

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

ИНФОРМАТИКА

INFORMATICS

TOM 18
VOL. 18

4 | 2021

ОТ РЕДАКЦИИ

В журнале «Информатика» публикуются оригинальные и обзорные статьи, описывающие результаты фундаментальных и прикладных исследований специалистов академического и вузовского профиля в области информатики и информационных технологий.

Основной целью журнала является публикация наиболее значимых новых результатов в указанной области. Приветствуются статьи, описывающие заключительные результаты научных проектов и диссертационных исследований, открывающие новые направления исследований, которые находятся на стыке информатики и других наук.

Журнал рассчитан на широкий круг специалистов в области информатики и информационных технологий.

Основные разделы журнала:

- биоинформатика;
- математическое моделирование;
- защита информации и надежность систем;
- информационные технологии;
- логическое проектирование;
- обработка сигналов, изображений, речи, текста и распознавание образов;
- автоматизация проектирования;
- интеллектуальные системы.

Префикс DOI: 10.37661

Условия распространения материалов:

контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

Индексирование:

Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь журнал «Информатика» был включен в список научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований.

В декабре 2017 г. включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). С помощью инструментов и сервисов, доступных на платформе eLIBRARY (раздел «Личный кабинет»), можно самостоятельно корректировать список своих публикаций и цитирований в РИНЦ.

В июле 2017 г. включен в базу журналов открытого доступа Directory of Open Access Journals (DOAJ).

С помощью поисковых систем Google Scholar, WorldCat, Соционет можно получить свободный доступ к полному тексту научных публикаций журнала.

Адрес редакции:

ул. Сурганова, 6, к. 305, г. Минск, 220012, Беларусь
Тел. +375 (017) 351 26 22

Editorial address:

Surganova str., 6, of. 305, Minsk, 220012, Belarus
Phone +375 (017) 351 26 22

E-mail: rio@newman.bas-net.by

<https://inf.grid.by/jour>

THE EDITOR'S NOTE

The journal «Informatics» is a scientific publication in computer sciences and information technologies which reviews the results in basic and applied research of scientists from the universities and scientific centers.

The journal focuses on the most significant and modern papers of research projects results and PhD/DSc thesis in computer sciences.

The journal is edited for the specialists in IT and computer sciences research and application.

The main sections of the journal:

- bioinformatics;
- mathematical modeling;
- information protection and system reliability;
- information technology;
- logical design;
- signal, image, speech, text processing and pattern recognition;
- computer-aided design;
- artificial intelligence methods.

DOI Prefix: 10.37661

Distribution:

content is distributed under Creative Commons Attribution 4.0 License

Indexation:

the journal «Informatics» is in the list of scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus for scientists to publish the results of PhD/DSc research.

In December 2017 the journal was included in the database of the Russian Science Citation Index (RISC) and provides free access to reviewed electronic scientific paper, improving scientific information traffic and also raising quotation of works of the authors (please use <https://elibrary.ru> or section https://elibrary.ru_author_tools).

In July 2017 included in the database of open access journals Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Using the Google Scholar, WorldCat, Соционет search engine, you can get free access to full text of scientific publications of magazine.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

ИНФОРМАТИКА

Informatika

Том 18, № 4, октябрь-декабрь 2021

Ежеквартальный научный журнал

Издается с января 2004 г.

Учредитель и издатель – Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси)

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Тузиков Александр Васильевич, д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси,
генеральный директор ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

З а м е с т и т е л ь г л а в н о г о р е д а к т о р а

Ковалев Михаил Яковлевич, д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси,
ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я

Абламейко Сергей Владимирович, д-р техн. наук, проф., академик НАН Беларуси, БГУ (Минск, Беларусь)

Анищенко Владимир Викторович, канд. техн. наук, доцент, ООО «СофтКлуб» (Минск, Беларусь)

Бибило Петр Николаевич, д-р техн. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

Бобов Михаил Никитич, д-р техн. наук, проф., БГУИР (Минск, Беларусь)

Долгий Александр Борисович, д-р техн. наук, проф., Высшая инженерная школа Бретани (Нант, Франция)

Дудин Александр Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., БГУ (Минск, Беларусь)

Карпов Алексей Анатольевич, д-р техн. наук, доцент, СПИИРАН (Санкт-Петербург, Россия)

Килин Сергей Яковлевич, д-р физ.-мат. наук, проф., академик НАН Беларуси, Президиум НАН
Беларуси (Минск, Беларусь)

Краснопрошин Виктор Владимирович, д-р техн. наук, проф., БГУ (Минск, Беларусь)

Крот Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

Кругликов Сергей Владимирович, д-р воен. наук, канд. техн. наук, доцент, ОАО «Гипросвязь»
(Минск, Беларусь)

Кундас Семен Петрович, д-р техн. наук, проф., БНТУ (Минск, Беларусь)

Лиходед Николай Александрович, д-р физ.-мат. наук, проф., БГУ (Минск, Беларусь)

Матус Петр Павлович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт математики НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

Скляров Валерий Анатольевич, д-р техн. наук, проф., Университет Авейру (Авейру, Португалия)

Сотсков Юрий Назарович, д-р физ.-мат. наук, проф., ОИПИ НАН Беларуси (Минск, Беларусь)

Стемпковский Александр Леонидович, д-р техн. наук, проф., академик РАН, ИПИМ РАН (Москва, Россия)

Харин Юрий Семенович, д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН Беларуси, НИИ ППМИ БГУ
(Минск, Беларусь)

Чернявский Александр Федорович, д-р техн. наук, проф., академик НАН Беларуси, НИИ ПФП
им. А. Н. Севченко БГУ (Минск, Беларусь)

Ярмолик Вячеслав Николаевич, д-р техн. наук, проф., БГУИР (Минск, Беларусь)

Редакционный совет

Ефанов Дмитрий Викторович, Российский университет транспорта (Московский институт инженеров транспорта) (Москва, Россия)

Кумари Мадху, Университетский центр исследований и разработок, Университет Чандigarха (Мохали, Пенджаб, Индия)

Лазарев Александр Алексеевич, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия)

Лай Цунг-Чьян, Азиатский университет в Тайчжуне (Китайская Народная Республика, Тайвань)

Марина Нинослав, Университет информационных наук и технологий им. Св. апостола Павла (Охрид, Македония)

Меликян Вазген Шаваршович, Национальный политехнический университет Армении (Ереван, Армения)

Пеш Эрвин, Зигенский университет (Зиген, Германия)

Сингх Таджиндер, Институт инженерии и технологий Сант Лонговал (Лонговал, Пенджаб, Индия)

Ходаченко Максим Леонидович, Институт космических исследований Австрийской академии наук (Грац, Австрия)

Чиулла Карло, Университет Эпока (Тирана, Албания)

Штейнберг Борис Яковлевич, Институт математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Россия)

ИНФОРМАТИКА

Том 18, № 4, октябрь-декабрь 2021

Ответственный за выпуск *Мойсейчик Светлана Сергеевна*
Редактор *Гончаренко Галина Борисовна*
Корректор *Михайлова Анна Антоновна*
Компьютерная верстка *Бутевич Ольга Борисовна*

Сдано в набор 29.11.2021. Подписано в печать 23.12.2021. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Ризография. Усл. печ. л. 12,7. Уч.-изд. л. 12,5. Тираж 40 экз. Заказ 10.

Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/274 от 04.04.2014. ЛП № 02330/444 от 18.12.13. Ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Беларусь.

© Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, 2021

THE UNITED INSTITUTE OF INFORMATICS PROBLEMS
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

INFORMATICS

Vol. 18, no. 4, October-December 2021

Published quarterly

Issued since January 2004

Founder and publisher – the United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NASB)

Editor-in-Chief

Alexander V. Tuzikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Corr. Member of NASB, General Director
of the UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Deputy Editor-in-Chief

Mikhail Y. Kovalyov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Corr. Member of NASB, UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Editorial Board

Sergey V. Ablameyko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of NASB, BSU (Minsk, Belarus)

Uladimir V. Anishchanka, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, SoftClub Ltd. (Minsk, Belarus)

Petr N. Bibilo, Dr. Sci. (Eng.), Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Mikhail N. Bobov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., BSUIR (Minsk, Belarus)

Alexandre B. Dolgui, Dr. Sci. (Eng.), Prof., IMT Atlantique (Nantes, France)

Alexander N. Dudin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., BSU (Minsk, Belarus)

Alexey A. Karpov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, SPII RAS (Saint Petersburg, Russia)

Sergey Ya. Kilin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Academician of NASB, Presidium of NASB (Minsk, Belarus)

Viktor V. Krasnoproshin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., BSU (Minsk, Belarus)

Alexander M. Krot, Dr. Sci. (Eng.), Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Sergey V. Kruglikov, Dr. Sci. (Milit.), Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, JSV "Giprosvjaz" (Minsk, Belarus)

Semen P. Kundas, Dr. Sci. (Eng.), Prof., BNTU (Minsk, Belarus)

Nikolai A. Likhoded, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., BSU (Minsk, Belarus)

Petr P. Matus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of Mathematics of NASB (Minsk, Belarus)

Valery A. Sklyarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, University of Aveiro (Aveiro, Portugal)

Yuri N. Sotskov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., UIIP NASB (Minsk, Belarus)

Alexander L. Stempkovsky, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, IPPM RAS (Moscow, Russia)

Yuriy S. Kharin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Corr. Member of NASB, RI APMI BSU (Minsk, Belarus)

Alexander F. Cherniavsky, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of NASB, A. N. Sevchenko IAPP BSU (Minsk, Belarus)

Vyacheslav N. Yarmolik, Dr. Sci. (Eng.), Prof., BSUIR (Minsk, Belarus)

Editorial Council

Dmitry V. Efanov, Russian University of Transport (Moscow Institute of Transport Engineers) (Moscow, Russia)

Madhu Kumari, University Center for Research & Development, Chandigarh University (Mohali, Punjab, India)

Alexander A. Lazarev, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS (Moscow, Russia)

Tsung-Chyan Lai, Asia University at Taichung (The People's Republic of China, Taiwan)

Ninoslav Marina, St. Paul the Apostle University of Information Sciences and Technology (Ohrid, Macedonia)

Vazgen Sh. Melikyan, National Polytechnic University of Armenia (Yerevan, Armenia)

Erwin Pesch, University of Siegen (Siegen, Germany)

Tajinder Singh, Sant Longowal Institute of Engineering & Technology (Longowal, Punjab, India)

Maxim L. Khodachenko, Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences (Graz, Austria)

Carlo Ciulla, Epoka University (Tirana, Albania)

Boris Steinberg, Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia)

INFORMATICS

Vol. 18, no. 4, October-December 2021

Issue Head *Sviatlana S. Maiseichyk*

Editor *Halina B. Hancharenka*

Corrector *Hanna A. Mikhailava*

Computer Imposition *Volha B. Butsevich*

Sent for press 29.11.2021. Output 23.12.2021. Format 60×84 1/8. Offset paper. Headset Times. Riesography. Printed sheets 12,7. Publisher's signatures 12,5. Circulation 40 copies. Order 10.

State Scientific Institution "The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus".

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions no. 1/274 dated 04.04.2014. License for the press no. 02330/444 dated 18.12.13.

6, Surganov Str., 220012, Minsk, Belarus.

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Липницкий С. Ф. Информационная поддержка принятия решений при описании проблемной ситуации	7
Марков А. Н., Игнатович Р. О., Пармонов А. И. Выбор сервиса видео-конференц-связи и его адаптация для учреждения образования	17
Сидоренко А. В., Солодухо Н. А. Оценка состояния умственной усталости оператора под действием электромагнитного шумового излучения	26
Гецэвіч Ю. С., Дзенісюк Д. А., Гецэвіч С. А., Кайгародава Л. І., Нікалаенка К. А. Праектаванне беларуска- і рускамоўных натуральна-маўленчых інтэрфейсаў для даведкавых сістэм.....	40
Ким Т. Ю., Прокопович Г. А. Оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора системы управления движением мобильного робота по цветоконтрастной линии на основе генетического алгоритма	53

КОСМИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ГЕОИНФОРМАТИКА

Золотой С. А., Страшко И. Б., Котов Д. С., Нестерович И. М., Рубо В. В., Волохович Д. В. Опыт совершенствования программных комплексов дистанционного зондирования Земли для обнаружения тепловых аномалий.....	69
--	----

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ковалев М. Я., Розин Б. М., Шатерник И. А. Подход к оптимизации зарядной инфраструктуры автономных троллейбусов для городских маршрутов.....	79
---	----

ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Черемисинов Д. И., Черемисинова Л. Д. Распознавание логических вентилях в плоской транзисторной схеме.....	96
---	----

УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ

Геннадий Римский – крупный ученый, поэт, переводчик	108
--	-----

ISSN 1816-0301 (Print)
ISSN 2617-6963 (Online)

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES

Lipnitsky S. F. Information support for decision making in problem situation description	7
Markov A. N., Ihnatovich R. O., Paramonov A. I. Choosing a video conferencing service and its adaptation for educational institution	17
Sidorenko A. V., Saladukha M. A. Assessment of the mental fatigue state of an operator influenced by electromagnetic noise radiation	26
Hetsevich Y. S., Dzenisyk D. A., Hetsevich S. A., Kaigorodova L. I., Nikalaenka K. A. Design of Belarusian and Russian natural language interfaces for online help systems	40
Kim T. Yu., Prakapovich R. A. Optimization of the PID coefficients for the line-follower mobile robot controller employing genetic algorithm	53

SPACE INFORMATION TECHNOLOGIES AND GEOINFORMATICS

Zolotoy S. A., Strashko I. B., Kotau D. S., Nestsiarovich I. M., Rouba V. V., Valakhovich D. V. Updating the Earth remote sensing software for the detection of thermal anomalies	69
--	----

MATHEMATICAL MODELING

Kovalyov M. Ya., Rozin B. M., Shaternik I. A. Approach to optimizing charging infrastructure of autonomous trolleybuses for urban routes	79
---	----

LOGICAL DESIGN

Cheremisinov D. I., Cheremisinova L. D. Logical gates recognition in a flat transistor circuit	96
---	----

SCIENTISTS OF BELARUS

Gennady Rimsky – prominent scientist, poet, translator	108
---	-----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGIES



УДК 004.912
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-7-16>

Оригинальная статья
Original Paper

Информационная поддержка принятия решений при описании проблемной ситуации

С. Ф. Липницкий

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
✉ E-mail: lipn@newman.bas-net.by*

Аннотация

Цели. Решается задача автоматизации информационной поддержки пользователя в системе принятия решений на этапе описания проблемной ситуации. Актуальность задачи связана с необходимостью сбора и обработки значительных объемов информации, поскольку при наличии большого количества факторов возможности человека часто оказываются недостаточными для поиска и систематизации нужных сведений. При решении задачи информационной поддержки пользователя на этапе описания проблемной ситуации преследуются три основные цели: построение математической модели соответствующих процессов, формирование и формализация совокупности основных понятий модели, разработка в рамках моделирования алгоритмов реализации взаимодействия пользователя с информационной системой.

Методы. Используются методы теории множеств, теории вероятностей и теории графов.

Результаты. Разработана математическая модель информационной поддержки пользователя на этапе описания проблемной ситуации. В процессе взаимодействия с пользователем система предъявляет ему для заполнения специальные шаблоны предложений и текстов. Вместе с шаблонами пользователь получает от системы тексты подсказок. Они синтезируются на основе разработанной автором ранее модели представления знаний в виде вербальных ассоциаций, т. е. семантических связей между словами и словосочетаниями, соответствующих ассоциативным отношениям между обозначаемыми ими сущностями в реальном мире.

Заключение. В качестве реализации предложенной в статье модели разработаны следующие алгоритмы: создания словаря коммуникативных фрагментов; создания фрагментно-слотовых шаблонов предложений, текстов и предметных областей; информационной поддержки пользователя. Словарь коммуникативных фрагментов создается в четыре шага в соответствии с их формальным определением. На каждом шаге последовательно проверяются четыре условия из данного определения. Фрагментно-слотовые шаблоны предложений формируются путем замены их базовых коммуникативных фрагментов слотами, а шаблоны текстов – как кортежи шаблонов их предложений. Фрагментно-слотовые шаблоны предметных областей создаются в виде реализации редукций бинарных отношений на множествах шаблонов предложений из соответствующих тематических корпусов текстов. Каждый тематический корпус текстов определяет некоторую предметную область.

Ключевые слова: коммуникативный фрагмент, корпус текстов, математическая модель, система принятия решений, фрагментно-слотовый шаблон

Для цитирования. Липницкий, С. Ф. Информационная поддержка принятия решений при описании проблемной ситуации / С. Ф. Липницкий // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 7–16. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-7-16>

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 23.07.2021
Подписана в печать | Accepted 13.08.2021
Опубликована | Published 29.12.2021

Information support for decision making in problem situation description

Stanislav F. Lipnitsky

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus
✉E-mail: lipn@newman.bas-net.by*

Abstract

Objectives. The problem of automating the user information support in decision making system at the stage of describing the problem situation is solved. The relevance of the problem is associated with the need to collect and process significant amounts of information, since in the presence of a large number of factors, a person's capabilities are often insufficient to search and organize the necessary information.

When solving the problem of user information support at the stage of describing the problem situation, three main goals are pursued: building a mathematical model of the corresponding processes; formalization of the set of basic concepts of the model; development of the algorithms for implementation of user interaction with the information system.

Methods. Methods of set theory, probability theory and graph theory are used.

