduction. Oxford University Press; 2010. 784 p.
- 3. Fortunato S. Community Detection in Graphs. *Physics Reports*. 2010;486(3):75–174.
- 4. Aggarwal C. Social Network Data Analytics. NY:Springer New York; 2011. 502 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-8462-3.
- 5. Рабинович Б. И. Кластерный анализ детализаций телефонных переговоров. *Системы и средства информатики*. 2007;17:52–78.
- 6. Себякин А. Г. Анализ информации о соединениях между абонентами, использование его результатов в раскрытии и расследовании преступлений. *Полицейская и следственная деятельность*. 2018;4:29-38. DOI: 10.25136/2409-7810.2018.4.27992.
- 7. Семенищев И. А., Синадский А. Н., Синадский Н. И., Сушков П. В. Синтез массивов биллинговой информации на основе статистико-событийной модели взаимодействия абонентов сетей сотовой связи. Вестник УРФО. Безопасность в информационной сфере. 2018;1(27):47–56.

- 8. Еремеев И. Ю., Татарка М. В., Шуваев Ф. Л., Цыганов А. С. Анализ мер центральности вершин сетей на основе метода главных компонент. *Труды СПИИРАН*. 2020;19(6):1307-1331. DOI: 10.15622/ia.2020.19.6.7.
- 9. Кириченко Л., Радивилова Т., Барановский А. Обнаружение киберугроз с помощью анализа социальных сетей. *International Journal "Information Technologies & Knowledge"*. 2017;11(1):23–48.
- 10. Rahiminejad S., Maurya M. R., Subramaniam S. Topological and Functional Comparison of Community Detection Algorithms in Biological Networks. *BMC Bioinformatics*. 2019;20:212.
- 11. Wu F., Chen L., Wang J., Li M., Wang H. Biomolecular Networks for Complex Diseases. *Complexity*. 2018:4210160.
- 12. Šubelj L., Bajec M. Ubiquitousness of Link-Density and Link-Pattern Communities in Real-World Networks. *The European Physical Journal B*. 2012;85(1):32.
- 13. Šubelj L., Bajec M. Group Detection in Complex Networks: an Algorithm and Comparison of the State of the Art. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 2014;397:144–156.
- 14. Landsman D., Kats P., Nenko A. Sobolevsky S. Zoning of St. Petersburg Through the Prism of Social Activity Networks. *Procedia Computer Science*. 2020;178:125–133.
- 15. Ser-Giacomi E., Legrand T., Hernández-Carrasco I., Rossi V. Explicit and Implicit Network Connectivity: Analytical Formulation and Application to Transport Processes. *Physical Review E*. 2021;103(4).
- 16. Banerjee S. Designing and Connectivity Checking of Implicit Social Networks from the User-Item Rating Data. *Multimedia Tools and Applications*. 2021;80(17):26615–26635.
- 17. Castillo-de Mesa J., Gómez-Jacinto L. Connectedness, Engagement, and Learning through Social Work Communities on LinkedIn. *Psychosocial Intervention*. 2020;29(2):103–112.
- 18. Skobtsov Y. A., Obolensky D. M., Shevchenko V. I., Chengar O. V. Building And Analysing A Skills Graph Using Data From Job Portals. *Economic and Social Trends for Sustainability of Modern Society (ICEST-III 2022). European Proceedings of Social and Behavioural Sciences.* European Publisher. 2022;127:147-162. DOI: 10.15405/epsbs.2022.08.17.
- 19. Райгородский А. М. Модели Интернета: Учебное пособие. Долгопрудный: Интеллект; 2019. 64 с.
- 20. Ермолин Н. А., Мазалов В. В., Печников А. А. Теоретико-игровые методы нахождения сообществ в академическом Вебе. *Труды СПИИРАН*. 2017;6(55):237–254. DOI 10.15622/sp.55.10.
- 21. Мазалов В. В., Никитина Н. Н., Печников А. А. О сообществах в коммуникационных графах. *Вероятностные методы в дискретной математике*: расширенные тезисы докладов X Международной Петрозаводской конференции. 2019. Петрозаводск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук»; 2019:99–100.
- 22. Черемисинов Д. И., Черемисинова Л. Д. Поиск часто встречающихся подграфов. *BIG DATA Advanced Analytics: Collection of Materials of the Fourth International Scientific and Practical Conference*, Minsk, Belarus, May 3–4, 2018. Minsk: BSUIR. 2018:171–176.
- 23. Rehman S. U., Kexing Liu K., Tariq Ali T., Nawaz A., Fong S. J. A Graph Mining Approach for Ranking and Discovering the Interesting Frequent Subgraph Patterns. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2021;14(152). DOI: 10.1007/s44196-021-00001-4.
- 24. Базенков Н. И., Губанов Д. А. Обзор информационных систем анализа социальных сетей. *Управ- ление большими системами*: сб. трудов. 2013:357–394.
- 25. Батура Т. В. Методы анализа компьютерных социальных сетей. Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2012;10(4):13–28.
- 26. Батура Т. В., Копылова Н. С., Мурзин Ф. А., Проскуряков А. В. Методы анализа данных из социальных сетей. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии.* 2013;11(3):5–21.
- 27. Губанов Д. А., Новиков Д. А., Чхартишвили А. Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. М.: Физматлит; 2010. 228 с.
- 28. Borgatti S. P., Everett M. G., Johnson J. C. *Analyzing Social Networks*. SAGE Publications Limited; 2013. 304 p.
- 29. Coscia M., Rossetti G., Giannotti F., Pedreschi D. Demon: a Local-First Discovery Method for Overlapping Communities. *Proceedings of the 18th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining.* 2012:615–623.
- 30. Gaisbauer F., Pournaki A., Banisch S., Olbrich E. Ideological Differences in Engagement in Public Debate

- on Twitter. Plos One. 2021;16(3):e0249241. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249241.
- 31. Kanavos A., Voutos Y., Grivokostopoulou F., Mylonas P. Evaluating Methods for Efficient Community Detection in Social Networks. *Information*. 2022;13(5), 209.
- 32. Yang J., Leskovec J. Defining and Evaluating Network Communities Based on Ground-Truth. *Knowledge and Information Systems*. 2015;42(1):181–213.
- 33. Гусарова Н. Ф. *Анализ социальных сетей. Основные понятия и метрики.* СПб.: Университет ИТ-МО; 2016. 67 с.
- 34. Newman M. E. J. The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Review*. 2003;45(10):167–256.
- 35. Евин И. А., Хабибуллин Т. Ф. Социальные сети. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2012;4(2):423–430. DOI: 10.20537/2076-7633-2012-4-2-423-430.
- 36. Проноза А. А., Виткова Л. А., Чечулин А. А., Котенко И. В., Сахаров Д. В. Методика выявления каналов распространения информации в социальных сетях. *Вестник Санкт-Петербургского университета*. *Прикладная математика*. *Информатика*. *Процессы управления*. 2018;14(4):362–377. DOI: 10.21638/11702/spbu10.2018.409.
- 37. Градосельская Г. В., Щеглова Т. Е., Карпов И. А. Картирование политически активных групп в Фейсбуке<sup>1</sup>: динамика 2013–2018 гг. *Вопросы кибербезопасностии*. 2019;32(4):94–104. DOI: 10.21681/2311-3456-2019-4-94-104.
- 38. Borgatti S. P. Centrality and Network Flow. *Social Networks*. 2005;27(1):55–71. DOI: 10.1016/j.socnet.2004.11.008.
- 39. Щербакова Н. Г. Меры центральности в сетях. Проблемы информатики. 2015;2(27):18-30.
- 40. Печенкин В. В., Королев М. С., Димитров Л. В. Прикладные аспекты использования алгоритмов ранжирования для ориентированных взвешенных графов (на примере графов социальных сетей). *Труды СПИИРАН*. 2018;6(61):94–118. DOI: 10.15622/sp.61.4.
- 41. Rajeh S., Savonnet M., Leclercq E. et al. Comparative Evaluation of Community-Aware Centrality Measures. *Qual Quant.* 2022. DOI: 10.1007/s11135-022-01416-7.
- 42. Girvan M., Newman M. E. J. Community Structure in Social and Biological Networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2002;99(12):7821–7827.
- 43. Clauset A., Newman M. E. J., Moore C. Finding Community Structure in Very Large Networks. *Physical Review E*. 2004;70:066111.
- 44. Radicchi F., Castellano C., Loreto V., Cecconi F., Parisi D. Defining and Identifying Communities in Networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2004;101(9):2658–2663.
- 45. Palla G., Derenyi I., Farkas I., Vicsek T. Uncovering the Overlapping Community Structure of Complex Networks in Nature and Society. *Nature*. 2005;435:814–818.
- 46. Newman M. E. J., Girvan M. Finding and Evaluating Community Structure in Networks. *Physical Review E*. 2004;69:026113.
- 47. Newman M. E. J. Fast Algorithm for Detecting Community Structure in Networks. *Physical Review E*. 2004;69:066133.
- 48. Newman M. E. J. Modularity and Community Structure in Networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2006;103(23):8577–8582.
- 49. Fortunato S., Newman M. E. J. 20 years of Network Community Detection. Nat. Phys. 2022;18:848-850.
- 50. Blondel V. D., Guillaume J.-L., Lambiotte R., Lefebvre E. Fast Unfolding of Communities in Large Networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*. 2008;10:P10008.
- 51. Rosvall M., Bergstrom C. T. An Information-Theoretic Framework for Resolving Community Structure in Complex Networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2007;104(18):7327–7331.
- 52. Rosvall M., Bergstrom C. T. Maps of Information Flow Reveal Community Structure in Complex Networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2008;105(4):1118–1123.
- 53. Rosvall M., Bergstrom C. T., Axelsson D. The Map Equation. *The European Physical Journal Special Topics*. 2009;178(1):13–23.
- 54. Esquivel A., Rosvall M. Compression of Flow Can Reveal Overlapping Modular Organization in Networks. *Physical Review X*. 2011;1:021025.
- 55. Rosvall M., Esquivel A., Lancichinetti A., West J., Lambiotte R. Memory in Network Flows and Its

 $<sup>^1</sup>$  Meta Platforms Inc. признана экстремистской организацией на территории РФ. — Прим. ред.

- Effects on Spreading Dynamics and Community, Nature Communications, 2014;5:4630.
- 56. Domenico M., Lancichinetti A., Arenas A., Rosvall M. Identifying Modular Flows on Multilayer Networks Reveals Highly Overlapping Organization in Interconnected Systems. *Physical Review X*. 2015;5:011027.
- 57. Мазалов В. В., Никитина Н. Н. Метод максимального правдоподобия для выделения сообществ в коммуникационных сетях. Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2018;14(3):200–214.
- 58. Fortunato S., Barthélemy M. Resolution Limit in Community Detection. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2007;104:36–41.
- 59. Lancichinetti A., Fortunato S., Radicchi F. Benchmark Graphs for Testing Community Detection Algorithms. *Physical Review E*. 2008;78:046110.
- 60. Danon L., Diaz-Guilera A., Duch J., Arenas A. Comparing Community Structure Identification. *J. Stat. Mech.* 2005;P09008.
- 61. Amelio A., Pizzuti C. Is Normalized Mutual Information a Fair Measure for Comparing Community Detection Methods? *Proceedings of the 2015 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining 2015.* Association for Computing; 2015.
- 62. Коломейченко М. И., Поляков И. В., Чеповский А. А., Чеповский А. М. *Методы визуального* анализа графов. М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ»; 2016. 167 с.
- 63. Лещев Д. А., Сучков Д. В., Хайкова С. П., Чеповский А. А. Алгоритмы выделения групп общения. *Вопросы кибербезопасности*. 2019;32(4):61–71. DOI: 10.21681/2311-3456-2019-4-61-71.
- 64. Попов В. А., Чеповский А. А. Модели импорта данных из Твиттера. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии.* 2021;19(2):76–91. DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-2-76-91.
- 65. Воронин А. Н., Ковалева Ю. В., Чеповский А. А. Взаимосвязь сетевых характеристик и субъектности сетевых сообществ в социальной сети Твиттер. *Вопросы кибербезопасности*. 2020;37(3):40–57. DOI: 10.21681/2311-3456-2020-03-40-57.
- 66. Попов В. А., Чеповский А. А. Модели импорта данных из мессенджера Telegram. *Вестник Новоси-бирского государственного университета*. *Серия: Информационные технологии*. 2022;20(2):60–71. DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20-2-60-71.
- 67. Попов В. А., Чеповский А. А. Выделение неявных сообществ на графе взаимодействия Теlegram-каналов с помощью «метода Галактик». *Труды ИСА РАН*. 2022;72(4):39-50. DOI: 10.14357/20790279220405.
- Чеповский А. А., Лобанова С. Ю. Комбинированный алгоритм выделения сообществ в графах взаимодействующих объектов. Бизнес-информатика. 2017;42(4):64–73. DOI: 10.17323/1998-0663.2017.4.64.73.
- 69. Chepovskiy A. A., Leshchev D. A., Khaykova S. P. Core Method for Community Detection. *Complex Networks & Their Applications IX. Volume 1: Proceedings of the Ninth International Conference on Complex Networks and Their Applications COMPLEX NETWORKS 2020.* Springer. 2021:38–50.

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-09

#### ГИПОТЕЗА ЭВЕРЕТТА И КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ СОЗНАНИЯ

# А. Ю. Кухарева $^a$ , В. В. Еськов $^\delta$ , Н. Ф. Газя $^a$

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация a alja.87@mail.ru, <sup>6</sup> firing.squad@mail.ru, <sup>в</sup> safety.ot86@gmail.com

Аннотация: в 1957 году X. Эверетт предложил гипотезу о параллельных реальностях, которую М.В. Менский использовал для построения квантовой теории сознания. В рамках этого подхода можно объяснить сознательное и бессознательное, а также создать некоторые представления об интуиции и об инсайте. В настоящей работе предлагается развитие идей Эверетта и Менского для моделирования эвристической работы мозга. Одновременно предлагается трактовка суперпозиции и декомпозиции в работе нейросетей мозга. Представлена идея работы искусственных нейросетей с позиции квантовой теории сознания.

Ключевые слова: хаос, сознание, эффект Еськова-Зинченко.

Для цитирования: Кухарева А. Ю., Еськов В. В., Газя Н. Ф. Гипотеза Эверетта и квантовая теория сознания. *Успехи кибернетики*. 2023;4(1):65–71. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-09.

Поступила в редакцию: 13.02.2023. В окончательном варианте: 21.03.2023.