Results. A mathematical model of user information support at the stage of describing a problem situation has been developed. In the process of interacting with the user, the system suggests special templates of sentences and texts for filling. Along with templates, the user receives help texts from the system. They are generated on the basis of the previously developed model of knowledge representation in the form of verbal associations, that is, semantic links between words and phrases corresponding to associative relationships between the entities they designate in the real world.

Conclusion. As an implementation of the proposed model, the following algorithms have been developed: an algorithm for creating a dictionary of communicative fragments; algorithms for creating fragment-slot templates for sentences, texts and subject areas; an algorithm of user information support. The vocabulary of communicative fragments is created in four steps in accordance with their formal definition. At each step, four conditions from the given definition are tested sequentially. Fragment-slot templates of sentences are formed by replacing their basic communicative fragments with slots, and text templates – as tuples of templates of their sentences. Fragment-slot templates of subject areas are created in the form of implementation of binary relations reductions on the sets of sentence templates from the corresponding thematic text corpora. Each thematic body of texts defines a certain subject area.

Keywords: communicative fragment, text corpus, mathematical model, decision making system, fragment-slot template

For citation. Lipnitsky S. F. *Information support for decision making in problem situation description*. Informatika [Informatics], 2021, vol. 18, no. 4, pp. 7–16 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-7-16>

Conflict of interest. The author declare of no conflict of interest.

Введение. Проблемная ситуация в любой предметной области характеризуется наличием некоторой проблемы, а также условий и обстоятельств ее возникновения. Под проблемой обычно понимают совокупность сложных теоретических или практических задач, требующих постановки и решения. При этом правильное описание проблемной ситуации является важнейшим условием принятия адекватного ситуации решения [1–3].

Оценка эффективности решения и его принятие сопряжены, как правило, с необходимостью сбора и обработки значительных объемов информации. При наличии большого количества факторов, связанных с проблемной ситуацией, возможности человека часто оказываются недостаточными для поиска и систематизации нужных сведений. В подобных обстоятельствах используются специальные информационные системы – системы поддержки принятия решений.

В настоящей статье решается задача информационной поддержки пользователя (лица, принимающего решение) на этапе описания проблемной ситуации. В процессе взаимодействия с пользователем система предъявляет ему для заполнения специальные (фрагментно-слотовые) шаблоны предложений и тексты подсказок. Они синтезируются на основе разработанной автором модели представления знаний в виде вербальных ассоциаций, т. е. семантических связей между словами и словосочетаниями, соответствующих ассоциативным отношениям между обозначаемыми ими сущностями в реальном мире [4].

Итеративность процесса принятия решения. Задача принятия решения возникает всякий раз, когда имеется несколько альтернативных вариантов для достижения некоторой цели. При этом наиболее эффективное решение приходится выбирать по совокупности показателей (критериев), т. е. в условиях многокритериальности. В различных предметных областях процессы принятия решений имеют много общего. Они включают следующие основные этапы:

- описание проблемной ситуации и постановка задачи принятия решения;
- поиск вариантов (альтернатив) решения поставленной задачи;
- выбор критериев оценки альтернатив для описания вариантов решения;
- выявление ограничений на критерии;
- принятие решения с учетом результатов оценки альтернатив.

Некоторые из перечисленных этапов могут повторяться, т. е. процесс принятия решения имеет итеративный характер (рис. 1).

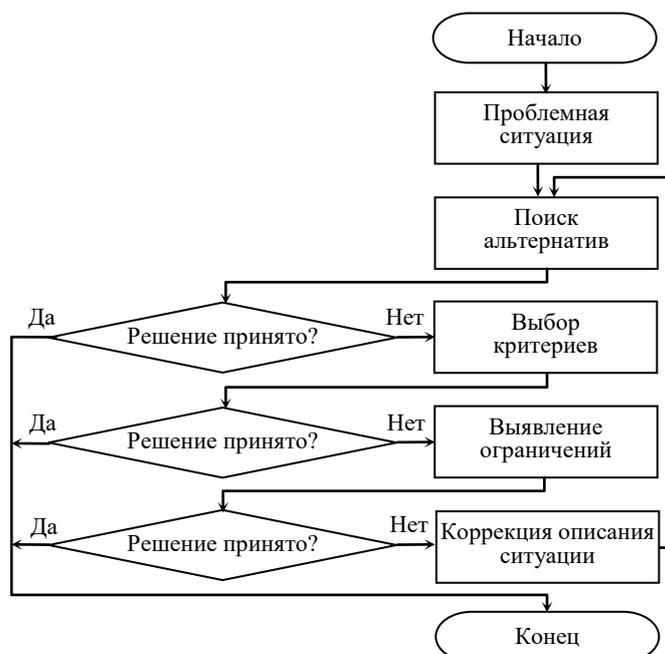


Рис. 1. Схема процесса принятия решения
 Fig. 1. Diagram of the decision making process

Создание словаря коммуникативных фрагментов. Традиционно синтез предложений языка (текста) реализуется как последовательная генерация лексем, затем синтаксических фраз и, наконец, предложений по известным синтаксическим правилам. Однако в соответствии с результатами исследования этой проблемы, изложенными в монографии [5], предложения строятся из готовых, хранящихся в памяти компонентов, названных коммуникативными фрагментами. Эти фрагменты не образуются по синтаксическим правилам, а извлекаются из памяти целиком.

При создании словаря коммуникативных фрагментов будем использовать формулы для вычисления информативности вербальной ассоциации между словами и словосочетаниями, предложенные автором в статьях [6, 7]. Под вербальными ассоциациями в компьютерной лингвистике понимают семантические связи между словами, предложениями и текстами в языке, соответствующие ассоциативным отношениям между обозначаемыми ими сущностями в реальном мире [8].

Определение понятия коммуникативного фрагмента. Обозначим через $\pi = a_1 a_2 \dots a_n$ произвольное предложение из тематического корпуса текстов Ct . (Тематический корпус – это совокупность текстов по конкретной тематике, объединение всех тематических корпусов образует полный корпус Cf .) Определим понятие коммуникативного фрагмента посредством следующих четырех условий:

1. Если $n = 1$, то слово a_1 цепочки π назовем коммуникативным фрагментом.
2. Если $n \geq 2$ и $I_{Cf}^{a_1 a_2} < I_{Cf}^{00}$ (I_{Cf}^{00} – пороговое значение информативности), то слово a_1 будем называть коммуникативным фрагментом. Информативность вербальной ассоциации между словами вычисляется по формуле

$$I_{Cf}^{ab} = \frac{n_{Cf}^{ab} + n_{Cf}^{Par_{ab}} + n_{Cf}^{Syn_{ab}}}{N_{Cf}}, \quad (1)$$

где n_{Cf}^{ab} – количество всех предложений в полном корпусе текстов Cf , в которых присутствуют слова a и b или их синонимы и словоизменения, а N_{Cf} – количество всех предложений в корпусе Cf . Параметры $n_{Cf}^{Par_{ab}}$ и $n_{Cf}^{Syn_{ab}}$ в формуле (1) указывают на число вхождений всех пар словоформ, являющихся словоизменениями слов a и (или) b (и, соответственно, их синонимами) и встречающихся в одном и том же предложении корпуса текстов Cf :

$$n_{Cf}^{Par_{ab}} = \sum_{\substack{c \in Par_a, d \in Par_b, \\ c \neq a \text{ и (или) } d \neq b}} n_{Cf}^{cd}, \quad n_{Cf}^{Syn_{ab}} = \sum_{\substack{d \in Syn_a, f \in Syn_b, \\ d \neq a \text{ и (или) } f \neq b}} n_{Cf}^{df}.$$

Словоизменения и синонимы для данных параметров содержат специальные лингвистические словари:

- словарь словоизменительных парадигм

$$Dic_{par} = \{(a, Par_a) \mid a \in W_{Cf}, a \in Par_a\},$$

состоящий из пар $\langle \text{словоформа}, \text{парадигма} \rangle$, где W_{Cf} – множество всех словоформ полного корпуса текстов Cf , а Par_a – совокупность всех словоизменений словоформы a ;

- словарь синонимичных словоформ

$$Dic_{syn} = \{(a, Syn_a) \mid a \in W_{Cf}, a \in Syn_a\},$$

включающий в себя пары $\langle \text{словоформа}, \text{синонимичные словоформы} \rangle$, в которых каждой словоформе a соответствует множество ее синонимов Syn_a .

3. Пусть $2 \leq m < n$. Подцепочку $a_1 a_2 \dots a_m$ цепочки π назовем коммуникативным фрагментом, если справедлива последовательность неравенств $I_{Cf}^{a_1 a_2} \geq I_{Cf}^{00}$, $I_{Cf}^{(a_1 a_2) a_3} \geq I_{Cf}^{00}$, ..., $I_{Cf}^{(a_1 a_2 \dots a_{m-1}) a_m} \geq I_{Cf}^{00}$, а $I_{Cf}^{(a_1 a_2 \dots a_m) a_{m+1}} < I_{Cf}^{00}$.

4. Если при $n \geq 2$ выполняется последовательность неравенств $I_{Cf}^{a_1 a_2} \geq I_{Cf}^{00}$, $I_{Cf}^{(a_1 a_2) a_3} \geq I_{Cf}^{00}$, ..., $I_{Cf}^{(a_1 a_2 \dots a_{n-1}) a_n} \geq I_{Cf}^{00}$, то цепочку $a_1 a_2 \dots a_n$ назовем коммуникативным фрагментом. Значения информативности вербальной ассоциации в пп. 3 и 4 вычисляются по формуле

$$I_{Cf}^{\pi b} = \frac{\sum_{a \in \pi} I_{Cf}^{ab}}{\sqrt{\sum_{a \in \pi} (I_{Cf}^{ab})^2}}, \quad (2)$$

являющейся частным случаем выражения

$$I_{Cf}^{\pi \rho} = \frac{\sum_{a \in \pi, b \in \rho} I_{Cf}^{ab}}{\sqrt{\sum_{a \in \pi, b \in \rho} (I_{Cf}^{ab})^2}}, \quad (3)$$

где $I_{Cf}^{\pi \rho}$ – информативность вербальной ассоциации между словосочетаниями (фразами) π и ρ , а $I_{Cf}^{\pi b}$ – между словосочетанием π и словом b .

Базовые и связующие коммуникативные фрагменты. Пусть Ct – некоторый тематический корпус текстов. Рассмотрим предметную область, определяемую корпусом Ct . Будем различать базовые и связующие коммуникативные фрагменты в зависимости от их информативности в данной предметной области. Обозначим через I_{Ct}^0 пороговое значение информативности коммуникативного фрагмента. Тогда коммуникативный фрагмент f будем называть базовым, если значение его информативности I_{Ct}^f удовлетворяет неравенству $I_{Ct}^f \geq I_{Ct}^0$. Если же $I_{Ct}^f < I_{Ct}^0$, то фрагмент f назовем связующим. Связующим, например, является коммуникативный фрагмент «предлагается новый подход к решению проблемы», а базовым – фрагмент «принятия решений в условиях неопределенности».

Обозначим через $Ft_{\text{баз.}}$ множество всех базовых коммуникативных фрагментов, а через $Ft_{\text{св.}}$ – множество всех связующих. Тогда множество всех коммуникативных фрагментов предметной области – это объединение множеств базовых и связующих фрагментов, т. е. $F_{Ct} = Ft_{\text{баз.}} \cup Ft_{\text{св.}}$.

Информативность коммуникативного фрагмента $f = ab \dots$ в тематическом корпусе текстов Ct вычисляется по формуле

$$I_{Ct}^f = \frac{I_{Ct}^a + I_{Ct}^b + \dots}{\sqrt{(I_{Ct}^a)^2 + (I_{Ct}^b)^2 + \dots}}, \quad (4)$$

где $I_{Ct}^a, I_{Ct}^b, \dots$ – значения информативности всех слов цепочки f [6, 7]. В свою очередь, информативность слова в корпусе Ct определяется выражением

$$I_{Ct}^a = \frac{n_{Ct}^a + n_{Ct}^{\text{Par}_a} + n_{Ct}^{\text{Syn}_a}}{n_{Cf}^a + N_{Cf}^{\text{Par}_a} + N_{Cf}^{\text{Syn}_a}}. \quad (5)$$

Значения частот n_{Cf}^a и n_{Ct}^a в формуле (5) ищутся в частотном словаре словоформ

$$Dic_a = \{ \langle a, n_{Cf}^a, n_{Ct_1}^a, n_{Ct_2}^a, \dots, n_{Ct_n}^a \rangle \mid a \in W_{Cf} \},$$

где W_{Cf} – множество всех словоформ полного корпуса текстов Cf , а $n_{Cf}^a, n_{Ct_1}^a, n_{Ct_2}^a, \dots, n_{Ct_n}^a$ – частоты встречаемости словоформы a во всех тематических корпусах текстов.

Алгоритм создания словаря коммуникативных фрагментов. На входе алгоритма – все предложения вида $\pi = a_1 a_2 \dots a_n$ из полного корпуса текстов C_f , на выходе – словарь коммуникативных фрагментов

$$Dic_f = \{ \langle f, I_{C_{t_1}}^f, I_{C_{t_2}}^f, \dots, I_{C_{t_m}}^f \rangle \mid f \in F \},$$

где $I_{C_{t_i}}^f$ ($i = \overline{1, m}$) – значение информативности коммуникативного фрагмента f в тематическом корпусе текстов C_{t_i} , F – множество всех коммуникативных фрагментов в полном корпусе текстов C_f . Алгоритм включает четыре шага:

1. Проверяется условие 1 из определения коммуникативного фрагмента. Если оно выполняется, то слово a_1 помещается в словарь Dic_f . По формуле (4) вычисляются и помещаются в Dic_f значения информативности слова a_1 в тематических корпусах текстов C_{t_i} ($i = \overline{1, m}$). Далее обрабатывается очередное предложение из корпуса C_f .

2. Проверяется условие 2 из определения коммуникативного фрагмента. При его выполнении слово a_1 цепочки π помещается в словарь Dic_f . Вычисляются и помещаются в Dic_f значения информативности слова a_1 в тематических корпусах текстов. Оставшиеся слова предложения π перенумеровываются, и процесс создания словаря коммуникативных фрагментов начинается с первого шага.

3. Проверяется условие 3 из определения коммуникативного фрагмента. Если оно выполнено, то подцепочка $a_1 a_2 \dots a_m$ предложения π помещается в словарь Dic_f . По формулам (3) и (4) вычисляются и помещаются в Dic_f значения информативности коммуникативного фрагмента в тематических корпусах текстов C_{t_i} ($i = \overline{1, m}$). Оставшиеся слова предложения π перенумеровываются, и алгоритм далее выполняется, начиная с первого шага.

4. Проверяется условие 4 из определения коммуникативного фрагмента. Если оно справедливо, то предложение π помещается в словарь Dic_f . По формулам (3) и (4) вычисляются и помещаются в Dic_f значения информативности коммуникативного фрагмента в тематических корпусах текстов C_{t_i} ($i = \overline{1, m}$). Далее обрабатывается очередное предложение из корпуса C_f , начиная с первого шага.

Построение фрагментно-слотовых шаблонов. Будем различать фрагментно-слотовые шаблоны предложений, текстов и предметных областей. Фрагментно-слотовый шаблон предложения – это цепочка, полученная заменой его базовых коммуникативных фрагментов слотами («пустыми» фрагментами). Фрагментно-слотовые шаблоны текстов образуются из кортежей шаблонов их предложений. Шаблоны предметных областей формируются как бинарные отношения на множествах шаблонов предложений из соответствующих тематических корпусов текстов.

Алгоритм создания фрагментно-слотовых шаблонов предложений. На входе алгоритма – предложение $\pi = a_1 a_2 \dots a_n$ из тематического корпуса текстов C_t , на выходе – фрагментно-слотовый шаблон предложения $h_\pi = s_1 s_2 \dots s_r$, где s_j ($j = \overline{1, r}$, $r \leq n$) – коммуникативный фрагмент или слот. Алгоритм состоит из трех шагов:

1. С использованием словаря Dic_f в предложении π выявляются коммуникативные фрагменты: $\pi = f_1 f_2 \dots f_r$.

2. В предложении $\pi = f_1 f_2 \dots f_r$ все базовые коммуникативные фрагменты заменяются слотами. В результате получаем фрагментно-слотовый шаблон предложения $h_\pi = s_1 s_2 \dots s_r$.

3. Аналогичным образом создаются фрагментно-слотовые шаблоны других предложений из текстов корпуса C_t .

Алгоритм создания фрагментно-слотовых шаблонов текстов. На входе алгоритма – текст T из тематического корпуса C_t в виде кортежа предложений $T = \langle \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m \rangle$, на выходе – фрагментно-слотовый шаблон $H_T = \langle h_{\pi_1}, h_{\pi_2}, \dots, h_{\pi_m} \rangle$ текста T . Алгоритм включает три шага:

1. Формируются фрагментно-слотовые шаблоны всех предложений $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m$ текста T .

2. Сформированные шаблоны предложений $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m$ помещаются в кортеж $H_T = \langle h_{\pi_1}, h_{\pi_2}, \dots, h_{\pi_m} \rangle$.

3. Аналогично создаются шаблоны других текстов из тематического корпуса St .