# H. EVERETT HYPOTHESIS AND QUANTUM THEORY OF CONSCIOUSNESS

# A. Yu. Kukhareva<sup>a</sup>, V. V. Eskov<sup>b</sup>, N. F. Gazya<sup>c</sup>

Surgut State University, Surgut, Russian Federation
<sup>a</sup> alja.87@mail.ru, <sup>b</sup> firing.squad@mail.ru, <sup>c</sup> safety.ot86@gmail.com

Abstract: in 1957, H. Everett proposed a many-worlds interpretation, which M.V. Mensky used to build the quantum theory of consciousness. This approach can explain the conscious and the unconscious, and give some ideas about intuition and insight. In this study, we built on Everett's and Mensky's ideas to simulate the heuristic operation of the brain. We also proposed an interpretation of the superposition and decomposition of the brain neural network operation. This paper presents new ideas for creating artificial neural networks in terms of the quantum theory of consciousness.

Keywords: chaos, consciousness, Eskov-Zinchenko effect.

Cite this article: Kukhareva A. Yu., Eskov V. V., Gazya N. F. H. Everett Hypothesis and Quantum Theory of Consciousness. Russian Journal of Cybernetics. 2023;4(1):65–71. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-09.

Original article submitted: 13.02.2023. Revision submitted: 21.03.2023.

#### Ввеление

В 1957 году X. Эверетт [1] представил гипотезу о существовании многих реальностей на уровне макромира и микромира. Квантовый объект в этой гипотезе может описываться как суперпозиция многих функций состояния ( $C_1\psi_1+C_2\psi_2+\ldots$ ). На макроуровне это может быть представлено как существование многих вселенных (одновременно). Фактически мы говорим о суперпозиции многих параллельных реальностей.

Первоначально идеи Эверетта не воспринимались серьезно, но ведущие физики мира вновь и вновь обращались к этой идее. В конце 20-го века российский физик М.Б. Менский представил эти идеи в виде квантовой концепции сознания. При этом идеи Эверетта получили определенную поддержку в идеях Менского [2, 3].

Идеи Менского активно поддержал нобелевский лауреат В. Л. Гинзбург, который предоставил Менскому трибуну ведущего физического издания («Успехи физических наук» (УФН)). Серия публикаций М.Б. Менского в УФН позволила узнать главные идеи этого ученого [2, 3]. В итоге мы сейчас имеем некоторую концепцию, которая требует доказательства.

Именно это сейчас и производится нами в данной статье. При этом мы реально представляем экспериментальный и теоретический материал по вопросу квантовой теории сознания. Это следует из

эффекта Еськова-Зинченко (ЭЕЗ) и новой теории хаоса-самоорганизации. Последняя основана на ЭЕЗ и неопределенностях 1-го и 2-го типов [4–13].

#### Квантовая теория сознания в представлениях М. Б. Менского

Прежде всего, надо отметить, что квантовая механика описывает квантовые объекты. Для них справедлив принцип неопределенности Гейзенберга и основной аппарат квантовой механики, в котором объекты описываются возможными функциями  $\psi$  и плотностями вероятности (из расчета функции  $\psi^2$  и т.д.).

С позиции квантовой механики квантовый объект (например, электрон, протон и т.д.) является суперпозицией многих состояний. При проведении физического эксперимента происходит редукция, т.е. из этого множества реализуется конкретное (одно) состояние квантового объекта. Происходит декомпозиция объекта и появляется знание о частице. Это общепринятая копенгагенская интерпретация перехода: суперпозиция – редукция.

Математически это выглядит следующим образом. Первоначально квантовый объект описывается суперпозицией многих функций состояния. Иными словами, мы имеем состояния  $C_1 \mathrm{I} \psi_1 > + C_2 \mathrm{I} \psi_2 > + \cdots + C_n \mathrm{I} \psi_n >$ . При редукции появляется определенность и частица может принимать одно значение (точка на фотопластинке).

Механизмы такого перехода (декомпозиции) пока еще мало изучены, и это составляет серьезную проблему для квантовой механики и всей современной физики. Обычно такую редукцию многократно повторяют и получают суперпозицию этих редукций в виде интерференционной картины.

Например, это наблюдается при дифракции электронов на одной или на двух щелях. В итоге мы имеем дифракционную картину, которая представляет сначала квантовую суперпозицию, а затем декомпозицию (редукцию) в виде чередования максимумов и минимумов на фотопленке.

Во всех таких процессах для нас существенное математическое значение имеет первоначальная суперпозиция (многих возможных состояний), а затем редукция. Механизмы такой декомпозиции (появления интерференционной картины) проявляются во множественном повторении этого процесса. Результат всегда повторяем.

Зарегистрировать траекторию одного электрона — задача практики при повторных опытах (с пучком электронов или фотонов). Это все удается легко в опыте. При повторении опыта ни одна траектория не регистрируется! Главное во всем этом — повторяемость всех этих опытов, их воспроизведение.

Именно на все эти процессы и обратил внимание М.Б. Менский в своих публикациях по квантовой теории сознания. Он предположил, что исходно (в нейросетях мозга — НСМ человека) существует множество различных состояний. Это может быть подобно квантовой композиции  $(C_1 \mathrm{I} \psi_1 > + C_2 \mathrm{I} \psi_2 > + \cdots + C_n \mathrm{I} \psi_n >)$ .

При принятии конкретного решения человеком происходит декомпозиция в виде перехода от множества состояний к одному (конкретному). Такой переход происходит в режиме от бессознательного к сознательному многократно. В итоге человек из множества решений (конечного выбора) переходит к одному (конкретному). Этот подход подобен редукции в квантовой механике. Это дает возможность увидеть перспективы квантовой механики в оценке сознания.

В такой трактовке остается загадкой, как это все происходит. Как происходит переход от бессознательного к сознательному? Как человек выбирает именно это (конечное) состояние? Как он делает такую редукцию (декомпозицию)? Есть ли сходство с квантовым объектом?

Очевидно, что ответы на эти вопросы имеют принципиальное значение для понимания механизмов работы нейросетей мозга человека (HCM). Для понимания связи бессознательного и сознательного механизмов редукций возможно применение аппарата квантовой механики.

Сейчас совершенно очевидно, что в бессознательном скрыты многочисленные варианты решения конкретной проблемы. Но переход от бессознательного в сознательное происходит пока по неизвестным нам правилам и законам. В рамках ЭЕЗ и новой теории хаоса-самоорганизации мы пытаемся дать описание основным законам такого перехода [14-25].

#### Законы сознания

Следует сразу отметить, какое именно сознание проявляется в различных поступках, принятиях решений, в различных действиях. Очень часто мы говорим о произвольных движениях, которые тоже

происходят осознанно. В целом, существует много примеров, которые говорят о проявлении сознания.

Очевидно, что проще всего механизмы сознания можно анализировать по организации произвольных движений. Например, когда мы совершаем вертикальные колебательные движения пальцем. Это проявляется в виде теппинга и регистрируемых теппиграмм (ТПГ) [4–12].

Как было доказано в эффекте Еськова-Зинченко (ЭЕЗ), осознанные функции (теппинг) несущественно отличаются от непроизвольных движений (тремор). В последнем случае мы имеем повышение доли статистики в 2-3 раза (и не более). Однако говорить о какой-либо точности в организации вертикальных движений пальца нельзя.

Это доказанный факт в ЭЕЗ для ТМГ и ТПГ [26–29]. Оба этих движения происходят хаотично с очень малой долей стохастичности (выборки ТМГ и ТПГ для одного человека почти не совпадают). Это доказывает, что хаос является главным маркером в организации как произвольных (ТПГ), так и непроизвольных (ТМГ) движений. Любое осознанное движение происходит без повторений (хаос Еськова) [15–21].