Алгоритм создания фрагментно-слотовых шаблонов предметных областей. Обозначим через $U_{St} = \{ h_{\pi_i} \mid i = \overline{1, l} \}$ множество всех фрагментно-слотовых шаблонов предложений в предметной области, определяемой тематическим корпусом текстов St . Определим на множестве U_{St} отношение строгого порядка (антирефлексивное и транзитивное бинарное отношение) Ω_{St} . Обозначим через Ω_{St}^R редукцию $\Omega_{St}^R = \Omega_{St} \setminus (\Omega_{St})^2$ строгого порядка Ω_{St} . Содержательно редукция Ω_{St}^R соответствует отношению подчинения фрагментно-слотовых шаблонов предложений. Отношение Ω_{St}^R назовем *фрагментно-слотовым шаблоном предметной области, определяемой корпусом текстов St* . На практике элементами отношения Ω_{St}^R являются пары соседних фрагментно-слотовых шаблонов предложений, таких, что для любых шаблонов предложений h_{π_p} и h_{π_q} ($h_{\pi_p}, h_{\pi_q} \in \Omega_{St}^R$) тогда и только тогда, когда в данной предметной области существует фрагментно-слотовый шаблон текста, в котором шаблон h_{π_p} непосредственно предшествует шаблону h_{π_q} .

Приведем алгоритм формирования шаблона предметной области. На входе алгоритма – тематический корпус текстов St , на выходе – фрагментно-слотовый шаблон предметной области в виде отношения Ω_{St}^R . Алгоритм состоит из трех шагов:

1. Формируются фрагментно-слотовые шаблоны предложений из отобранных в корпусе St «хороших» текстов.
2. Формируются фрагментно-слотовые шаблоны «хороших» текстов.
3. Из сформированных шаблонов текстов выбираются все пары соседних шаблонов предложений и помещаются в множество Ω_{St}^R .

Информационная поддержка пользователя при описании проблемной ситуации. Сообщения пользователю синтезируются системой поддержки принятия решений путем заполнения слотов фрагментно-слотовых шаблонов дискурсивно-сочетаемыми коммуникативными фрагментами.

Отношение дискурсивной сочетаемости коммуникативных фрагментов. Под дискурсом в лингвистике понимают связную последовательность предложений, обладающую семантическим единством [9]. Для получения «хороших» предложений при их синтезе из коммуникативных фрагментов будем использовать отношение дискурсивной сочетаемости таких фрагментов. Понятие этого отношения введем следующим образом.

Определим на множестве F всех коммуникативных фрагментов в полном корпусе текстов Cf антирефлексивное бинарное отношение Δ_{Cf} , такое, что для любых фрагментов $f, g \in F$ соотношение $(f, g) \in \Delta_{Cf}$ выполняется тогда и только тогда, когда в некотором тексте $T \in Cf$ существует предложение π , в котором коммуникативный фрагмент f непосредственно предшествует фрагменту g . Отношение Δ_{Cf} будем называть отношением дискурсивной сочетаемости коммуникативных фрагментов в тематическом корпусе текстов Cf .

Дискурсивно-сочетаемые пары коммуникативных фрагментов $(f, g) \in \Delta_{Cf}$ будем хранить в специальном списке – словаре дискурсивно-сочетаемых коммуникативных фрагментов:

$$Dic_{fg} = \{ (f, g) \mid f \in F_{Cf}, g \in F_{Cf}, (f, g) \in \Delta_{Cf} \}.$$

Вербально-ассоциативные сети предметных областей. Пусть по-прежнему $Ft_{баз.}$ – множество базовых, $Ft_{св.}$ – множество связующих, а $F_{St} = Ft_{баз.} \cup Ft_{св.}$ – множество всех коммуникативных фрагментов в тематическом корпусе текстов St . Определим на множестве F_{St} отноше-

ние толерантности Θ_{Ct} (рефлексивное и симметричное бинарное отношение), такое, что пара (f, g) любых фрагментов из множества Ft является элементом отношения Θ_{Ct} , т. е. $(f, g) \in \Theta_{Ct}$ тогда и только тогда, когда фрагменты f и g из этой пары содержатся хотя бы в одном предложении корпуса Ct и информативность вербальной ассоциации $I_{Ct}^{fg} \geq I_{Ct}^0$, где I_{Ct}^0 – пороговое значение информативности, а информативность I_{Ct}^{fg} вычисляется по формуле (3).

Обозначим через G_{Ct} граф отношения Θ_{Ct} . Пусть (f, g) – произвольное ребро этого графа. Если $(f, g) \in \Delta_{Ct}$, то для всех таких пар (f, g) вершины f и g соединим дугой, направленной от f к g . Обозначим полученный смешанный граф через Net_{Ct} .

Граф Net_{Ct} назовем вербально-ассоциативной сетью предметной области, определяемой тематическим корпусом текстов Ct (рис. 2).

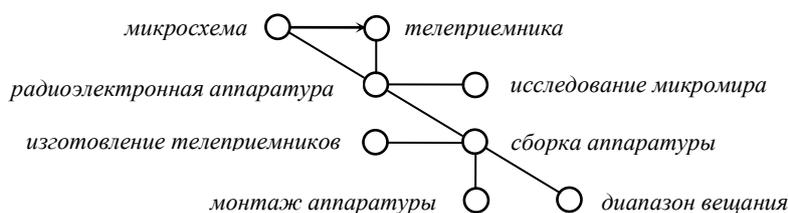


Рис. 2. Фрагмент вербально-ассоциативной сети

Fig. 2. Fragment of the verbal-associative network

Подграф $Net_{баз.}$ графа Net_{Ct} , порожденный множеством вершин $Ft_{баз.}$, будем называть базовой вербально-ассоциативной сетью предметной области, определяемой тематическим корпусом текстов Ct .

Алгоритм информационной поддержки. На входе алгоритма – перечень названий предметных областей, совокупность вербально-ассоциативных сетей для всех предметных областей и их фрагментно-слотовых шаблонов, на выходе – множество рекомендаций и подсказок пользователям системы поддержки принятия решений. Алгоритм включает следующие шаги:

1. Пользователю (в режиме диалога) предъявляется перечень названий предметных областей и предлагается выбрать требуемую. Пользователь указывает предметную область, которой соответствует тематический корпус текстов Ct .

2. В рамках выбранной предметной области пользователь имеет возможность выполнить одно из следующих действий:

– отметить одну или несколько вершин g_1, g_2, \dots базовой вербально-ассоциативной сети $Net_{баз.}$. Перейти к выполнению шага 3;

– сформировать одно или несколько предложений $\langle \rho_1, \rho_2, \dots \rangle$ текста описания проблемной ситуации. Перейти к выполнению шага 4.

3. Вычисляется информативность вербальной ассоциации между фрагментно-слотовыми шаблонами предложений из тематического корпуса текстов Ct и множеством $g_{баз.} = \{g_1, g_2, \dots\}$ отмеченных пользователем вершин базовой вербально-ассоциативной сети $Net_{баз.}$ по формуле

$$I_{Ct}^{h_{\pi_i} g_{баз.}} = \frac{\sum_{f \in h_{\pi_i}, g \in g_{баз.}} I_{Ct}^{fg}}{\sqrt{\sum_{f \in h_{\pi_i}, g \in g_{баз.}} (I_{Ct}^{fg})^2}}, \quad i = \overline{1, l}. \quad (6)$$

Информативность I_{Ct}^{fg} вычисляется по формуле (3). Далее фрагментно-слотовые шаблоны из множества $U_{Ct} = \{h_{\pi_i} | i = \overline{1, l}\}$ упорядочиваются по убыванию информативности $I_{Ct}^{h_{\pi_i} g_{баз.}}$ и предъявляются пользователю по его требованию в качестве форм для заполнения слотов

коммуникативными фрагментами. Пользователь выбирает один из шаблонов, например h_1 . Переход к выполнению шага 5.

4. Вычисляется информативность вербальной ассоциации между фрагментно-слотовыми шаблонами предложений из множества U_{C_i} и кортежем предложений $S = \langle \rho_1, \rho_2, \dots \rangle$ по формуле

$$I_{C_i}^{h_i S} = \frac{\sum_{f \in h_{\pi_i}, \rho \in S} I_{C_i}^{f \rho}}{\sqrt{\sum_{f \in h_{\pi_i}, \rho \in S} (I_{C_i}^{f \rho})^2}}, \quad i = \overline{1, l}. \quad (7)$$

Информативность $I_{C_i}^{f \rho}$ вычисляется по формуле (5). Реализуется упорядочение фрагментно-слотовых шаблонов h_{π_i} по убыванию информативности $I_{C_i}^{h_i S}$. Шаблоны предъявляются пользователю, который выбирает наиболее соответствующий его потребностям, например шаблон h_3 . Переход к выполнению шага 6.

5. Пользователь заполняет слоты фрагментно-слотового шаблона h_1 . Ему предлагаются варианты заполнения в виде совокупностей коммуникативных фрагментов, для которых информативность вербальной ассоциации с шаблоном h_1 не меньше некоторого порогового значения. Кроме того, эти фрагменты должны быть дискурсивно сочетаемыми с соседними фрагментами шаблона h_1 . Далее пользователю предъявляются шаблоны, удовлетворяющие отношению $\Omega_{C_i}^R$. Процесс их заполнения продолжается аналогичным образом.

6. Выполняется аналогично шагу 5.

Заключение. Предложена математическая модель информационной поддержки пользователя при принятии решений на этапе описания проблемной ситуации. Разработаны следующие реализующие данную модель алгоритмы:

- создания словаря коммуникативных фрагментов;
- создания фрагментно-слотовых шаблонов предложений, текстов и предметных областей;
- информационной поддержки пользователя.

Словарь коммуникативных фрагментов создается в четыре шага в соответствии с их формальным определением. На каждом шаге последовательно проверяются четыре условия из данного определения.

Фрагментно-слотовые шаблоны предложений формируются путем замены их базовых коммуникативных фрагментов слотами, а шаблоны текстов – как кортежи шаблонов их предложений.

Фрагментно-слотовые шаблоны предметных областей создаются в виде реализации редукций бинарных отношений на множествах шаблонов предложений из соответствующих тематических корпусов текстов. Каждый тематический корпус текстов определяет некоторую предметную область.

Информационная поддержка пользователя при описании проблемной ситуации осуществляется в режиме диалога и сводится к предъявлению ему для заполнения релевантных фрагментно-слотовых шаблонов и возможных вариантов их заполнения.

Список использованных источников

1. Кравченко, Т. К. Системы поддержки принятия решений / Т. К. Кравченко // Информационные технологии для современного университета ; под общ. ред. А. Н. Тихонова, А. Д. Иванникова. – М. : ГНИИ ИТТ «Информика», 2011. – С. 107–118.
2. Моисеенко, Е. В. Информационные технологии в экономике / Е. В. Моисеенко, Е. Г. Лаврушина ; ред. М. А. Касаткина. – М. : Софт, 2009. – С. 120–135.
3. Симанков, В. С. Методологическое обеспечение этапов поддержки принятия решений при синтезе сложных систем / В. С. Симанков, А. Н. Черкасов // Перспективы науки. – 2012. – № 12. – С. 85–89.
4. Липницкий, С. Ф. Модель представления знаний в информационных системах на основе вербальных ассоциаций / С. Ф. Липницкий // Информатика. – 2011. – № 4(32). – С. 21–28.

5. Гаспаров, Б. М. Язык, память, образ. Лингвистика языкового существования / Б. М. Гаспаров. – М. : Новое литературное обозрение, 1996. – 352 с.
6. Липницкий, С. Ф. Синтез запросов и поиск альтернатив в системе информационной поддержки принятия решений / С. Ф. Липницкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 2. – С. 91–95.
7. Липницкий, С. Ф. Интернет-поиск и лексико-семантическая обработка аналогов принятых решений в различных предметных областях / С. Ф. Липницкий // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 73–82. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-4-73-82>
8. Мартинович, Г. А. Вербальные ассоциации и организация лексикона человека / Г. А. Мартинович // Филологические науки. – 1989. – № 3. – С. 39–45.
9. Темнова, Е. В. Современные подходы к изучению дискурса / Е. В. Темнова // Язык, сознание, коммуникация : сб. ст. – М. : МАКС Пресс, 2004. – Вып. 26. – С. 24–32.

References

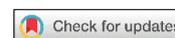
1. Kravchenko T. K. *Decision support systems*. Informacionnye tehnologii dlja sovremennogo universiteta [*Information Technologies for a Modern University*]. In Tikhonov A. N., Ivannikov A. D. (eds.). Moscow, Gosudarstvennyj nauchno-issledovatel'skij institut informacionnyh tehnologij i telekommunikacij "Informika", 2011, pp. 107–118 (In Russ.).
2. Moiseenko E. V., Lavrushina E. G. Informacionnye tehnologii v jekonomike. *Information Technologies in the Economy*. In M. A. Kasatkina (ed.). Moscow, Soft, 2009, pp. 120–135 (In Russ.).
3. Simankov V. S., Cherkasov A. N. *Methodological support of decision support stages in the synthesis of complex systems*. Perspektivy nauki [*Prospects of Science*], 2012, no. 12, pp. 85–89 (In Russ.).
4. Lipnitsky S. F. *Model of knowledge representation in information systems based on verbal associations*. Informatika [*Informatics*], 2011, no. 4 (32), pp. 21–28 (In Russ.).
5. Gasparov B. M. Jazyk, pamjat', obraz. Lingvistika jazykovogo sushhestvovanija. *Language, Memory, Image. Linguistics of Linguistic Existence*. Moscow, Novoe literaturnoe obozrenie, 1996, 352 p. (In Russ.).
6. Lipnitskiy S. F. *Synthesis of queries and search for alternatives in the system of information support for decision-making*. Problemy fiziki, matematiki i tehniki [*Problems of Physics, Mathematics and Technology*], 2020, no. 2, pp. 91–95 (In Russ.).
7. Lipnitsky S. F. *Internet search and lexical-semantic processing of analogs when making decisions in various subject areas*. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 73–82 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-4-73-82>
8. Martinovich G. A. *Verbal associations and the organization of the human lexicon*. Filologicheskie nauki [*Philological Sciences*], 1989, no. 3, pp. 39–45 (In Russ.).
9. Temnova E. V. *Modern approaches to the study of discourse*. Jazyk, soznanie, kommunikacija : sbornik statej [*Language, Consciousness, Communication: Collection of Articles*]. Moscow, MAKS Press, 2004, iss. 26, pp. 24–32 (In Russ.).

Информация об авторе

Липницкий Станислав Феликсович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: lipn@newman.bas-net.by

Information about the author

Stanislav F. Lipnitsky, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: lipn@newman.bas-net.by



УДК 002.6; 004.3; 004.4; 004.7; 004.9
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-17-25>

Оригинальная статья
Original Paper

Выбор сервиса видео-конференц-связи и его адаптация для учреждения образования

А. Н. Марков[✉], Р. О. Игнатович, А. И. Парамонов

Центр информатизации и инновационных разработок
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники,
ул. Платонова, 39, Минск, 220013, Беларусь
[✉]E-mail: a.n.markov@bsuir.by

Аннотация

Цели. Авторы преследовали цели показать необходимость внедрения сервиса видео-конференц-связи в процесс обучения, осуществить выбор сервиса видео-конференц-связи и провести компьютерный эксперимент с выбранным сервисом видео-конференц-связи BigBlueButton.

Методы. Рассмотрены проблемы выбора сервиса видео-конференц-связи из перечня программно-аппаратных видеоконференций и программного обеспечения видеоконференций. На этапе подбора программного обеспечения указаны особенности его работы, требования к аппаратному обеспечению и к интеграции во внутренние информационные системы. Нагрузочное тестирование сервиса видеоконференцсвязи проведено методом объемного тестирования и тестирования стабильности.

Результаты. Приведены графики нагрузки на аппаратные компоненты виртуального сервера в долгосрочном периоде. Описаны результаты анализа графиков на предмет выявления ключевых особенностей работы сервиса видео-конференц-связи в период тестовой и опытной эксплуатации.

Заключение. С учетом стоимости лицензирования, а также интеграции в систему электронного обучения осуществлен выбор сервиса видео-конференц-связи. Проведен компьютерный эксперимент с выбранным сервисом видео-конференц-связи BigBlueButton. Определены особенности работы аппаратного обеспечения виртуального сервера, на котором расположена система BigBlueButton. Представлены графики нагрузки на центральный процессор, оперативную память и локальную компьютерную сеть. Сформулированы проблемы эксплуатации сервиса на этапе прироста нагрузки.

Ключевые слова: видео-конференц-связь, программный комплекс, программное обеспечение, сервис BigBlueButton, учебный процесс, дистанционное образование

Для цитирования. Марков, А. Н. Выбор сервиса видео-конференц-связи и его адаптация для учреждения образования / А. Н. Марков, Р. О. Игнатович, А. И. Парамонов // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 17–25. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-17-25>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 27.09.2021
Подписана в печать | Accepted 27.10.2021
Опубликована | Published 29.12.2021

Choosing a video conferencing service and its adaptation for educational institution

Aleksey N. Markov[✉], Roman O. Ihnatovich, Anton I. Paramonov

*Center for Informatization and Innovation Development
of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics,
st. Platonova, 39, Minsk, 220013, Belarus
✉E-mail: a.n.markov@bsuir.by*

Abstract

Objectives. The authors aimed to demonstrate the need for implementation of video conferencing service into the learning process, to select a video conferencing service, and to conduct a computer experiment with the selected BigBlueButton video conferencing service.

Methods. The problems of choosing a video conferencing service from the list of video conferencing and video conferencing software are considered. At the stage of software selection, the features of its operation, requirements for hardware and for integration into internal information systems are indicated. Load testing of the video conferencing service was carried out by the method of volume and stability testing.