При изучении организации любых движений мы одновременно выясняем, и как работает наш мозг, нейронные сети мозга. Сравнение выборок 15-ти электроэнцефалограмм (ЭЭГ), записанных у одного человека в покое (или при выполнении упражнений), показали ЭЕЗ, т.е. отсутствие статистической устойчивости выборок ЭЭГ. Это означает, что наш мозг, его НСМ не эргодичны.

И само движение, и работа НСМ происходят всегда хаотично. Выборки ТМГ, ТПГ, ЭЭГ демонстрируют отсутствие эргодичности. Их невозможно произвольно статистически повторить два раза подряд или вообще повторить на любом интервале времени  $\Delta t_2$  (после регистрации на предыдущем интервале времени  $\Delta t_1$ ). Фактически мы сейчас говорим о завершении дальнейшего применения статистики в биомедицине [5–6, 20].

В итоге мы сейчас доказали, что первичный хаос (при организации движений) возникает именно в НСМ. Именно ЭЭГ первично показывает статистическую неустойчивость, а затем уже мышца (в виде электромиограмм (ЭМГ)), конечности, работа сердца и многие другие функции показывают ЭЕЗ.

Это является первым глобальным выводом из ЭЕЗ при изучении организма человека. Хаос — основа работы мозга (его HCM) и работы любых функций организма человека. Но этот хаос (потеря эргодичности) не имеет ничего общего с динамическим хаосом Лоренца. Его природа базируется на существовании самоорганизации в работе биосистем и мозга человека. Это первый постулат сознания. Наше сознание имеет хаотичную природу [4–11, 18–20].

Очевидно, что все эти многочисленные (якобы произвольные движения — теппинг) процессы осуществляются в режиме многих повторений. Однако эти повторения происходят без повторений, как это описывал Н.А. Бернштейн в своей монографии от 1948 года. Повторений нет с позиций детерминизма (нет точных траекторий конечности, колебаний биопотенциалов (ЭЭГ, ЭМГ), работы сердца и т.д.). Нет повторений и с позиции стохастики (ЭЕЗ).

При этом работа НСМ всегда сопровождается повторяющимися реверберациями (в виде ЭЭГ). Эти реверберации (ЭЭГ) многочисленны и хаотичны. Для живого мозга характерно отсутствие статистических повторений в величине биопотенциалов мозга x = x(t), здесь x(t) — физическая величина.

Всегда (для живого мозга) мы имеем  $dx/dt \neq 0$ . Если dx/dt = 0 и x(t) = const, то это уже мертвый мозг. В итоге для описания работы мозга (как в режиме сознательного, так и бессознательного), его НСМ, мы должны руководствоваться рядом законов (сознания!): отсутствие покоя и постоянные хаотические реверберации x(t), т.е. биопотенциалы мозга, его НСМ имеют особые свойства (ЭЕЗ).

Подчеркнем, что сознательное и бессознательное имеют общие законы, которые базируются на хаосе (нет эргодичности) и на многочисленных повторениях (реверберациях для ЭЭГ, ЭМГ, ТМГ, работы сердца и т.д.). Хаос и реверберации — это базовые свойства работы мозга как в режиме бессознательного, так и в режиме сознания. Очевидно, что эти основные свойства должны количественно учитываться при моделировании НСМ.

С этих позиций существенных различий между сознательным и бессознательным не существует. Биопотенциалы (их траектория прохождения в HCM) как бы вмещают в себя многочисленные состояния будущего сознательного. Однако редукция этих многих состояний ( $C_1 \mathrm{I} \psi_1 > + C_2 \mathrm{I} \psi_2 > + \cdots + C_n \mathrm{I} \psi_n >$ ) происходит тоже не точно (как мы бы этого хотели). Эта редукция подчиняется закону ЭЕЗ (т.е. без статистических повторений). Любое движение уникально.

В описании многих «сознательных» актов движения, решения той или иной задачи человеком мы не можем использовать аппарат детерминистской (например, в виде теории динамических систем (ТДС)) или стохастической науки (ДСН). Все эти модели и методы (в ДСН) рассчитаны на точках и выборках.

Мы не можем описывать сознательное и бессознательное в рамках всей современной науки (ДСН), т.к. имеем дело со статистически неустойчивыми биосистемами. Их невозможно повторить точно (в рамках ТДС) или приблизительно (в рамках стохастики). Одна точка (в ТДС) или выборка не может описать биосистему (все это уникальные величины).

В итоге мы имеем третий фундаментальный закон для описания сознательного и бессознательного состояния (работы) мозга человека. Любой сознательный акт происходит в режиме хаоса, т.е. многократных хаотических повторений. Процесс сознательного принятия решения происходит в режиме бессознательного (первоначально) на базе многих ревербераций (ЭЭГ и  $dx/dt \neq 0$ ), и покой в НСМ отсутствует.

### Проблема инсайта

В науке очень часто описывают появление того или иного открытия в режиме инсайта. Часто такой процесс принятия решения (создание периодической таблицы, доказательство теоремы, создание новой теории) представляют как внезапное озарение. Считается, что это может происходить без логических усилий, а затем уже сознание человека создает логику рассуждений (осознанно) часто бессознательно!

Очевидно, что это все является иллюзией, т.к. человек перед этим собирает (порой многие годы) определенную информацию. Он ее постоянно анализирует и осмысливает (повторяет в разных комбинациях и т.д.). Все это осуществляется многократно, в режиме многих ревербераций (повторных попыток). Это происходит как в режиме сознательного мышления, так и в режиме бессознательного.

Мозг человека, его НСМ, многократно пытается решить поставленную (сознательно!) задачу. Он многократно повторяет ее решение, как на бессознательном, так и на сознательном уровне. С одного раза ничто не решается, мозг надо готовить к решению проблемы и многократно повторять попытки решения [20].

Мы считаем, что мозг гения отличается от мозга глупого человека тем, что для дурака все уже понятно. Он с первого раза делает заключение (обычно это неверное решение) и затем это неверное решение представляет окружающим. Сообщество глупых людей единогласно принимает глупое решение.

В социуме такой дурак наносит колоссальный вред, т.к. общество становится на неправильный путь развития. Так было с Хрущевым (и всем СССР) в 1961 году, когда в нашей стране ликвидировали подсобные (частные) хозяйства и в 1963-1964 гг. начался голод (хлеб выдавали по карточкам) на фоне построения коммунизма.

Дурак никогда и ни в чем не сомневается и не раскаивается. Умный человек — это сомневающийся человек, а гений представляет нам уже парадоксальные (неочевидные и противоречивые) решения. А.С. Пушкин точно определил: «... и опыт — сын ошибок трудных и гений — парадоксов друг».

Инсайт в науке — это новые теории, открытия, создание принципиально новых технологий, аппаратов и устройств. Примеров ему тысячи, а мы напомним, что 3E3 и новую теорию хаоса-самоорганизации (ТХС) до сих пор игнорируют. Лидирует мнение о ДСН и ее применении в изучении биосистем.

Идет элементарное замалчивание проблемы, уникальности любых выборок любых параметров  $x_i(t)$  любых функций организма человека.

Последние 150–200 лет вся биология, медицина, психология, экология и другие науки о жизни базировались на описании своих процессов в рамках традиционной статистики. И от этого никто в мире не желает уходить. Все пользуются теорией динамических систем (ТДС) и статистикой и считают, что этого достаточно в описании живых систем. Возникает иллюзия завершенности описания мироздания и нет необходимости в 3-й науке. Нет и тени сомнений.

Подчеркнем, что аналогичное научное безразличие человечество проявляло к работам Н.А. Бернштейна (все игнорируют его гипотезу о «повторении без повторений») и к работе W. Weaver. Последний вообще вывел все системы третьего типа (СТТ), т.е. биосистемы, за пределы детерминистской

и стохастической науки (ДСН). При этом Weaver требовал создания новой (третьей после ДСН) науки для живых систем [10–19].

W. Weaver в 1948 году требовал вывести все СТТ за пределы ДСН, и сейчас мы это делаем на базе новой ТХС. Доказан ЭЕЗ, потеря однородности выборок любой группы испытуемых и реальность неопределенности 1-го типа. В этом случае статистика показывает совпадение выборок, но ТХС их различает.

Очевидно, что новое понимание базовых принципов работы мозга открывает особые перспективы в познании человека, законов его организации и поведения. Становится очевидным, что теория Эверетта и представления Менского находят экспериментальное подтверждение в наших экспериментальных работах. Переход от бессознательного к сознательному подобен квантовой редукции (реализация конкретного состояния из множества других, т.е. переход от квантовой запутанности к редукции).

#### Обсуждение

Изучение мыслительных функций человека (и в частности, его сознания) наталкивается на существенные трудности. Они связаны с огромным числом элементов (нейронов) и их состояний (в среднем около 2000 синапсов на каждом нейроне (это реальный хаос СТТ)). Поэтому само сознание человека реализуется очень большим числом состояний и решений со стороны НСМ.

Простейшие примеры во всем этом многообразии — это организация движений. Очевидно, что движения могут происходить без участия сознания, т.е. бессознательно. Число таких примеров огромно (постуральный тремор, тремор при болезни Паркинсона, непроизвольные подергивания конечности (во сне и т.д.)). Это все бессознательные движения.

Однако и сознательные движения во многом происходят бессознательно. Бегун на 100 м не думает о том как движется его левая или правая нога. У него есть главная цель — достичь финишной ленты. Являются ли его движения ног и рук (при беге) произвольными (или непроизвольными) движениями? Ответы на эти тривиальные вопросы далеко не тривиальные.

В новой ТХС (при сравнении ТМГ и ТПГ как непроизвольных и произвольных движений) мы доказали, что в реализации этих движений (с позиции стохастики) нет принципиальных различий. Оба этих движения происходят непроизвольно (как бы бессознательно). Чем вообще (объективно) можно оценить произвольное или непроизвольное движение?

Что может гарантировать сознание в организации движений? Высокую точность — но как это можно зарегистрировать? В физике и технике точность оценивается повторяемостью. Если испытуемый точно повторит движение — то это гарантия участия сознания (или нет?)?

В наших опытах с ТМГ и ТПГ мы говорим о крайне низкой точности организации этих движений. Человек даже статистически не может повторить эти движения! Вопрос объективной регистрации участия сознания (конкретного человека) в организации этих движений остается открытым. Сознание слабо влияет на статистическое повторение этих движений.

Это можно понять таким образом: каждое движение организуется НСМ, но волна возбуждений проходит по разным цепям нейронов (с разной силой и длительностью). Процесс организации любого движения происходит хаотично, и сами команды хаотичны (по силе, времени, пространственной организации). Мы не можем повторить (точно) эти команды.

Тем более это управление не может быть точно реализовано, т.к. мышечные волокна тоже находятся в хаосе. Этот хаос вторичен, но он интерферирует с хаосом команд от НСМ. Происходит суперпозиция хаоса — и в итоге ЭЕЗ и «повторение без повторений» [20].

В этой возможной картине организации движений очевидно, что особая команда управления в НСМ, вероятно, исходно уже хаотична. Весь такой бесконечный набор (суперпозиция состояний НСМ) уже потенциально существует, но на каждом шаге реализации движения выполняется конкретная (одна) команда. Происходит редукция. Мы приходим к общей реализации идеи Менского.

Повторяя такие движения, мы получаем аналог потока электронов при прохождении через дифракционные щели. Каждый электрон уже суперпозиция состояний, но интерференциальная картина — это регистрация многих редукций всего потока. Регистрация ТМГ и ТПГ — аналог интерференции потока электронов.

При решении сложных задач (мышление) мозг человека тоже переходит от квантовой неопределенности (возможностей много в бессознательном, и они могут реализоваться многократно) к редукции. Решается конкретная проблема (переход через дорогу, доказательство теоремы и т.д.). Переход от

бессознательного к сознательному тоже имеет определенные закономерности.

Мы это доказали в ТХС, когда доказали хаос НСМ и их непрерывные реверберации (ЭЭГ,  $dx/dt \neq 0$ ). Очевидно, что решение особой научной (технической) проблемы требует многократных (ее повторных решений) ревербераций. Эти реверберации происходят на уровне бессознательного и на уровне сознания. В итоге мы имеем редукцию: принимается одно решение.

Мы высказываем гипотезу, что ИНС в режиме хаоса и ревербераций многократно моделирует механизм работы мозга. При этом многократно происходит переход от бессознательного (набор параллельных реальностей) к сознательному. Такой акт подобен редукции в квантовом опыте.

#### Выводы

Гипотеза М.Б. Менского о квантовой теории сознания не получила должной оценки в мировом научном сообществе (за прошедшие 20 лет). Ее постигла участь гипотезы W. Weaver об СТТ и необходимости третьей (новой) науки.

После открытия ЭЕЗ и доказательства хаоса в работе мозга (его HCM) возникает возможность доказательства гипотезы Менского. Мозг подобен квантовым системам, когда из множества состояний HCM реализует одно (конечное). Получается некий аналог редукции в квантовой механике. Однако механизмы и модели такой редукции нам еще предстоит изучать.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Everett H. III. «Relative State» Formulation of Quantum Mechanics. *Rev. Mod. Phys.* 1957;29:454. DOI: 10.1103/RevModPhys.29.454.
- 2. Менский М. Б. Концепция сознания в контексте квантовой механики. *Успехи физических наук*. 2005;175(4):413–435. DOI: 10.3367/UFNr.0175.200504c.0413.
- 3. Менский М. Б. Квантовые измерения и декогеренция. *Модели и феноменология*. М.: Физматлит; 2001; 232 с.
- 4. Хадарцева К. А., Филатова О. Е. Новое понимание стационарных режимов биологических систем. *Успехи кибернетики.* 2022;3(3):92–101. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-10.
- 5. Galkin V. A., Gavrilenko T. V., Gazya G. V., Filatov M. A. Models of Uncertainty in the Framework of Compartment-Cluster Theory for Research of Instability Biosystems. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022;981:032004. DOI:10.1088/1755-1315/981/3/032004.
- 6. Пятин В. Ф., Еськов В. В., Филатова О. Е., Башкатова Ю. В. Новые представления о гомеостазе и эволюции гомеостаза. *Архив клинической и экспериментальной медицины*. 2019;28(1):21–27.
- 7. Еськов В. М., Пятин В. Ф., Башкатова Ю. В. Медицинская и биологическая кибернетика: перспективы развития. *Успехи кибернетики*. 2020;1(1):54–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-1-8.
- 8. Зимин М. И., Пятин В. Ф., Филатов М. А., Шакирова Л. С. Что общего между «Fuzziness» L. A. Zadeh и «Complexity» W. Weaver в кибернетике. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):102–112. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-11.
- 9. Eskov V.V., Gazya G.V., Bashkatova Yu.V., Filatova O. E. Systems Synthesis: Environmental Factors Impact Assessment in Non Indigenous Women Living in the North. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ*. 2022;981:032089. DOI 10.1088/1755-1315/981/3/032089.
- 10. Eskov V. V., Manina E. A., Filatov M. A., Gavrilenko T. V. Living Systems' Chaos: The Problem of Reduction in Physics and Biology. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2647:070031. DOI: 10.1063/5.0106816.
- 11. Заславский Б. Г., Филатов М. А., Еськов В. В., Манина Е. А. Проблема нестационарности в физике и биофизике. *Успехи кибернетики*. 2020;1(2):56–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-2-7.
- 12. Хадарцев А. А., Филатова О. Е., Мандрыка И. А., Еськов В. В. Энтропийный подход в физике живых систем и теории хаоса-самоорганизации. *Успехи кибернетики*. 2020;1(3):41–49. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-3-5.
- 13. Галкин В. А., Филатов М. А., Музиева М. И., Самойленко И. С. Базовые аксиомы биокибернетики и их инварианты. *Сложность*. *Разум. Постнеклассика*. 2022;2:65–79. DOI:10.12737/2306-174X-2022-67-79.
- 14. Галкин В. А., Еськов В. В., Пятин В. Ф., Кирасирова Л. А., Кульчицкий В. А. Существует ли стохастическая устойчивость выборок в нейронауках? *Новости медико-биологических наук*. 2020;20(3):126–132.