Results. The load graphs for hardware components of the virtual server in the long term period are presented. The article describes the results of the graphs analysis in order to identify the key features of the video conferencing service during the test and trial operations.

Conclusion. Taking into account the cost of licensing, as well as integration into the e-learning system, a choice of video conferencing service was made. A computer experiment was carried out with the selected BigBlueButton video conferencing service. The features of the hardware operation of the virtual server (on which the BigBlueButton system is located) have been determined. The load graphs for the central processing unit, random access memory and local computer network are presented. Problems of service operation at the stage of load increase are formulated.

Keywords: video conferencing, software systems, software solutions, service BigBlueButton, educational process, distance learning

For citation. Markov A. N., Ihnatovich R. O., Paramonov A. I. *Choosing a video conferencing service and its adaptation for educational institution*. Informatika [Informatics], 2021, vol. 18, no. 4, pp. 17–25 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-17-25>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. С ускоренным развитием и цифровизацией системы образования в целом, переходом на дистанционное обучение и организацией курсов повышения квалификации и курсов переподготовки специалистов на базе БГУИР остро стал вопрос реализации сервисов для качественной и бесперебойной видео-конференц-связи [1, 2]. Кроме того, рост цифровизации образования и внедрения смешанной модели обучения ускорился в 2020 г. с приходом всемирной пандемии COVID-19.

При реализации сервиса видео-конференц-связи учитывалось, что он должен удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать бесперебойную работоспособность с количеством пользователей более 100 (поток группы студентов на лекционном занятии);
- обеспечивать гарантированную устойчивую и качественную связь для конечных пользователей (слушателей);
- иметь возможность аутентификации и идентификации пользователя посредством внутренних служб или систем. Данная функция обеспечивает автоматизированное создание учетных записей для вновь прибывших пользователей или возможность подключения к сервису существующих (ранее добавленных) пользователей системы.

Проблемы выбора сервиса видео-конференц-связи. В настоящей работе в качестве сервисов для решения обозначенной проблемы рассматривались следующие программные и программно-аппаратные комплексы: Skype for Business, MS Teams, TrueConf и др. При анализе во-

проса внедрения программно-аппаратных комплексов для проведения видео-конференц-связи в значительной степени учитывается ценовой фактор, так как для организации системы дистанционного обучения нецелесообразно использовать защищенные каналы, отдельное оборудование и т. д. Рассматривая сервис программно-аппаратной видеоконференции Cisco Webex, можно отметить множество его версий, например Meeting, Training, Events, Support (URL: <https://webex-russia.ru/products>). Практически все версии не имеют внутренних сервисов и предоставляются из облака без гарантии автономности, полноценное использование на базе существующего оборудования ограничено [3]. На 2020 г. ориентировочная стоимость Cisco Webex Meetings составляла около 300 \$. Однако в случае интеграции с дистанционным обучением ценовой фактор не являлся основополагающим, поскольку Cisco Webex Meeting не поддерживает полнофункциональную интеграцию с используемой системой дистанционного обучения. Это не позволяет выполнять контроль входа пользователей на видеоконференцию и создавать саму видеоконференцию в рамках преподаваемых дисциплин.

Программное обеспечение Skype for Business дает возможность создавать систему видео-конференц-связи на базе внутреннего развернутого сервера для системы. Вместе с тем в момент принятия решения по выбору программного обеспечения и при проведении нагрузочного тестирования данного сервиса был выявлен ряд недостатков:

1. Организация сервиса предусматривала выделение больших ресурсов серверного оборудования в целом. Так, для разворачивания Skype for Business server 2015 требуются следующие минимальные технические требования: процессор – 6 ядер, 2,25 ГГц, ОЗУ 32 Гб, 72 Гб пространства дискового массива, сеть от 1 Гбит (URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/skypeforbusiness/plan-your-deployment/requirements-for-your-environment/server-requirements>). Для сервера Skype for Business 2019 требуется: процессор – от 6 ядер Xeon 2,4 ГГц, ОЗУ от 64 Гб, 72 Гб SSD для реализации серверов Standard Edition (URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/skypeforbusiness/plan/system-requirements>).

2. Кроме аппаратного обеспечения требовалось наличие свободных, выделенных статических IP-адресов с прямым доступом на каждый сервер и доступом извне.

3. Имелись сложности с разворачиванием и сопровождением сервиса на базе учреждения образования.

С учетом технических требований к серверам, опыта эксплуатации серверов Lync Server 2010, а также после проведения нагрузочного тестирования на одном развернутом сервере с минимальными требованиями были определены критерии для качественной связи, а именно наличие высокопроизводительных аппаратных компонентов и высокоскоростного канала связи для доступа к серверу извне [4]. Кроме того, процесс логирования в сервисе реализован посредством интеграции с базами данных SQL, что при высокой нагрузке и наличии большого количества записей усложняет процесс аутентификации пользователя (студента, слушателя или преподавателя).

Сервис MS Teams реализован аналогично сервису Skype for Business за исключением нескольких факторов:

1. Не задействовано аппаратное обеспечение центра обработки данных. Весь трафик идет на центральные серверы региональных представителей компании Microsoft.

2. Процесс логирования автоматизирован с сервисом студенческой почты и сервисом Office365 по студенческим лицензиям. Имея лицензию и право пользования программным обеспечением Office365, студент автоматически обладает доступом к MS Teams. Однако существуют проблемы с созданием учетных записей новых студентов или слушателей ввиду некорректных выгрузок с внутренних информационных систем к сервисам компании Microsoft.

3. При проведении нагрузочного тестирования опытным путем сервиса MS Teams выяснено, что при наличии более 100 участников видеоконференции в значительной степени загружается внешний канал связи. Кроме того, обработка мультимедийного потока происходит в режиме реального времени не на серверах компании Microsoft, а на конечных устройствах пользователей, что значительно ухудшает качество видеоконференций и сервиса в целом.

Сервис TrueConf удалось подключить к системе электронного обучения. Он предоставляется бесплатно. Авторизация происходит через систему электронного обучения посредством учетных записей студентов. Однако ресурсы бесплатной версии слишком ограничены, поэтому после изучения функциональных возможностей программного обеспечения, а также технических требований, условий лицензирования и стоимости программного обеспечения от данного сервиса решено было отказаться.

В качестве основного сервиса для проведения внутренних конференций по научным направлениям, а также конференций управленческого характера были закуплены лицензии на программное обеспечение компании Zoom. Между тем согласно документам Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь, в частности пункту 2 Указа Президента Республики Беларусь от 1 февраля 2010 г. № 60 «О мерах по совершенствованию использования национального сегмента сети Интернет», с 1 июля 2010 г. деятельность по оказанию услуг на территории Республики Беларусь с использованием информационных сетей, систем и ресурсов, имеющих подключение к сети Интернет, осуществляется юридическими лицами, их филиалами и представителями, созданными в соответствии с законодательством Республики Беларусь, с местонахождением в Республике Беларусь, с использованием информационных сетей, систем и ресурсов национального сегмента сети Интернет, размещенных на территории Республики Беларусь и зарегистрированных в установленном порядке. Принимая во внимание вышеизложенный факт, применение программного обеспечения Zoom будет противоречить требованиям Указа № 60 при использовании в качестве программного обеспечения для видеоконференц-связи в образовательной деятельности.

Критерии выбора сервиса видео-конференц-связи. Исходя из особенностей использования сервисов сформировались общие критерии для программного обеспечения, которое позволит организовать видеоконференции на базе учреждений образования с целью проведения различных видов занятий: лекционных, практических и лабораторных работ. К таким критериям относятся:

- полную интеграцию с системой электронного обучения учреждения образования;
- открытый исходный код и бесплатное распространение;
- поддержку возможности проведения видеоконференций с большим количеством участников (более 100);
- обеспечение возможности проведения совместных презентаций, обмена документами, организации чатов, поддержки функций модерации видеоконференций.

На базе БГУИР в качестве системы электронного обучения используется платформа Moodle. Данная платформа свободно распространяется, имеет возможность интеграции с внутренними сервисами посредством плагинов и с внутренними информационными системами для автоматической авторизации и аутентификации пользователей.

Таким образом, на основе проведенного анализа сервисов видео-конференц-связи и в соответствии с обозначенными критериями в качестве решения был выбран сервис BBB (BigBlueButton) – открытое программное обеспечение для проведения веб-конференции. Сервис разработан в первую очередь для дистанционного обучения [5] с использованием HTML5 и реализует возможность интеграции в различные сервисы: Moodle, Sakai, Canvas и пр. BBB совместим с мобильными браузерами, поддерживает возможности работы с электронной доской, различными документами, презентациями, а также имеет функции разделения на зрителей и модераторов, что полностью удовлетворяет требованиям учреждения образования (URL: <https://docs.bigbluebutton.org/2.3/architecture.html>).

После разворачивания виртуального сервера для сервиса BBB в работе программного обеспечения был выявлен ряд ключевых особенностей:

1. Конечный мультимедийный поток обрабатывается на оборудовании пользователей, но загрузка аппаратных компонентов ниже (аналогично сервису MS Teams).
2. Доступна возможность настройки сжатия трафика для увеличения пропускной способности канала связи.
3. Есть возможность фиксировать процессы прохождения сессии студентами – проводить видеозапись конференции. Хранение видеозаписей было реализовано при проведении летней

экзаменационной сессии 2020 г. в связи с тяжелой эпидемиологической ситуацией. Благодаря фиксации видеоконференций и хранению записей в течение заданного периода времени сервис помог организовать качественный дистанционный учебный процесс, включая итоговые аттестации студентов.

4. Создание внутреннего сервера позволило организовать полноценный учебный процесс независимо от местоположения студентов. Дополнительно сервис ВВВ был задействован для проведения курсов по переподготовке.

5. С помощью сервера удобно создавать отдельные видеоконференции по предметам (лекции) для групповых занятий, а также для групп в пределах одной видеоконференции с целью разбиения потока по секциям.

6. Есть возможность организовать защищенный доступ через файрвол. При этом мультимедийный поток вне пределов учебного заведения может быть как шифрованным, так и нешифрованным. В пределах учебного заведения для увеличения пропускной способности потока используется нешифрованный мультимедийный поток (рис. 1).

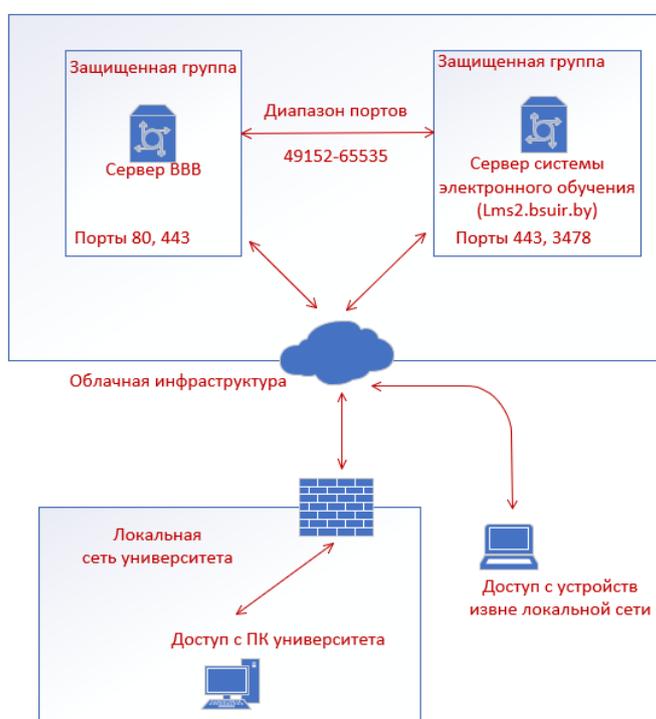


Рис. 1. Схема подключения учащихся к сервисам видео-конференц-связи на базе BigBlueButton

Fig. 1. Diagram of connecting students to video conferencing services based on BigBlueButton

Компьютерный эксперимент. Для проведения компьютерного эксперимента были использованы аппаратные ресурсы сервера ВВВ1 – Intel Xeon 4 core CPU, 8 Gb RAM. Эксперимент проводился на 30 клиентах. На оконечных устройствах клиенты загружали мультимедийный поток изображениями с веб-камер. На конференции в среднем загрузка процессора Intel i5-7400 составила 100 %, ОЗУ – 12 Гб, нагрузка на видеочип видеокарты AMD RX560 Series при декодировании мультимедиапотока – 40 %, нагрузка на локальную сеть – до 7 Мбит/с. Данные нагрузки оконечных устройств отслеживались с помощью встроенного средства Windows «диспетчер задач». Нагрузка на сервер ВВВ1 (30 клиентов и 7 Гб занятой оперативной памяти) составила 50 % в режиме средней нагрузки процессора (средство отслеживания нагрузки на сервер VMware Sphere является встроенным компонентом контроля виртуальных машин компании VMware). Следует отметить, что в момент подключения пользователей к конференции загрузка оперативной памяти была 100 %. Нагрузочное тестирование проходило в пределах аудиторного фонда учреждения образования. Данные для оценки загрузки аппаратных ресурсов представлены в разрезе нескольких дней (рис. 2).

Параметры графиков нагрузки усреднены и незначительно занижены, так как загрузка аппаратных ресурсов отслеживалась не программным обеспечением внутри виртуальной машины, а непосредственно гипервизором самой виртуальной машины с помощью средства отслеживания нагрузки VMware Sphere. Средний график нагрузки процессора (на рис. 2 салатная линия – CPU Usage Trend) не показывает ее объективных значений, и им условно можно пренебречь. Пики на графике обусловлены проведением преподавателями занятий в период с 19.10.2020 по 25.10.2020 дистанционно, причем пики максимальной нагрузки в четверг и пятницу обусловлены проведением поточных видеолекций с количеством участников более 60, что отражено и на графике нагрузки на оперативную память в текущий период (рис. 3).

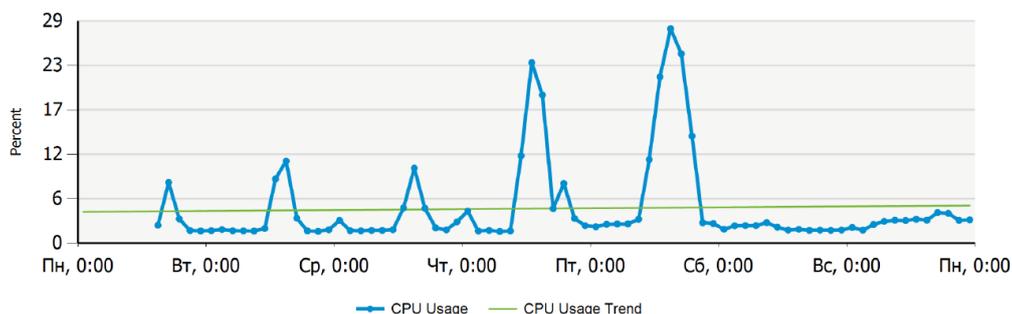


Рис. 2. График нагрузки CPU виртуального сервера BBB в период с 19.10.2020 по 25.10.2020

Fig. 2. BBB virtual server CPU load diagram in the period from 10.19.2020 to 10.25.2020

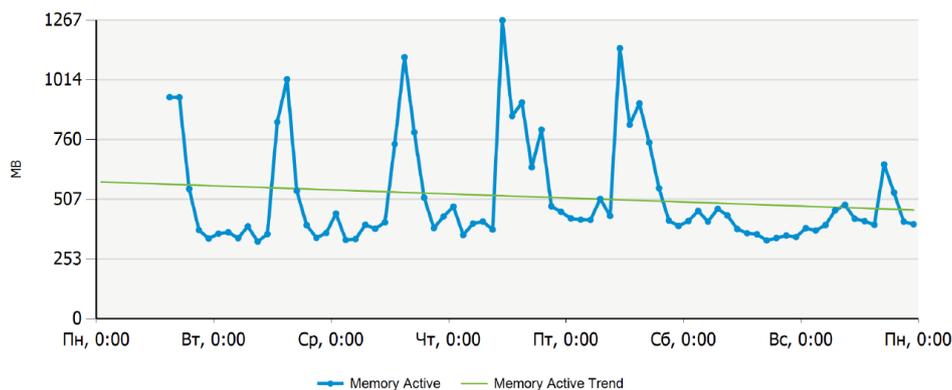


Рис. 3. График нагрузки RAM виртуального сервера BBB в период с 19.10.2020 по 25.10.2020

Fig. 3. BBB virtual server RAM load diagram in the period from 10.19.2020 to 10.25.2020

Нагрузка на сеть в разрезе выбранного временного интервала показана на рис. 4.

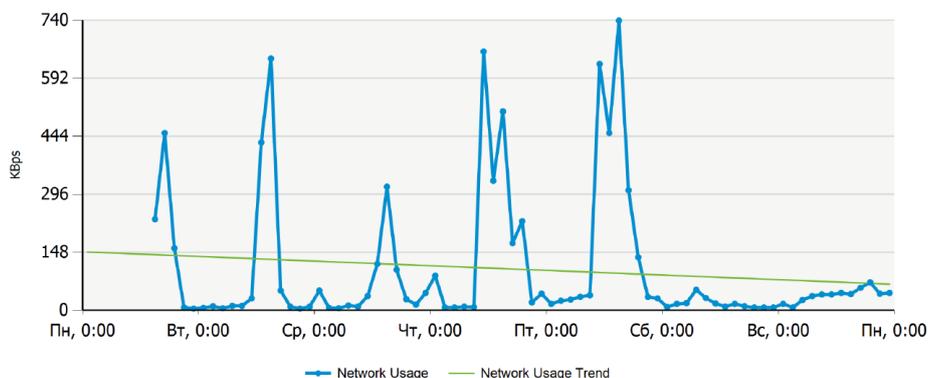


Рис. 4. График нагрузки локальной сети виртуального сервера BBB в период с 19.10.2020 по 25.10.2020

Fig. 4. The load diagram of the local network of the BBB virtual server in the period from 10.19.2020 to 10.25.2020

В период с 09.11.2020 по 15.11.2020 наблюдалось значительное увеличение нагрузки на аппаратные ресурсы, обусловленное внедрением сервиса для видеоконференций в опытную эксплуатацию. До периода ввода в эксплуатацию сервис работал в тестовом режиме с адаптацией под внутреннюю инфраструктуру без гарантии работоспособности. Максимальная нагрузка на CPU в период проведения видеоконференции повысилась до 57 % (рис. 5).

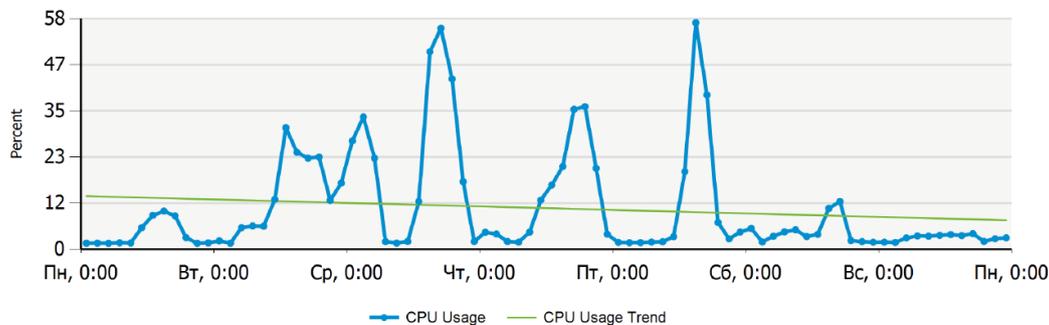


Рис. 5. График нагрузки CPU виртуального сервера BBB в период с 09.11.2020 по 15.11.2020
 Fig. 5. BBB virtual server RAM load diagram in the period from 11.09.2020 to 11.15.2020

Для дальнейшего компьютерного эксперимента было принято решение увеличить аппаратные ресурсы виртуального сервера. Процессор Intel Xeon был увеличен до 16 vCPU, память RAM – до 24 Гб. Рост нагрузки на оборудование обусловлен изменениями в организации учебного процесса, а именно переходом на формат удаленного обучения и проведением сессии по смешанной модели обучения. Нагрузки с 04.01.2021 по 10.01.2021 показаны на рис. 6–8.

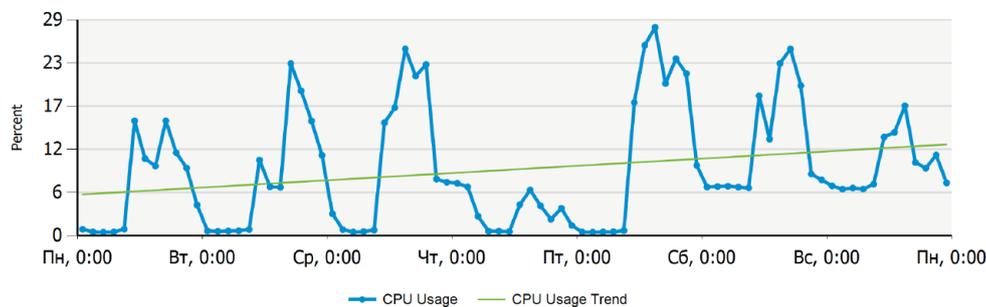


Рис. 6. График нагрузки CPU виртуального сервера BBB в период с 04.01.2021 по 10.01.2021
 Fig. 6. BBB virtual server RAM load diagram in the period from 01.04.2021 to 01.10.2021

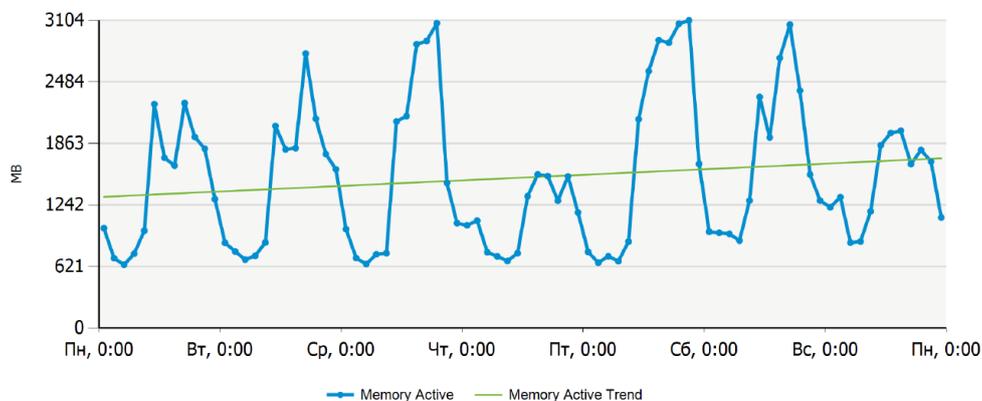


Рис. 7. График нагрузки RAM виртуального сервера BBB в период с 04.01.2021 по 10.01.2021
 Fig. 7. BBB virtual server RAM load diagram in the period from 01.04.2021 to 01.10.2021

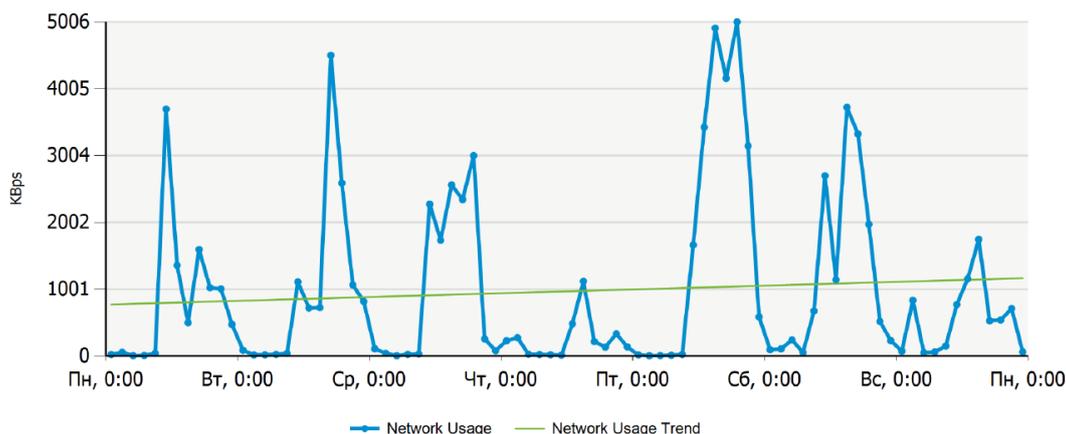


Рис. 8. График нагрузки локальной сети виртуального сервера ВВВ в период с 04.01.2021 по 10.01.2021

Fig. 8. The load diagram of the local network of the BBB virtual server in the period from 01.04.2021 to 01.10.2021

Тенденция увеличения нагрузки прослеживалась до окончания сессии 24.01.2021. Нагрузка на CPU и оперативную память выросла относительно первоначальных графиков. Пропускная способность внешнего канала связи с ростом нагрузки на локальную сеть также была увеличена с 250 до 500 Мбит/с.

Проблемы эксплуатации сервиса видео-конференц-связи на этапе прироста нагрузки. С ростом нагрузки на сервис возникла необходимость обойти ограничения на количество участников одной конференции. Поток учащихся и слушателей превысили возможности сервиса. Для обхода ограничения по количеству пользователей конференции требуется увеличение аппаратных ресурсов оборудования относительно первоначально выделенных. При входе в сервис пользователи зачастую нагружали подсистему распределения по видеоконференциям, что усложняло подключение к самой видеоконференции: возникали ошибки синхронизации звукового и видеопотоков, временные задержки, различные сторонние ошибки подключения. Для корректного распределения участников конференции и предотвращения ошибок необходима организация вычислительного кластера серверов ВВВ и установка единой точки входа в вычислительный кластер.

Закключение. Итогом настоящей работы стало определение ключевых аспектов при подборе сервиса видео-конференц-связи и выбор системы видео-конференц-связи.

Были выявлены особенности работы сервиса в долгосрочном периоде. Использование сервиса ВВВ позволило полноценно организовать учебный процесс и образовательную деятельность в учреждении образования. Сервис является условно бесплатным с открытым исходным кодом и полноценной интеграцией в системы электронного обучения.

В результате компьютерного эксперимента была определена нагрузка на аппаратные компоненты сервера: центральный процессор, память, производительность локальной сети. Загрузка рассмотрена в динамике. Определены особенности работы сервера при увеличении аппаратных ресурсов, сформулированы проблемы эксплуатации сервиса видео-конференц-связи на этапе прироста нагрузки.

Вклад авторов. А. Н. Марков проанализировал проблемы внедрения видео-конференц-связи, определил и описал специфику выбора сервиса видео-конференц-связи, осуществил сбор статистических данных компьютерного эксперимента и сформулировал результаты исследования. Р. О. Игнатович выполнил внедрение сервиса видео-конференц-связи в учебный процесс. Обзор средств видео-конференц-связи осуществлен авторами совместно. Все авторы участвовали в интерпретации и анализе полученных данных компьютерного эксперимента. А. И. Парамонов сформулировал ключевые цели и задачи исследования, определил план статьи и структуру эксперимента.

Список использованных источников

1. Парамонов, А. И. Проблемы дистанционного образования и их прикладные решения в образовательных технологиях / А. И. Парамонов // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития = Engineering education: challenges and developments : материалы X Междунар. науч.-метод. конф., Минск, 26 нояб. 2020 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2020. – С. 182–187.
2. Марков, А. Н. Готовность учреждений высшего образования к цифровой трансформации процессов / А. Н. Марков, С. А. Мигалевич // Цифровая трансформация. – 2021. – № 2. – Р. 64–68.
3. Gough, M. Video Conferencing over IP: Configure, Secure, and Troubleshoot / M. Gough. – Syngress, 2006. – 336 p.
4. Barlow, J. Smart Videoconferencing: New Habits for Virtual Meetings / J. Barlow, P. Peter, L. Barlow. – Berrett-Koehler Publishers, 2002. – 273 с.
5. Яремчук, С. Проект BIGBLUEBUTTON. Платформа для видеоконференций и дистанционного обучения / С. Яремчук // Системный администратор. – 2012. – № 5(114). – С. 98–101.

References

1. Paramonov A. I. *Distance education problems and their applied solutions in educational technologies*. Vyssee tehnikeskoe obrazovanie: problemy i puti razvitiya : materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii, Minsk, 26 nojabrja 2020 g. Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki [Engineering Education: Challenges and Developments: Materials of the X International Scientific and Methodological Conference, Minsk, 26 November 2020. Ministry of Education of the Republic of Belarus, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki, 2020, pp. 182–187 (In Russ.).
2. Markov A. N., Migalevich S. A. *Readiness of higher education institutions for digital transformation processes*. Cifrovaja transformacija [Digital Transformation], 2021, no. 2, pp. 64–68 (In Russ.).
3. Gough M. *Video Conferencing over IP: Configure, Secure, and Troubleshoot*. Syngress, 2006, 336 p.
4. Barlow J., Peter P., Barlow L. *Smart Videoconferencing: New Habits for Virtual Meetings*. – Berrett-Koehler Publishers, 2002, 273 p.
5. Yaremchuk S. *Project BIGBLUEBUTTON. Platform for video conferencing and distance learning*. Sistemnyj administrator [System Administrator], 2012, no. 5(114), pp. 98–101 (In Russ.).

Информация об авторах

Марков Алексей Николаевич, аспирант, заместитель начальника Центра информатизации и инновационных разработок Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
<https://orcid.org/0000-0001-8508-1812>
E-mail: a.n.markov@bsuir.by

Игнатович Роман Олегович, начальник отдела системного и технического обслуживания Центра информатизации и инновационных разработок Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
<https://orcid.org/0000-0001-7233-6521>
E-mail: r.ihnатович@bsuir.by

Парамонов Антон Иванович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем и технологий Института информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
<https://orcid.org/0000-0001-6616-2481>
E-mail: a.paramonov@bsuir.by

Information about the authors

Aleksey N. Markov, Postgraduate Student, Deputy Head of the Center for Informatization and Innovative Development, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
<https://orcid.org/0000-0001-8508-1812>
E-mail: a.n.markov@bsuir.by

Roman O. Ihnatovich, Head of the Department of System and Technical Services of the Center for Informatization and Innovative Development, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
<https://orcid.org/0000-0001-7233-6521>
E-mail: r.ihnатович@bsuir.by @bsuir.by

Anton I. Paramonov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Information Systems and Technologies of the Institute of Information Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
<https://orcid.org/0000-0001-6616-2481>
E-mail: a.paramonov@bsuir.by



УДК 004.042
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-26-39>

Оригинальная статья
Original Paper

Оценка состояния умственной усталости оператора под действием электромагнитного шумового излучения

А. В. Сидоренко[✉], Н. А. Солодухо

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь
[✉]E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Аннотация

Цели. Решается задача определения состояния умственной усталости оператора при передаче и обработке информации в условиях электромагнитных шумовых излучений. Актуальность задачи связана с необходимостью обработки и передачи информации конфиденциального характера оператором, находящимся в ограниченном пространстве мобильной технической системы.

Методы. Используются методы теории спектрального анализа экспериментально полученных данных.

Результаты. Результаты представленных экспериментальных исследований получены на основе обработки и анализа электроэнцефалограмм, зарегистрированных в стандартных отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6. Проанализированы спектральные плотности мощностей дельта-, альфа-, бета-, гамма-ритмов указанных отведений электроэнцефалограмм оператора при воздействии электромагнитных шумовых излучений.

Заключение. Наличие умственной усталости оператора в условиях электромагнитных излучений основывается на сравнительном анализе полученных результатов и описанных в научной литературе данных, связанных с возникновением хронической умственной усталости; усталости, вызванной выполнением симуляционных заданий военными, и усталости, вызванной выполнением теста RVP.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, генератор шума, электроэнцефалограмма, умственная усталость, спектральная плотность мощности

Для цитирования. Сидоренко, А. В. Оценка состояния умственной усталости оператора под действием электромагнитного шумового излучения / А. В. Сидоренко, Н. А. Солодухо // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 26–39. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-26-39>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 01.10.2021
Подписана в печать | Accepted 11.11.2021
Опубликована | Published 29.12.2021

Assessment of the mental fatigue state of an operator influenced by electromagnetic noise radiation

Alevtina V. Sidorenko[✉], Mikita A. Saladukha

Belarusian State University,
av. Nezavisimosti, 4, Minsk, 220030, Belarus
[✉]E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Abstract

Objectives. The problem of determining the mental fatigue of the operator, which is processing the confidential information under the influence of electromagnetic noise radiation, is solved. The relevance of the problem is associated with the need to process the confidential information by the operator located in the limited space of a mobile technical system.

Methods. The methods of spectral analysis theory of the results, received in the process of experimental studies the electroencephalograms, are used.

Results. The results of experimental studies were obtained based on the processing and analysis of electroencephalograms recorded in standard leads Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6. The following quantitative parameters have been analyzed: power spectral density of delta-, theta-, alpha-, beta-, gamma-rhythms under the influence of electromagnetic noise radiation.

Conclusion. The presence of mental fatigue of the operator is based on a comparative analysis of the obtained results and the data described in the scientific literature related to the occurrence of chronic mental fatigue; the fatigue caused by the military performing simulation tasks; mental fatigue caused by performing an RVP test.

Keywords: electromagnetic radiation, noise generator, electroencephalogram, mental fatigue, power spectral density

For citation. Sidorenko A. V., Saladukha M. A. *Assessment of the mental fatigue state of an operator in-fluenced by electromagnetic noise radiation*. *Informatika [Informatics]*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 26–39 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-26-39>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Умственная усталость – это временная неспособность человека выполнять когнитивные действия. На фоне умственной усталости могут возникать трудности с концентрацией внимания и решением поставленной задачи.

В современном мире человек часто сталкивается с воздействием неионизирующих электромагнитных излучений, генерируемых научным, лабораторным, промышленным или бытовым оборудованием. Интерпретация влияния электромагнитного излучения на центральную нервную систему человека в научной литературе [1, 2] неоднозначна. Предположительно, одним из состояний центральной нервной системы, вызываемых воздействием электромагнитного излучения, и является умственная усталость.

Известно, что для защиты информации от несанкционированного доступа по каналам электромагнитных излучений и наводок можно применять пассивные и активные методы. При использовании в качестве активных методов защиты информации генераторов электромагнитного шума важно оценить влияние электромагнитного шумового излучения на оператора мобильных систем, находящегося в ограниченном пространстве.

Исследование воздействия электромагнитного шумового излучения на центральную нервную систему проводилось в работах [3–5]. При наличии электромагнитного шумового излучения наблюдается активизация процессов в мозге [5], увеличивается когнитивная нагрузка, возникают скрытая тревога [3] и стресс [4]. Подробное исследование воздействия такого излучения на состояние умственной усталости оператора ранее не проводилось.