- 15. Eskov V. M., Galkin V. A., Filatova O. E. The Connectedness between Past and Future States of Biosystems? *AIP Conference Proceedings*. 2022;2467:080027. DOI:10.1063/5.0095266.
- 16. Еськов В. М., Галкин В. А., Филатова О. Е. Complexity: хаос гомеостатических систем / Под ред. Г.С. Розенберга. Самара: ООО «Порто-принт»; 2017. 388 с.
- 17. Еськов В. М., Гавриленко Т. В., Музиева М. И., Самойленко И. А. Теория динамического хаоса не может описывать биосистемы. *Сложность. Разум. Постнеклассика.* 2022;3:87–95. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-60-71.
- 18. Башкатова Ю. В., Шакирова Л. С., Филатова О. Е., Чемпалова Л. С. Реакция сердечно-сосудистой системы женщин на гипертермические воздействия. *Сложность*. *Разум*. *Постнеклассика*. 2022;3:27–39. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-26-32.
- 19. Еськов В. М., Пятин В. Ф., Чемпалова Л. С., Шамов К. А., Кухарева А. Существуют ли возможности для исследования стохастики в кардиологии и во всей медицине? *Сложность*. *Разум. Постнеклассика*. 2022;1:28–47. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-1-28-49.
- 20. Козупица Г. С., Пятин В. Ф., Кухарева А., Байтуев И. А. Три великие проблемы Гинзбурга и три реальные проблемы биомедицины. *Сложность*. *Разум. Постнеклассика*. 2022;3:5–14. DOI: 10.12737/2306-174X-2022-3-5-14.

DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-10

# СПЕКТРАЛЬНАЯ ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

М. В. Романовский  $^{1,a}$ , А. И. Солдатов  $^{1,2,6}$ 

 Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация
 Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Российская Федерация
 a № noiremagnus@gmail.com, 6 asoldatof@mail.ru

Аннотация: в статье приведен обзор существующих систем физической защиты магистральных трубопроводов от несанкционированного действия. Показано, что наиболее перспективной будет схема охраны с акустическим датчиком и оптико-электронной системой распознавания, действующая по алгоритму: срабатывание акустического датчика — подтверждение по акустическому алгоритму — подтверждение оптико-электронной системой наблюдения — тревога. В основе распознавания акустических сигналов использован метод прямого преобразования Фурье для определения частотного спектра акустических сигналов и сравнения их с эталонными. Вышеупомянутый метод прямого преобразования основан на разложении суммарных акустических сигналов, улавливаемых датчиком, на исходные синусоиды. Данная работа направлена на модернизацию системы физической защиты по отношению к магистральным трубопроводам по доставке нефтепродукта и как следствие — к повышению уровня защищенности таких объектов. Предлагаемый метод модернизации системы физической защиты позволит обеспечить условия для однозначного определения несанкционированных действий путем анализа и сопоставления звукового сигнала с базой сигналов предварительно записанных звуков и решить ряд проблем актуальной темы обеспечения безопасности и сохранности линейных магистральных нефтеи газо-трубопроводов. Также такое решение позволит минимизировать частоту ложных срабатываний технических средств физической защиты.

*Ключевые слова*: система физической защиты, магистральный трубопровод, акустический датчик, преобразование Фурье, частотный спектр сигнала.

Для цитирования: Романовский М. В., Солдатов А. И. Спектральная обработка акустических сигналов в системах физической защиты магистральных трубопроводов. Успехи кибернетики. 2023;4(1):72–78. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-10.

Поступила в редакцию: 09.02.2023.

В окончательном варианте: 22.03.2023.

# SPECTRAL PROCESSING OF ACOUSTIC SIGNALS FOR PIPELINE SECURITY SYSTEMS

M. V. Romanovskiy $^{1,a}$ , A. I. Soldatov $^{1,2,b}$ 

Surgut State University, Surgut, Russian Federation
 Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

a noiremagnus@gmail.com, b asoldatof@mail.ru

Abstract: this paper is an overview of the existing pipeline security systems preventing unauthorized access to the pipe. It is shown that the most suitable solution is an acoustic sensor and optoelectronic recognition system. It operates as follows: the acoustic sensor is activated – the acoustic algorithm confirms the alarm – the optoelectronic system confirms the alarm – the alarm is triggered. The direct Fourier transform is used for acoustic signal recognition to identify the frequency spectrum of acoustic signals and compare it with the reference one. The above-mentioned direct transform includes a decomposition of the total acoustic signal from the sensor into original sinusoids. The purpose of this study is to upgrade the oil pipeline security systems for better efficiency. The proposed upgrade method unambiguously identifies any unauthorized access by analyzing and comparing the audio signal with the reference signal from a database of pre-recorded sounds to protect oil and gas pipelines. The solution also minimizes the false alarm rate.

Keywords: security system, main pipeline, acoustic sensor, Fourier transforms, signal frequency spectrum.

Cite this article: Romanovskiy M. V., Soldatov A. I. Spectral Processing of Acoustic Signals for Pipeline Security Systems. Russian Journal of Cybernetics. 2023;4(1):72–78. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-1-10.

Original article submitted: 09.02.2023. Revision submitted: 22.03.2023.

#### Ввеление

На данный момент протяженность трубопровода составляет свыше 250 тыс. км. Наиболее уязвимым объектом в плане несанкционированных действий в виде хищения с помощью незаконных врезок со стороны населения является магистральный трубопровод.

По экспертным оценкам, в России количество похищенных тонн нефти достигает 5 миллионов, причем ежегодно, при этом оценочный ущерб составляет 800 миллионов долларов. И это с учетом только прямых потерь, без затрат на ремонт и экологических последствий. По данным ПАО «Транснефть», всего в период с 2003 по 2012 г. в России было выявлено 4779 несанкционированных врезок в магистральные нефтепроводы [1].

В перечне угроз безопасности магистральным трубопроводам доминируют кражи нефти и нефтепродуктов из несанкционированных врезок, доля которых в структуре противоправных посягательств в 2020 году составила 55 %. В 2020 году на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах была выявлена 141 несанкционированная врезка. В последние годы преступников в большей степени привлекают магистральные нефтепродуктопроводы, так как нефтепродукты, изъятые из них, можно без переработки отправлять на рынок [1].

Научная задача заключается в повышении безопасности и обоснованности решений, принимаемых при проектировании систем физической защиты, путем внедрения методов, основанных на информационных критериях оптимальности, комбинирования методов оптимизации и использования современных форм обработки информации для обеспечения необходимой безопасности магистральных трубопроводов [2].

Незаконная врезка в трубопровод может нанести значительный ущерб и создать угрозу безопасности как самого трубопровода, так и окружающей среды. Чтобы обнаружить эти незаконные врезки, многие компании по транспортировке углеводородов полагаются на акустические датчики для контроля звука потока жидкости в трубопроводе. Анализируя звуковую сигнатуру жидкости, можно выявить любые аномалии или отклонения, также они могут свидетельствовать о наличии несанкционированной врезки.

Акустические датчики работают путем преобразования звуковых волн в электрические сигналы, которые затем могут быть проанализированы специализированным программным обеспечением. Эти датчики обычно устанавливаются по всей длине трубопровода, а собираемые ими звуковые данные передаются в центральную систему мониторинга в режиме реального времени. Затем программное обеспечение анализирует звуковую характеристику жидкости, чтобы выявить любые изменения или сбои, которые могут указывать на несанкционированный врез.

Одним из ключевых показателей незаконной врезки является изменение давления и расхода жидкости в трубопроводе. Эти изменения могут привести к значительному отклонению звуковой характеристики жидкости, которое датчики могут обнаружить и предупредить компанию, обслуживающую трубопровод, о необходимости принятия мер. В дополнение к изменениям давления незаконные врезки также могут вызывать изменения вибрации, турбулентности и интенсивности текучести жидкости, которые могут быть обнаружены датчиками, но при этом необходимо учитывать вклад посторонних шумов и вибраций от внешней среды, поэтому еще одним важным фактором, который следует учитывать при использовании акустических датчиков для обнаружения незаконных врезок, является калибровка датчиков. Очень важно точно откалибровать датчики, чтобы они могли обнаруживать даже незначительные изменения звуковой характеристики. Программное обеспечение, используемое для анализа звуковых данных, также следует регулярно обновлять и калибровать, чтобы оно могло точно идентифицировать любые изменения. Но такой метод не может точно определить источник несанкционированного действия и его условия.

В данной работе планируется модернизировать систему обработки сигнала с акустических датчиков для однозначной регистрации несанкционированного действия в виде незаконной врезки путем определения вида источника звука с помощью регистрации и анализа частоты звука, а впоследствии — сопоставления его с базой звуков. Таким образом, можно будет однозначно определить, с помощью ка-

кого оборудования производится врезка, например, пробивание тела трубопровода с помощью кувалды, сверление или вваривание. Кроме того, это позволит минимизировать частоту ложных срабатываний технических средств системы физической защиты.

Планируется этого добиться путем анализа частоты зарегистрированного звука на основе того, что различные материалы издают разные звуки в зависимости от их физических свойств, таких как плотность, эластичность и внутренняя структура. Например, плотный и твердый предмет будет издавать резкий высокий звук, а более мягкий или более пористый предмет будет издавать более глухой и низкий звук. Для точного анализа звука, производимого ударом, важно учитывать несколько факторов. Например, частота звука может предоставить информацию о плотности и твердости объекта, а продолжительность и затухание звука могут указывать на удаленность объекта. Анализируя эти характеристики, можно определить состав, удаленность и другие характеристики объекта.

Для такого анализа может использоваться метод преобразования Фурье, чтобы определить, например, сверлится ли трубопровод дрелью. Этот метод основан на преобразовании временных сигналов в частотные составляющие. При анализе звука от сверления трубы дрелью можно определить частоту звука, характерную для этой операции, и сравнить ее с частотами других звуков, чтобы убедиться в том, что происходит именно сверление трубы.

### Метод преобразования Фурье

Метод прямого преобразования Фурье основан на разложении суммарных акустических сигналов, улавливаемых датчиком, на исходные синусоиды. Процессом математического разложения сложной периодической функции на временном интервале является преобразование ее в ряд из более простых, элементарных ортогональных функций, таких как синусоиды и косинусоиды. Он позволяет исследовать составляющие частоты в звуковой волне и представляет ее в виде суммы синусоидальных компонент разных частот. Это может быть полезно для анализа и улучшения качества звука [3].

Процесс преобразования и анализа сигнала звука данным методом можно описать следующим образом:

1. Мембрана микрофона вибрирует от звуковых волн, которые затем преобразуются в аналоговые электрические колебания. В результате чего можно получить спектр частоты звука временной функции, представленный на рисунке 1 [4]. Также можно получить спектр сигнала амплитуды, представленный на рисунке 2.

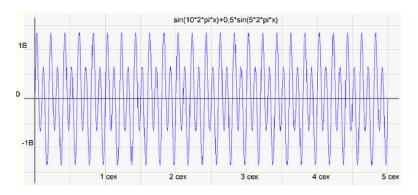


Рис. 1. Функция сигнала спектра звука

- 2. Производится дискретизация аналогового электрического сигнала в цифровую форму. Аналоговый сигнал характеризуется бесконечным множеством непрерывных значений амплитуды во времени. В процессе измерения мы можем определить только ограниченный набор дискретных значений, выраженных в конечные моменты времени. Эти значения обычно выражаются через равные промежутки времени с частотой, например, 16000 или 22000 Гц [4].
- 3. Следующим шагом является прямое дискретное преобразование Фурье. В ходе исследования выделяют короткий кадр (интервал) звука, состоящий из дискретных отсчетов, который считают периодическим, и применяют к нему преобразование Фурье. В результате получается массив комплексных чисел, содержащий информацию об амплитудном и фазовом спектрах анализируемого кадра. Спектры также дискретные, с шагом, равным (частота дискретизации)/(количество отсчетов). Это означает, что



Рис. 2. Спектр сигнала амплитуды звука

чем больше выборок берется, тем точнее становится разрешение по частоте. Длительность кадра обычно составляет приблизительно от 30 миллисекунд до 1 секунды. Чем он короче, тем лучше разрешение по времени, но хуже разрешение по частоте [4].

Для анализа также применим алгоритм быстрого преобразования Фурье, который оптимизирует количество необходимых математических операций. Одним из условий для его применения является то, что количество отсчетов должно быть кратным степени двойки, таким как 256, 512, 1024 и т.д. [4, 5].

4. Точное определение частоты. Дискретное преобразование Фурье обеспечивает дискретный спектр с каждым значением амплитуды, разделенным на равные интервалы частоты. Если частота в сигнале кратна шагу, равному (частота дискретизации)/(количество выборок), результатом будет резкий всплеск. Однако, если частота лежит между границами ступеней ближе к середине, пик будет иметь усеченную вершину, что усложнит определение частоты [4].

Преобразование Фурье позволяет представить непрерывный сигнал f(x), заданный на отрезке  $\{0, T\}$ , в виде суммы бесконечного числа тригонометрических функций (синусоид и/или косинусоид) с конкретными амплитудами и фазами, рассматриваемых также на отрезке  $\{0, T\}$ . Этот ряд называется рядом Фурье [4, 5].

В данной работе предполагается использовать алгоритм преобразования Фурье, такой как быстрое преобразование Фурье. Этот алгоритм преобразует цифровые данные звука в комплексные числа, которые представляют собой спектр звука. Данный метод для теоретических опытов можно реализовать при помощи программного обеспечения MATLAB. MATLAB предоставляет удобство в автоматическом удалении ненужных объектов, но при работе с более объемными массивами данных может выдавать ошибки из-за недостатка памяти. Чтобы исправить эту проблему, можно использовать процедуру clear, указав имя объекта, который необходимо удалить, чтобы освободить память. Таким образом, можно улучшить качество звука и избавиться от посторонних шумов [6].