Целью настоящей работы является определение наличия умственной усталости оператора под действием электромагнитного шумового излучения на основе полученных при обработке количественных параметров электроэнцефалограмм, которые отражают деятельность его центральной нервной системы.

В процессе проведения исследований с помощью приборной регистрации были рассчитаны спектральные плотности мощности дельта-, тета-, альфа-, бета-, гамма-ритмов электроэнцефалограмм в передней, височной, теменной, центральной, затылочной и центрально-теменной областях головы, а также по всей поверхности головы. При оценке спектральной плотности мощности в отдельных областях головы использовалось усреднение спектральных плотностей мощности электроэнцефалограмм соответствующих отведений.

Методика проведения исследований. Регистрация электроэнцефалограмм осуществлялась по международной системе 10–20 с использованием электроэнцефалографа «Нейрокартограф» фирмы МБН, погрешность измерения составила 5 %. Обработка и анализ электроэнцефалограмм проводились в разработанной авторами информационно-измерительной системе, адаптированной для работы с электроэнцефалограммами [6]. Объектом исследований являлись электроэнцефалограммы отведений Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6 в следующих областях: по всей поверхности головы (все вышеуказанные отведения), в передней области (отведения Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8 и отведения F3 и F4), височной области (отведения T3, T4, T5, T6), в затылочной области (отведения O1, O2), центрально-теменной области (отведения C3, C4, P3, P4), центральной области (отведения C3 и C4) [7, 8]. Электроэнцефалограммы обрабатывались в режимах фона и наличия генератора электромагнитного шумового излучения. В режиме фона использовались электроэнцефалограммы оператора без излучения. Спектральная плотность мощности ритмов головного мозга рассчитывалась с помощью быстрого преобразования Фурье. Анализируемые диапазоны включали альфа-ритм (8–12 Гц), бета-ритм (12–20 Гц), тета-ритм (4–8 Гц), дельта-ритм (0–4 Гц) и гамма-ритм (20–40 Гц). При оценке спектральной плотности мощности в какой-либо области головы применялось усреднение спектральных плотностей мощности электроэнцефалограмм отведений, связанных с этой областью. В качестве генератора электромагнитного шума был использован генератор на транзисторах мощностью 30 мВт с частотным диапазоном в области 5 ГГц.

Результаты исследований и их обсуждение. Рассмотрим вариации спектральной плотности мощности альфа-, бета-, тета-, дельта-, гамма-ритмов электроэнцефалограмм во всех анализируемых отведениях.

Спектральная плотность мощности альфа-ритма относительно фоновое значение при наличии излучения генератора шума изменялась следующим образом (рис. 1): в отведении Fp1 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности альфа-ритма более чем в 3,5 раза, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности альфа-ритма увеличилась на 21 %, в отведении F3 значение спектральной плотности мощности альфа-ритма повысилось в 3,1 раза, в отведении F4 прирост спектральной плотности мощности альфа-ритма составил 3,4 % (изменения оказались меньше погрешности), в отведении C3 наблюдалось возрастание значения спектральной плотности мощности альфа-ритма в 3,3 раза, в отведении C4 спектральная плотность мощности альфа-ритма выросла на 18 %, в отведении P3 наблюдалось повышение значения спектральной плотности мощности альфа-ритма почти в 3,4 раза, в отведении P4 спектральная плотность мощности альфа-ритма снизилась на 23,2 %, в отведении O1 наблюдался рост значения спектральной плотности мощности альфа-ритма в 3,6 раза, в отведении O2 спектральная плотность мощности альфа-ритма уменьшилась на 42,3 %, в отведении F7 значение спектральной плотности мощности альфа-ритма возросло в 7,1 раза, в отведении F8 спектральная плотность мощности альфа-ритма увеличилась на 0,3 % (изменения оказались меньше погрешности метода), в отведении T3 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности альфа-ритма в 7,1 раза, в отведении T4 прирост спектральной плотности мощности альфа-ритма составил 43,8 %, в отведении T5 значение спектральной плотности мощности альфа-ритма увеличилось почти в 7,9 раза, в отведении T6 спектральная плотность мощности альфа-ритма выросла на 15,7 %.

Таким образом, при наличии излучения генератора шума спектральная плотность мощности альфа-ритма возрастает относительно фона во всех отведениях, кроме P4 и O2, в которых она падает. В отведениях F4 и F8 изменения не превысили погрешность.

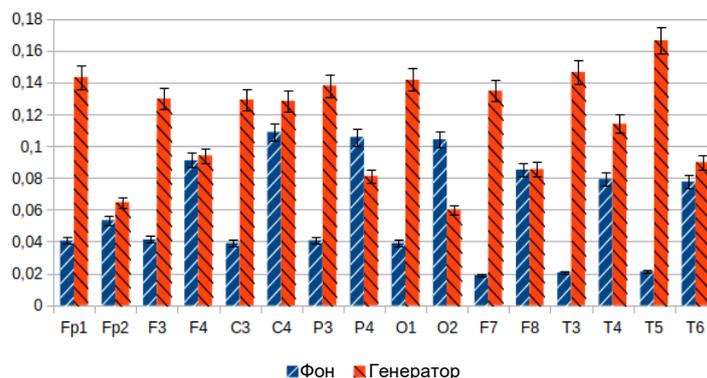


Рис. 1. Диаграммы спектральной плотности мощности альфа-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 1. Diagrams of alpha-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

Изменения спектральной плотности мощности бета-ритма относительно фонового значения при наличии излучения генератора шума сводились к следующему (рис. 2): в отведении Fp1 наблюдалось увеличение значения спектральной плотности мощности бета-ритма более чем в пять раз, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности бета-ритма увеличилась на 56,1 %, в отведении F3 значение спектральной плотности мощности бета-ритма повысилось в 4,6 раза, в отведении F4 прирост спектральной плотности мощности бета-ритма составил 37,3 %, в отведении C3 наблюдалось возрастание значения спектральной плотности мощности бета-ритма в 4,5 раза, в отведении C4 спектральная плотность мощности бета-ритма выросла на 49,7 %, в отведении P3 наблюдалось повышение значения спектральной плотности мощности бета-ритма в 3,5 раза, в отведении P4 спектральная плотность мощности бета-ритма снизилась на 16,7 %, в отведении O1 наблюдался рост значения спектральной плотности мощности бета-ритма почти в 2,2 раза, в отведении O2 спектральная плотность мощности бета-ритма уменьшилась на 55 %, в отведении F7 значение спектральной плотности мощности бета-ритма возросло в 8,8 раза, в отведении F8 спектральная плотность мощности бета-ритма увеличилась на 15,9 %, в отведении T3 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности бета-ритма почти в 7,5 раза, в отведении T4 прирост спектральной плотности мощности бета-ритма составил 41 %, в отведении T5 значение спектральной плотности мощности бета-ритма повысилось в четыре раза, в отведении T6 наблюдалось падение спектральной плотности мощности бета-ритма на 7,2 %.

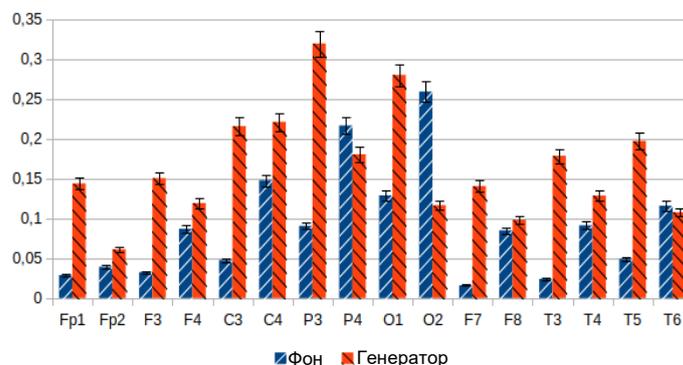


Рис. 2. Диаграммы спектральной плотности мощности бета-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 2. Diagrams of beta-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

Итак, при наличии излучения генератора шума спектральная плотность мощности бета-ритма возрастает относительно фона во всех отведениях, кроме P4, O2 и T6, в которых она падает.

Спектральная плотность мощности тета-ритма относительно фонового значения при наличии излучения генератора шума изменялась следующим образом (рис. 3): в отведении Fp1 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности тета-ритма более чем в 2,2 раза, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности тета-ритма увеличилась на 20,8 %, в отведении F3 значение спектральной плотности мощности тета-ритма повысилось почти в 2,2 раза, в отведении F4 прирост спектральной плотности мощности тета-ритма составил 2,5 % (изменения оказались меньше погрешности), в отведении C3 наблюдалось возрастание значения спектральной плотности мощности тета-ритма почти в 2,2 раза, в отведении C4 снижение спектральной плотности мощности тета-ритма составило 18,2 %, в отведении P3 наблюдалось повышение значения спектральной плотности мощности тета-ритма на 77,2 %, в отведении P4 спектральная плотность мощности тета-ритма снизилась на 4,2 % (изменения оказались меньше погрешности), в отведении O1 наблюдался рост значения спектральной плотности мощности тета-ритма почти в 2,1 раза, в отведении O2 спектральная плотность мощности тета-ритма уменьшилась на 8,8 %, в отведении F7 значение спектральной плотности мощности тета-ритма возросло почти в 3,1 раза, в отведении F8 наблюдалось снижение спектральной плотности мощности тета-ритма на 14,2 %, в отведении T3 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности тета-ритма в 2,5 раза, в отведении T4 было выявлено снижение спектральной плотности мощности тета-ритма на 10,5 %, в отведении T5 значение спектральной плотности мощности тета-ритма повысилось почти в 2,7 раза, в отведении T6 спектральная плотность мощности тета-ритма снизилась на 1,4 %.

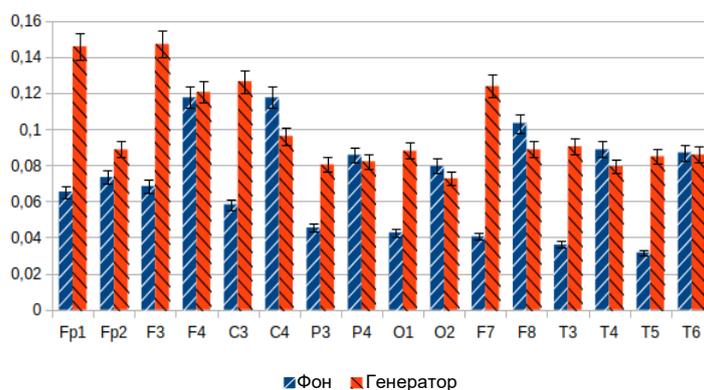


Рис. 3. Диаграммы спектральной плотности мощности тета-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 3. Diagrams of theta-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

Таким образом, при наличии излучения генератора шума в отведениях левого полушария отмечается возрастание спектральной плотности мощности тета-ритма, а в отведениях правого полушария – уменьшение. Исключением из этой тенденции являются отведения правого полушария Fp2 и F4, в них наблюдается рост спектральной плотности мощности тета-ритма при наличии излучения генератора шума.

Спектральная плотность мощности дельта-ритма электроэнцефалограмм оператора относительно фонового значения при наличии излучения генератора шума изменялась следующим образом (рис. 4): в отведении Fp1 снижение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 47,1 %, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности дельта-ритма уменьшилась на 8,3 %, в отведении F3 наблюдалось понижение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма на 47 %, в отведении F4 спектральная плотность мощности

дельта-ритма снизилась на 10,3 %, в отведении С3 падение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 52,1 %, в отведении С4 спектральная плотность мощности дельта-ритма упала на 19,5 %, в отведении Р3 наблюдалось падение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма на 56,1 %, в отведении Р4 прирост спектральной плотности мощности дельта-ритма составил 9,8 %, в отведении О1 уменьшение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 50 %, в отведении О2 спектральная плотность мощности дельта-ритма увеличилась на 38,5 %, в отведении F7 наблюдалось снижение значения спектральной плотности мощности дельта-ритма на 50,4 %, в отведении F8 снижение спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 2,2 % (изменения оказались меньше погрешности), в отведении Т3 значение спектральной плотности мощности дельта-ритма уменьшилось на 50,5 %, в отведении Т4 наблюдалось снижение спектральной плотности мощности дельта-ритма на 12,4 %, в отведении Т5 значение спектральной плотности мощности дельта-ритма снизилось почти на 50,7 %, в отведении Т6 падение спектральной плотности мощности дельта-ритма составило 2,7 %.

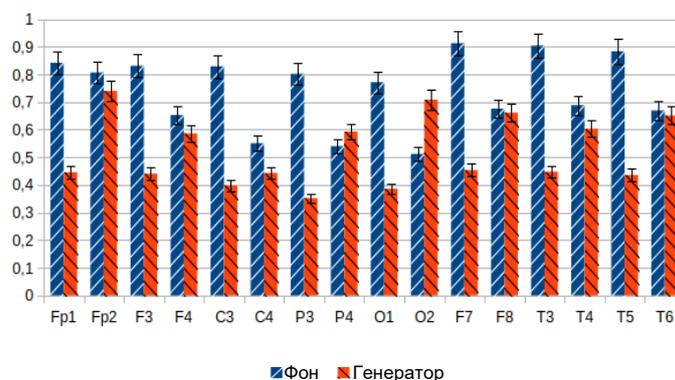


Рис. 4. Диаграммы спектральной плотности мощности дельта-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 4. Diagrams of delta-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

Таким образом, при наличии излучения генератора шума спектральная плотность мощности дельта-ритма падает относительно фона во всех отведениях, кроме Р4, О2, где наблюдается ее рост.

Вариации спектральной плотности мощности гамма-ритма относительно фоновых значений при наличии излучения генератора шума сводились к следующему (рис. 5): в отведении Fp1 наблюдался прирост значения спектральной плотности мощности гамма-ритма более чем в 5,1 раза, в отведении Fp2 спектральная плотность мощности гамма-ритма увеличилась на 66,1 %, в отведении F3 значение повысилось почти в 4,9 раза, в отведении F4 прирост составил 54,9 %, в отведении С3 наблюдалось возрастание значения спектральной мощности гамма-ритма почти в пять раз, в отведении С4 спектральная плотность мощности гамма-ритма выросла на 47,2 %, в отведении Р3 наблюдалось повышение значения спектральной плотности мощности гамма-ритма почти в 5,2 раза, в отведении Р4 наблюдался прирост на 21,8 %, в отведении О1 произошел рост в 5,9 раза, в отведении О2 спектральная плотность мощности гамма-ритма уменьшилась на 7,2 %, в отведении F7 значение спектральной плотности мощности гамма-ритма возросло в 12,6 раза, в отведении F8 спектральная плотность мощности гамма-ритма увеличилась на 31 %, в отведении Т3 наблюдался прирост в 8,8 раза, в отведении Т4 рост составил 43,1 %, в отведении Т5 значение спектральной плотности мощности гамма-ритма повысилось в 7,8 раза, в отведении Т6 спектральная плотность мощности гамма-ритма выросла на 31 %.

Можно сделать вывод, что при наличии излучения генератора шума спектральная плотность мощности гамма-ритма возрастает относительно фона во всех исследуемых отведениях, кроме отведения О2, в котором она убывает.

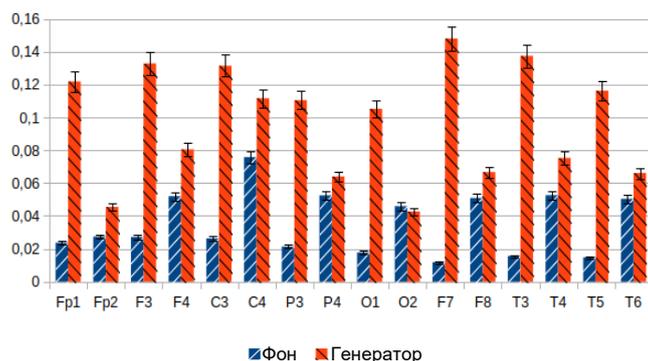


Рис. 5. Диаграммы спектральной плотности мощности гамма-ритма электроэнцефалограмм при наличии излучения генератора шума

Fig. 5. Diagrams of gamma-rhythm power spectral density of electroencephalograms in presence of noise generator radiation

В работе [9] показано изменение спектра энергии различных ритмов (дельта – 2–4 Гц, тета – 4–8 Гц, альфа1 – 8–10 Гц, альфа2 – 10–13 Гц, бета1 – 13–20 Гц, бета2 – 20–30 Гц) в отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T5, T6 при наличии хронической усталости оператора. Спектр энергии ритмов при хронической усталости возрастает для всех анализируемых отведений, кроме бета2-ритма в отведении Fp1. Спектральная плотность мощности данного ритма не изменилась. Отметим, что тенденция изменения спектра энергии совпадает с тенденцией изменения спектра плотности мощности.

Исследованные в процессе анализа электроэнцефалограмм ритмы при наличии электромагнитного шумового излучения совпадают с ритмами, рассматриваемыми при хронической усталости оператора.

В большинстве отведений спектральные плотности мощности альфа-, бета-, тета-, гамма-ритмов возрастают, а спектральная плотность мощности дельта-ритма убывает. Полученные данные позволяют сделать предварительное заключение, что четыре параметра (спектральные плотности мощности альфа-, бета-, тета-, гамма-ритмов) подтверждают наличие усталости у оператора при излучении генератора шума, а изменения спектральной плотности мощности дельта-ритма опровергают, что оператор испытывает усталость (см. рис. 1–5 и данные работы [9]).

Спектральная плотность мощности тета-ритма, усредненная по всей поверхности головы, увеличилась на 40,2 % относительно фона при наличии электромагнитного шумового излучения (рис. 6, а). Это может быть следствием умственной усталости (рис. 6, б), определенной методами многофакторного анализа и линейной алгебры в работе [10].

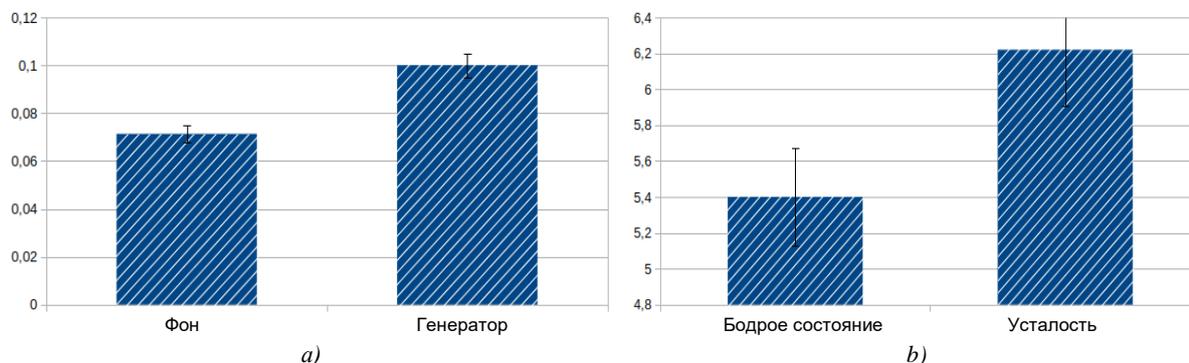


Рис. 6. Диаграммы спектральной плотности мощности тета-ритма электроэнцефалограмм по всей поверхности головы при наличии излучения генератора шума (а) и в состоянии умственной усталости (б) [10]

Fig. 6. Diagrams of theta-rhythm power spectral density of electroencephalograms in whole head surface in presence of noise generator (a) and mental fatigue (b) [10]

В работе [11] представлены результаты изменений спектральной мощности тета-ритма в отведениях F3, F4, T3, T4, O1, O2 в результате умственной усталости, вызванной симуляцией военного задания. Военное задание заключалось в необходимости водить машину (осуществлять патрулирование) на симуляторе по плохой дороге либо бездорожью с уклоном дороги до 60°, одновременно избегая препятствий в виде мин и камней. Симуляция машины была реализована устройством LMV Lince simulator, установленным на платформу с шестью степенями свободы (URL: <https://www.simfor.net/en/military-vehicle-simulator/>). Система с высокой степенью достоверности симулировала легкое транспортное средство многоцелевого назначения, генерируя аудио- и видеосигналы, а также сигналы движения транспортного средства. Спектральная мощность тета-ритма в состоянии умственной нагрузки с помощью симуляции военного задания менялась относительно мощности до начала его выполнения следующим образом (рис. 7): в отведениях F3, F4, T3, O1 она росла (тенденция совпадает со случаем при наличии излучения генератора шума), в отведении T4 увеличивалась (тенденция противоположна со случаем при наличии излучения генератора шума), в отведении O2 падала (тенденция совпадает со случаем при наличии излучения генератора шума) (см. рис. 3 и 7). Полученные результаты позволяют сделать предварительное заключение о наличии умственной усталости у оператора при действии излучения генератора шума.

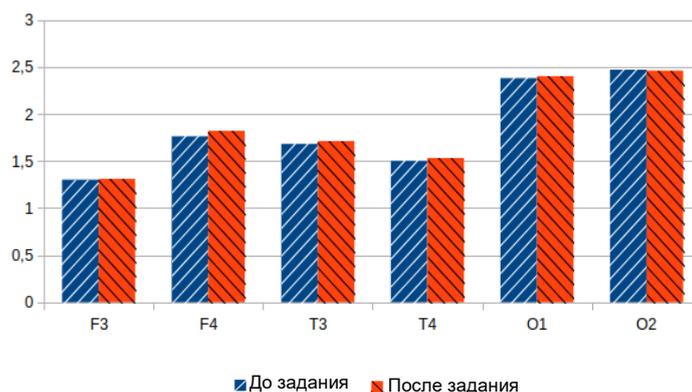


Рис. 7. Диаграммы спектральной мощности тета-ритма электроэнцефалограмм при выполнении симуляции военного задания [11]

Fig. 7. Diagrams of theta-rhythm spectral power of electroencephalograms in the result of combat mission simulation implementation [11]

В работе [12] исследовалось изменение мощности тета-ритма в отведении Fp1 электроэнцефалограмм у людей при умственной усталости, вызванной выполнением теста RVP (rapid visual information processing, быстрая обработка зрительной информации) в течение 10, 20 и 30 мин (рис. 8). Видно, что мощность тета-ритма при умственной усталости росла. При наличии излучения генератора электромагнитного шума спектральная плотность мощности тета-ритма в отведении Fp1 электроэнцефалограммы увеличилась в 2,2 раза относительно фона (см. рис. 3).

Сравнивая результаты, показанные на рис. 3 и 8, можно сделать вывод, что при наличии излучения генератора электромагнитного шума оператор испытывает усталость.

Значения спектральной плотности мощности по всей поверхности головы были получены усреднением значений спектральной плотности мощности ритмов во всех 16 исследуемых отведениях: в передней области головы – в отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8 (режим 1) и в отведениях F3 и F4 (режим 2); в центрально-теменной области головы – в отведениях C3, C4, P3, P4; в височной области головы – в отведениях T3, T4, T5, T6; в затылочной области головы – в отведениях O1 и O2.

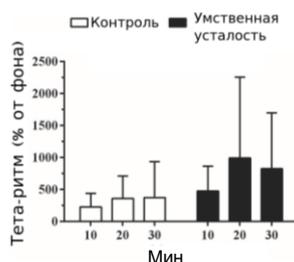


Рис. 8. Изменение мощности тета-ритма в отведении Fp1 при выполнении теста RVP в течение 10, 20 и 30 мин [12]

Fig. 8. Theta-rhythm power change in Fp1 lead during implementation of RVP test during 10, 20 and 30 minutes [12]

На рис. 9, а показано изменение спектральной плотности мощности тета-ритма в разных областях головы: по всей поверхности головы, в передней области (отведения Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8), центрально-теменной (отведения C3, C4, P3, P4), височной (отведения T3, T4, T5, T6) и затылочной (отведения O1, O2) – при наличии излучения генератора шума. По всей поверхности головы спектральная плотность мощности тета-ритма увеличилась на 40,2 %, в передней области – на 52,5 %, центрально-теменной области – на 25,5 %, височной области – на 39,8 %, затылочной области – на 31,1 %.

В работе [8] исследовалась хроническая усталость у врачей. Рассматривалось изменение относительного значения мощности тета-, альфа-, бета-ритмов у врачей во время отдыха и после рабочего дня. Усталость усиливалась еще больше при выполнении перед исследованием умственной задачи. Спектральная мощность измерялась по всей поверхности головы, в передней области (отведения Fz, Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8), центрально-теменной (отведения Cz, Pz, C3, C4, P3, P4), височной (отведения T3, T4, T5, T6) и затылочной (отведения O1, O2). Мощность тета-ритма в состоянии хронической усталости у врачей возрастала во всех рассматриваемых областях (рис. 9, b).

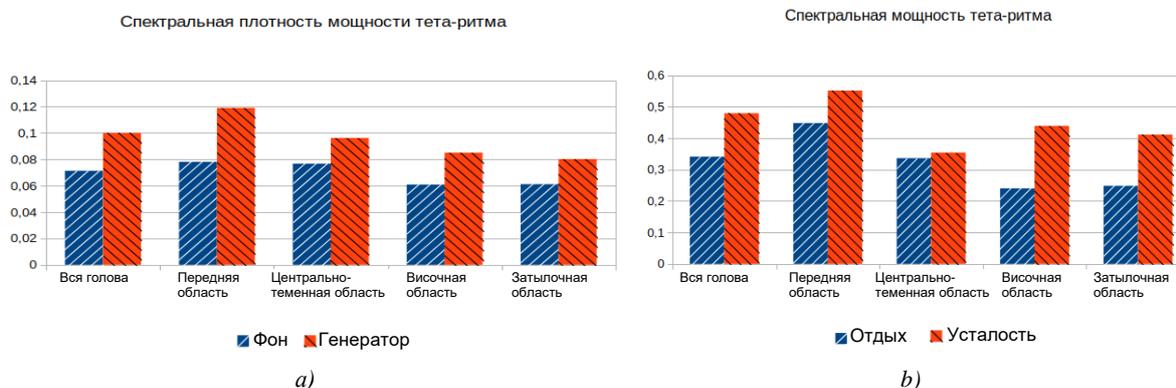


Рис. 9. Изменение спектральной плотности мощности тета-ритма при наличии излучения генератора электромагнитного шума (а) и при наличии хронической умственной усталости (b) [7]

Fig. 9. Theta-rhythm power spectral density change in presence of radiation of electromagnetic noise generator (a) and in presence of chronic mental fatigue (b) [7]

На рис. 10, а показано изменение спектральной плотности мощности альфа-ритма в разных областях головы: по всей поверхности головы, в передней области (отведения Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8), центрально-теменной (отведения C3, C4, P3, P4), височной (отведения T3, T4, T5, T6) и затылочной (отведения O1, O2) – при наличии излучения генератора шума.

По всей поверхности головы спектральная плотность мощности альфа-ритма выросла относительно фона на 91,1 %, в передней области – на 97,4 %, центрально-теменной области – на 62 %, височной области – в 2,6 раза, затылочной области – на 40,9 %. При этом мощность альфа-ритма при умственной усталости падала во всех рассматриваемых областях (рис. 10, b).

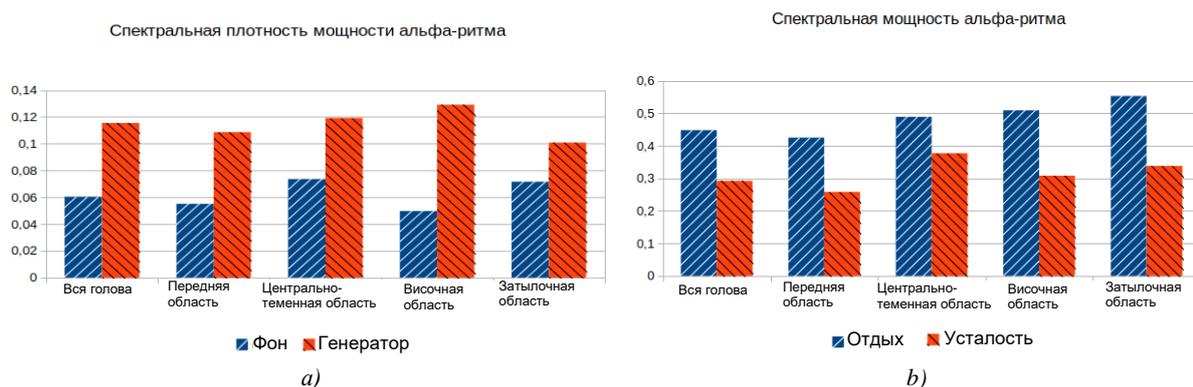


Рис. 10. Изменение спектральной плотности мощности альфа-ритма при наличии излучения генератора электромагнитного шума (а) и при наличии умственной усталости у врачей (b) [7]

Fig. 10. Alpha-rhythm power spectral density change in presence of radiation of electromagnetic noise generator (a) and in presence of mental fatigue of doctors (b) [7]

На рис. 11, а показано изменение спектральной плотности мощности бета-ритма в разных областях головы: по всей поверхности головы, в передней области (отведения Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8), центрально-теменной (отведения С3, С4, Р3, Р4), височной (отведения Т3, Т4, Т5, Т6) и затылочной (отведения О1, О2) – при наличии излучения генератора шума. Как показал анализ, по всей поверхности головы спектральная плотность мощности бета-ритма относительно фона выросла на 82,4 %, в передней области – в 2,5 раза, центрально-теменной области – на 86,5 %, височной области – в 2,2 раза, затылочной области – на 2,2 % (изменения не превысили погрешность). Мощность бета-ритма при хронической усталости выросла во всех исследуемых областях (рис. 11, b).

Таким образом, обобщая изменения спектральной плотности мощности в разных областях головы при наличии излучения генератора шума и данные работы [7], можно сделать вывод, что умственная усталость у оператора присутствует.

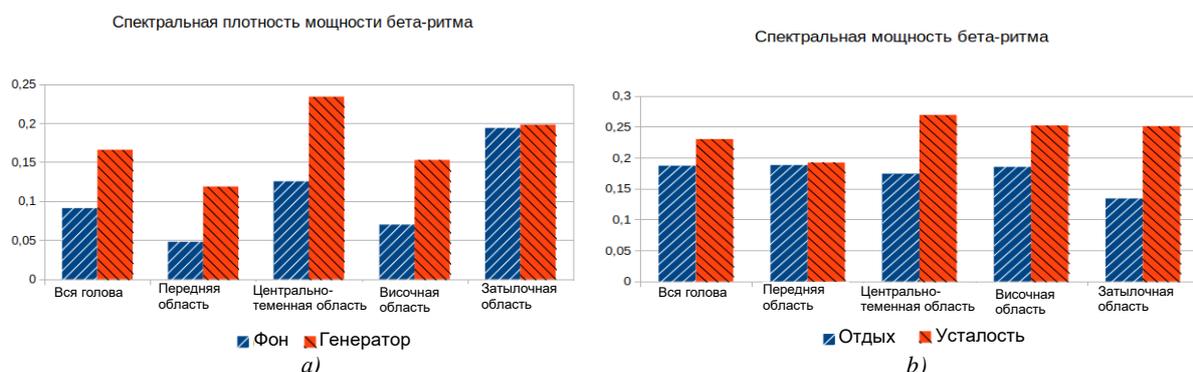


Рис. 11. Изменение спектральной плотности мощности бета-ритма при наличии излучения генератора электромагнитного шума (а) и при наличии умственной усталости у врачей (b) [7]

Fig. 11. Beta-rhythm power spectral density change in presence of radiation of electromagnetic noise generator (a) and in presence of mental fatigue in doctors (b) [7]

При наличии излучения генератора шума наблюдались следующие изменения относительно фона спектральной мощности дельта-, тета-, альфа-, бета-ритмов в передней (отведения F3, F4) и центральной (отведения С3, С4) областях головы: уменьшение спектральной плотности мощности дельта-ритма на 30,8 % в передней области головы и на 39,1 % в центральной области (рис. 12, а), возрастание спектральной плотности мощности тета-ритма на 43,9 % в передней области и на 26,6 % в центральной области (рис. 12, b), возрастание спектральной плотности мощности бета-ритма в 2,3 раза в передней области и в 2,2 раза в центральной области (рис. 12, с).

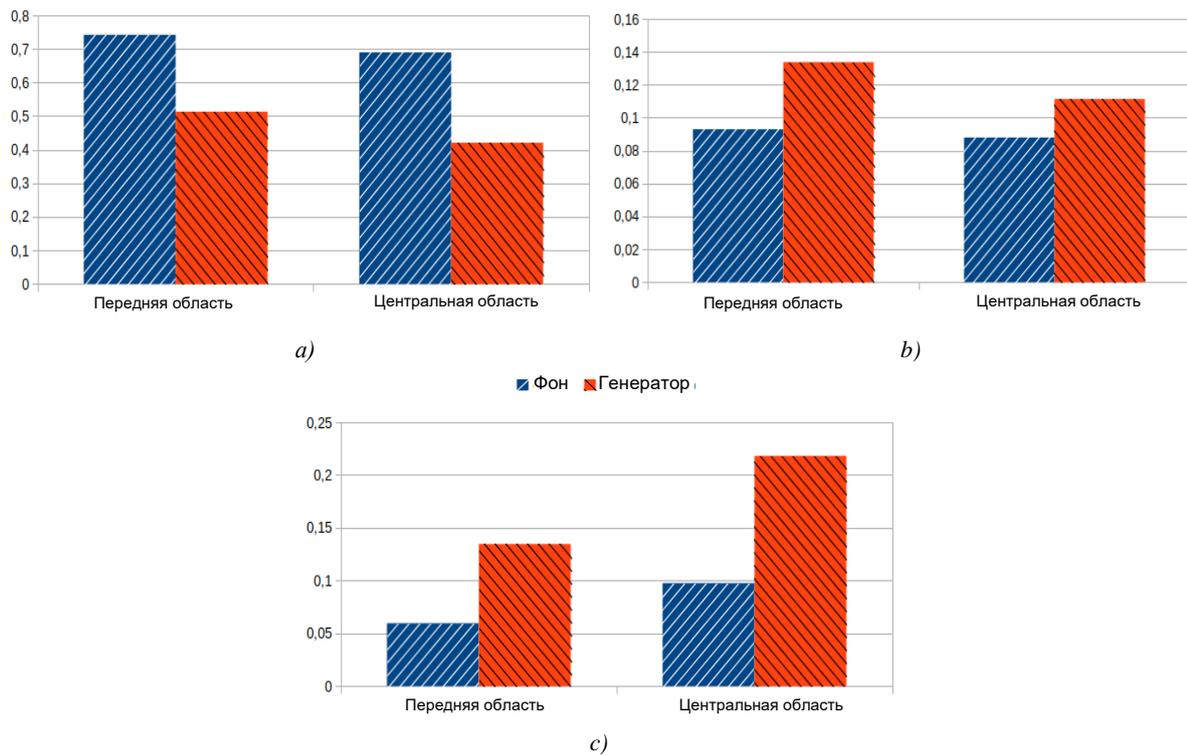


Рис. 12. Изменение спектральной плотности мощности дельта-ритма (а), тета-ритма (b), бета-ритма (с) при наличии излучения генератора электромагнитного шума