#### Практический результат

С помощью вышеописанного метода преобразования Фурье можно избавиться от посторонних шумов и привести спектр в подходящий для анализа вид. Далее на основе сопоставления можно определить источник звука и его удаленность от акустического датчика на основе эффекта затухания и его спектральной амплитуды.

С помощью программного обеспечения можно привести вид спектра частоты звука представленный на рисунке 3, к подходящему для анализа и сопоставления с базой звуков изображенному на рисунке 4.

Таким образом, несмотря на то, что полезного сигнала не видно на фоне шума в исходном сигнале, спектральная характеристика позволяет определить его частоту и амплитуду [3].

Кроме этого, для сравнения можно использовать другие программы для обработки звука и сравнить результат, так, например, спектр частоты звука с уменьшением шума представлен на рисунке 5. Для этого был использован записанный с помощью микрофона и программного обеспечения Mixcraft Pro Studio 7 звук от пяти ударов металлическим предметом о металлическую трубу.

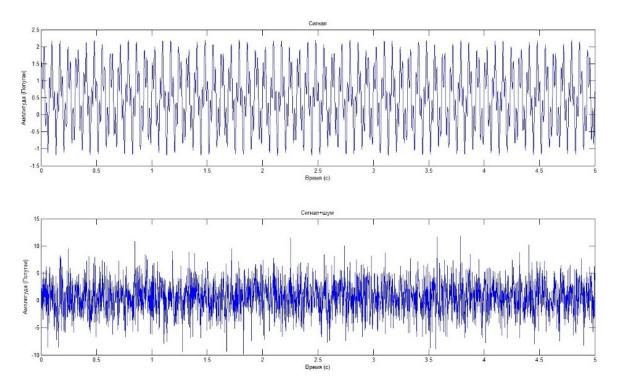


Рис. 3. Временная функция и спектр сигнала

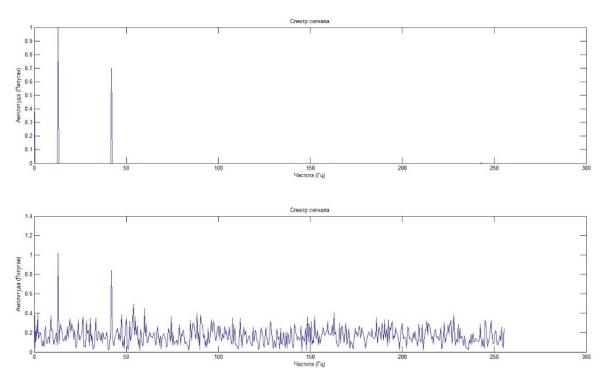


Рис. 4. Временная функция и спектр сигнала после обработки

При ближайшем рассмотрении и обработке в программе Adobe Audition 2022 можно заметить угасающий спектр звука, представленный на рисунке 6.

Таким образом, очищенный сигнал можно сопоставить с базой сигналов и определить род источника звука. Например, по спектру рисунка 4 можно сделать вывод о непродолжительном событии, так как спектр быстро затухает, а анализируя спектр, представленный на рисунке 3, можно предположить, что это систематическое воздействие на объект в виде периодических ударов.

Для данного эксперимента использовались следующие условия:

- источник звука: 5 ударов металлическим предметом по металлической трубе;

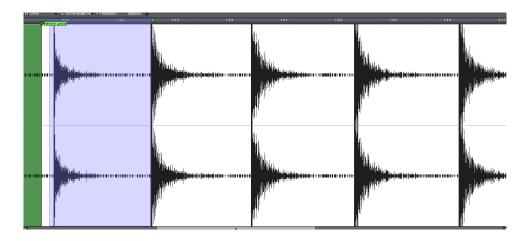


Рис. 5. Спектр частоты звука удара о металлическую трубу



Рис. 6. Увеличенный спектр частоты одного удара

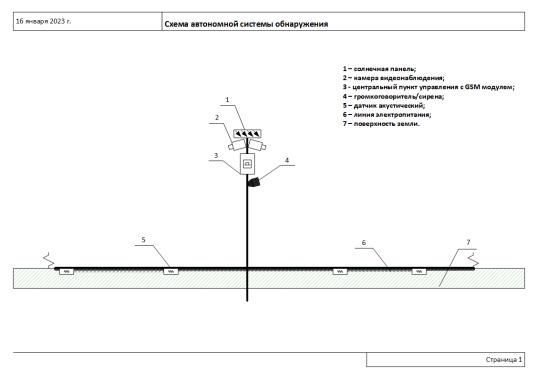
- устройство: микрофон Genius PERFEO M-3 с ветрозащитной насадкой (губкой) для подавления шумов;
- используемое ПО для записи и отображения спектра звука: Mixcraft Pro Studio 7, Adobe Audition 2022.

К сожалению, использование программного обеспечения, такого как MATLAB, не подходит для опытно-промышленной эксплуатации, так как необходимо проводить анализ и очищение звука от посторонних шумов на уровне программного кода. Для этого более целесообразно использовать анализирующий и преобразующий код, например, на языке программирования Java или C++, на основе вышеописанного метода преобразования Фурье. В перспективе это позволит модифицировать и организовать систему физической защиты, как это представлено на рисунке 7.

### Заключение

Вышеописанная методика обработки частоты звука позволит модернизировать систему физической защиты путем анализа и определения несанкционированных действий в отношении магистральных трубопроводов и уменьшить частоту ложных срабатываний системы безопасности.

Далее планируется записать множество вариаций звуковых частот разнообразных воздействий на металлическую конструкцию, например, сверления, сварки и т.д., и обработать их методом прямого преобразования Фурье. На следующем этапе предполагается рассмотреть процессы автоматизации обработки спектральных частот сигналов звука на основе методов системы поддержки принятия решений.



**Рис. 7.** Схема размещения датчиков системы физической защиты вдоль линии магистрального трубопровода

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Публичное акционерное общество «Транснефть». Режим доступа: http://www.transneft.ru.
- 2. Костин В. Н. *Методики, модели и методы обоснования и разработки систем физической защиты критически важных объектов*: автореферат дис. ... доктора технических наук. Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова; 2021. 38 с. Режим доступа: https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01010768066?page=1&rotate=0&theme=black.
- 3. Князев Б. А., Черкасский В. С. Дискретное преобразование Фурье как это делается. *Вестник новосибирского государственного университета*. *Серия: Физика*. 2008;3(4):74–86.
- 4. Степаненко М. А., Фунтиков Е. А. Оцифровка и анализ акустических сигналов на платформе Android. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2016;4:31–36. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item. asp?id=28363195.
- 5. Шамсиев Э. Х., Павлов А. Д. Методы голосовой идентификации человека. *Профессиональные коммуникации в научной среде* фактор обеспечения качества исследований: сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург: ООО «Скифия-принт»; 2022. С. 138–142. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary 49432585 89798867.pdf.
- 6. Алексеев М. С., Деревянкина В. С., Куцевалова В. В., Сивцова Е. И., Маегов С. Е. Методология сбора и обработки голосовых данных. *Решетневские чтения*: материалы XXV Международной научнопрактической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Часть 2 / Под общей редакцией Ю. Ю. Логинова. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»; 2021. С. 157–158. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47711824.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания jcyb.ru.
Адрес учредителя и издателя: Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», 117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1. Телефон: +7 (495) 718-21-10.
Дата выхода в свет $31.03.2023$ . Формат $60 \times 84/8$ . Усл. печ. л. $6,2$ . Учизд. л. $9,3$ . Цена свободная.