Fig. 12. Power spectral density change of delta-rhythm (a), theta-rhythm (b), beta-rhythm (c) in presence of radiation of electromagnetic noise

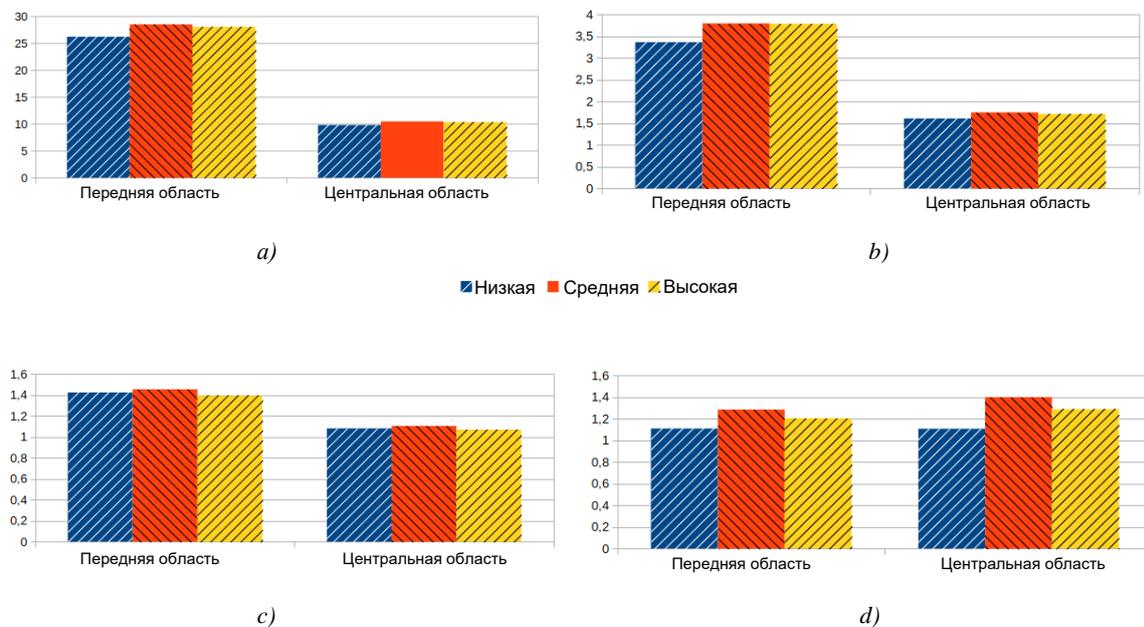


Рис. 13. Спектральная мощность дельта-ритма (а), тета-ритма (b), альфа-ритма (с), бета-ритма (d) в передней и центральной областях головы у пилотов вертолетов в симуляционных миссиях разной сложности [9]

Fig. 13. Spectral power of delta-rhythm (a), theta-rhythm (b), alpha-rhythm (c), beta-rhythm (d) in frontal and central head areas of helicopter pilots in simulation missions with various difficulties [9]

В работе [9] измерялось изменение мощности дельта-, тета-, альфа- и бета-ритмов в передней (отведения F3 и F4) и центральной (отведения C3 и C4) областях головы у пилотов боевых вертолетов «Тигр» в симуляционных миссиях легкой, средней и большой сложности. Сложность задания определялась трудностью маневров при полете, а также наличием чрезвычайных ситуаций. Полеты низкой сложности не включали чрезвычайных ситуаций. Таким образом, можно отследить степень умственной усталости человека: в полетах низкой сложности она минимальна, а в полетах высокой сложности – максимальна (рис. 13).

При умственной усталости, обусловленной эмуляционными миссиями пилотов боевых вертолетов «Тигр», спектральная мощность дельта-, тета- и бета-ритмов в передней и центральной областях головы выросла [9]. Изменения спектральной плотности мощности дельта-ритма (см. рис. 12, *a* и 13, *a*) опровергают умственную усталость оператора. Изменения спектральной плотности мощности тета-ритма (см. рис. 12, *b* и 13, *b*) и бета-ритма (см. рис. 12, *c* и 13, *d*) подтверждают умственную усталость оператора при наличии генератора электромагнитного шума. Анализируя рис. 12 и 13, можно сделать вывод, что оператор в условиях электромагнитного шумового излучения испытывает умственную усталость.

Закключение. Для определения наличия или отсутствия умственной усталости у оператора мобильной системы при действии электромагнитного шума проведен комплекс экспериментальных исследований электроэнцефалограмм отведений Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6. Количественными параметрами, используемыми для оценки умственной усталости оператора, являлись спектральные плотности мощности тета-, дельта-, альфа-, бета- и гамма-ритмов. Параметры изменения спектральной плотности мощности альфа-, бета-, тета-, гамма-ритмов в отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T5, T6 совпадают с параметрами, вызываемыми хронической усталостью [10], а параметры изменения спектральной плотности мощности дельта-ритма не совпадают (см. рис. 1–5). Сравнивая параметры изменения спектральной плотности мощности тета-ритма в отведениях F3, F4, T3, T4, O1, O2 при наличии генератора электромагнитного шума и при умственной усталости, вызываемой выполнением симуляционного военного задания [12], авторы пришли к выводу, что эти параметры совпадают для пяти отведений и не совпадают для одного (см. рис. 3 и 7). Спектральная плотность мощности тета-ритма, усредненная по всей поверхности головы, возросла при наличии излучения генератора шума, что совпадает с динамикой изменений при умственной усталости, определяемой методами многофакторного анализа и линейной алгебры (см. рис. 6, *a* и *b*). Спектральная плотность тета-ритма в отведении Fp1 увеличилась, что также говорит об умственной усталости (см. рис. 3 и 8). При исследовании изменений спектральной плотности мощности в разных областях головы (по всей поверхности, в передней области, центральной теменной области, височной и затылочной) оказалось, что изменения тета- и бета-ритмов подтверждают наличие умственной усталости, а изменение альфа-ритма – опровергает (см. рис. 9–11). При анализе изменений спектральной плотности мощности в передней и центральной областях головы отмечается, что вариации тета- и бета-ритмов подтверждают наличие умственной усталости, а вариации дельта-ритма – опровергают (см. рис. 12 и 13). Таким образом, предварительные экспериментальные исследования показывают, что при действии электромагнитного шумового излучения оператор мобильной системы находится в состоянии умственной усталости. В дальнейшем авторы предполагают продолжить исследование с использованием выборки в десять и более испытуемых.

Вклад авторов. А. В. Сидоренко обозначила задачи, которые необходимо было решить в ходе исследований; предложила методику проведения эксперимента для нахождения параметров электроэнцефалограмм; приняла участие в интерпретации результатов исследований, связанных с определением состояния оператора. Н. А. Солодухо предложил методы для анализа электроэнцефалограмм, полученных в процессе эксперимента при воздействии электромагнитных шумовых излучений; разработал программное обеспечение для эксперимента на языке Java; принял участие в интерпретации результатов исследования.

Список использованных источников

1. Sage, C. Electromagnetic fields, pulsed radiofrequency radiation, and epigenetics: How wireless technologies may affect childhood development / C. Sage, E. Burgio // *Child Development*. – 2018. – Vol. 89, iss. 1. – P. 129–136. <https://doi.org/10.1111/cdev.12824>
2. Yael, S. Electromagnetic radiation and health: human indicators / S. Yael // *Environmental Indicators*. – Springer, 2014. – P. 1025–1046. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9499-2>
3. Sidorenko, A. V. Assessing the effect of electromagnetic noise radiation on the central nervous system using non-linear parameters of the electroencephalogram / A. V. Sidorenko, M. A. Saladukha // *Nonlinear Dynamics and Applications: Proc. of Twenty-six Anniversary Seminar NPCS'2019, Minsk, 21–24 May 2019*. – Minsk, 2019. – Vol. 25. – P. 231–240.
4. Сидоренко, А. В. Оценка стрессового состояния оператора при воздействии электромагнитного шумового излучения / А. В. Сидоренко, Н. А. Солодухо // *Нейронаука для медицины и психологии : тез. докл. 16 Междунар. междисциплинар. конгр., Судак, 6–16 окт. 2020*. – Судак, 2020. – С. 418–419.
5. Сидоренко, А. В. Нелинейный анализ электроэнцефалограмм оператора при действии электромагнитного шумового излучения / А. В. Сидоренко, Н. А. Солодухо // *Доклады БГУИР*. – 2017. – № 6. – С. 69–75.
6. Сидоренко, А. В. Методы информационного анализа биоэлектрических сигналов / А. В. Сидоренко. – Минск : БГУ, 2003. – 187 с.
7. Xavier, G. Exploratory study of brain waves and corresponding brain regions of fatigue on-call doctors using quantitative electroencephalogram / G. Xavier, A. Su Ting, N. Fauzan // *J. of Occupational Health*. – 2020. – Vol. 62, iss. 1. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12121>
8. The effects of flight complexity on gaze entropy: An experimental study with fighter pilots / C. Diaz-Piedra [et al.] // *Applied Ergonomics*. – 2019. – Vol. 77. – P. 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.01.012>
9. Electroencephalogram characteristics in patients with chronic fatigue syndrome / T. Wu [et al.] // *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. – 2016. – Vol. 12. – P. 241–249. <https://doi.org/10.2147/NDT.S92911>
10. EEG-based mental fatigue detection by spectral non-negative matrix factorization / L. Li [et al.] // *Materials of 38th Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Orlando, 16–20 Aug. 2016*. – Orlando, 2016. – P. 3716–3719. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591535>
11. Diaz-Piedra, C. EEG theta power activity reflects workload among army combat drivers: An experimental study / C. Diaz-Piedra, M. V. Sebastián, L. L. Di Stasi // *Brain Sciences*. – 2020. – Vol. 10, iss. 4. – P. 199–212. <https://doi.org/10.3390/brainsci10040199>
12. Mental fatigue alters cortical activation and psychological responses, impairing performance in a distance-based cycling trial / F. O. Pires [et al.] // *Frontiers in Physiology*. – 2018. – Vol. 9. – P. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00227>

References

1. Sage C., Burgio E. Electromagnetic fields, pulsed radiofrequency radiation, and epigenetics: How wireless technologies may affect childhood development. *Child Development*, 2018, vol. 89, iss. 1, pp. 129–136. <https://doi.org/10.1111/cdev.12824>
2. Yael S. Electromagnetic radiation and health: human indicators. *Environmental Indicators*, Springer, 2014, pp. 1025–1046. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9499-2>
3. Sidorenko A. V., Saladukha M. A. Assessing the effect of electromagnetic noise radiation on the central nervous system using non-linear parameters of the electroencephalogram. *Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of Twenty-six Anniversary Seminar NPCS'2019, Minsk, 21–24 May 2019*. Minsk, 2019, vol. 25, pp. 231–240.
4. Sidorenko A. V., Saladukha M. A. *Evaluation of the stress condition of the operator influenced by electromagnetic noise radiation*. *Nejronauka dlya mediciny i psihologii : tezisy dokladov 16 Mezhdunarodnogo mezhdisciplinarnogo kongressa, Sudak, 6–16 oktyabrya 2020 [Neuroscience for Medicine and Psychology : Abstracts of 16th International Interdisciplinary Congress, Sudak, 6–16 October 2020]*. Sudak, 2020, pp. 418–419 (In Russ.).
5. Sidorenko A. V., Saladukha M. A. *Nonlinear analysis of operator electroencephalograms subjected by electromagnetic noise radiation*. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics]*, 2017, no. 6, pp. 69–75 (In Russ.).

6. Sidorenko A. V. Metody informacionnogo analiza bioelektricheskikh signalov. *Bioelectric Signal Information Analysis Methods*. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet, 2003, 187 p. (In Russ.).
7. Xavier G., Ting A. Su, Fauzan N. Exploratory study of brain waves and corresponding brain regions of fatigue on-call doctors using quantitative electroencephalogram. *Journal of Occupational Health*, 2020, vol. 62, iss. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12121>
8. Diaz-Piedra C., Rieiro H., Cherino A., Fuentes L. J., ..., Di Stasi L. L. The effects of flight complexity on gaze entropy: An experimental study with fighter pilots. *Applied Ergonomics*, 2019, vol. 77, pp. 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.01.012>
9. Wu T., Qi X., Su Y., Teng J., Xu X. Electroencephalogram characteristics in patients with chronic fatigue syndrome. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 2016, vol. 12, pp. 241–249. <https://doi.org/10.2147/NDT.S92911>
10. Li L., Xu G., Xie J., Li M., ..., Luo A. EEG-based mental fatigue detection by spectral non-negative matrix factorization. *Materials of 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Orlando, 16–20 August 2016*. Orlando, 2016, pp. 3716–3719. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591535>
11. Diaz-Piedra C., Sebastián M. V., Di Stasi L. L. EEG theta power activity reflects workload among army combat drivers: An experimental study. *Brain Sciences*, 2020, vol. 10, iss. 4, pp. 199–212. <https://doi.org/10.3390/brainsci10040199>
12. Pires F. O., Silva-Júnior F. L., Brietzke C., Franco-Alvarenga P. E., ..., Santos T. M. Mental fatigue alters cortical activation and psychological responses, impairing performance in a distance-based cycling trial. *Frontiers in Physiology*, 2018, vol. 9, pp. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00227>

Информация об авторах

Сидоренко Алевтина Васильевна, доктор технических наук, профессор кафедры физики и аэрокосмических технологий, факультет радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет.
E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Солодухо Никита Александрович, старший преподаватель факультета радиофизики и компьютерных технологий, магистр физико-математических наук, Белорусский государственный университет.
E-mail: malcomus@gmail.com

Information about the authors

Alevtina V. Sidorenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Physics and Aerospace Technology, Faculty of Radiophysics and Computer Technology, Belarusian State University.
E-mail: sidorenkoa@yandex.by

Mikita A. Saladukha, Senior Lecturer at the Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, M. Sci. (Phys.-Math.), Belarusian State University.
E-mail: malcomus@gmail.com



УДК 004.822: 514
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-40-52>

Арыгінальны артыкул
Original Paper

Праектаванне беларуска- і рускамоўных натуральна-маўленчых інтэрфейсаў для даведкавых сістэм

Ю. С. Гецэвіч, Д. А. Дзенісюк, С. А. Гецэвіч, Л. І. Кайгародава[✉], К. А. Нікалаенка

*Аб'яднаны інстытут праблем інфарматыкі
Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі,
вул. Сурганова, 6, Мінск, 220012, Беларусь
✉E-mail: lesia.piatrouskaya@gmail.com*

Анотацыя

Мэты. Галоўнай мэтай працы з'яўляецца даследаванне натуральна-маўленчых карыстальніцкіх інтэрфейсаў, а таксама стварэнне прататыпу такога інтэрфейсу на прыкладзе двухмоўнай пытална-адказнай дыялогавай сістэмы з выкарыстаннем рускай і беларускай моў. Натуральна-маўленчыя інтэрфейсы даследуюцца з пункту гледжання выкарыстання натуральнай мовы для арганізацыі дыялогу карыстальніка з камп'ютарнай сістэмай. Пры гэтым абмяркоўваюцца асноўныя складанасці, звязаныя з неадначаснацю натуральнай мовы і неадпаведнасцю магчымасцей рэалізацыі натуральна-маўленчага інтэрфейсу спадзяваннем карыстальніка.

Метады. Прыводзяцца асноўныя прынцыпы мадэлявання натуральна-маўленчага карыстальніцкага інтэрфейсу. Будучы інтэлектуальнай сістэмай, у якасці асноўных сваіх кампанентаў ён мае базу ведаў, машыну апрацоўкі ведаў і карыстальніцкі інтэрфейс. Кампаненты сістэмы распазнавання і сінтэзу маўлення па тэксце робяць натуральна-маўленчы інтэрфейс яшчэ больш зручным для карыстальніка.

Вынікі. Прадстаўлена апісанне прататыпа інтэрфейсу натуральнай мовы для інтэлектуальнай пытална-адказнай сістэмы. Мадэль прататыпа ўключае ў сябе беларускую і рускую версіі падсістэмы («маўленне ў тэкст» і «тэкст у маўленне»), генерацыю адказаў у выглядзе натуральнай мовы і фармальнага тэксту.

Дадатковы кампанент – падача на ўваход сістэмы чалавечага маўлення. Некаторыя дадзеныя, неабходныя для распазнавання натуральнага маўлення, захоўваюцца ў базе ведаў альбо ствараюцца на аснове існуючых ведаў. Сінтэз беларускага і рускага маўлення з'яўляецца неабходным для таго, каб зрабіць інтэрфейс на натуральнай мове больш зручным для карыстальнікаў.

Заклучэнне. Прадстаўлена паслядоўнасць даследавання і праектавання натуральна-маўленчых карыстальніцкіх інтэрфейсаў. Прыводзіцца апісанне прататыпа інтэрфейсу натуральнай мовы для інтэлектуальнай пытална-адказнай сістэмы.

Ключавыя словы: натуральна-маўленчы інтэрфейс, галасавы сэрвіс, распазнаванне маўлення, сінтэз маўлення, пытална-адказныя сістэмы

Для цытавання. Праектаванне беларуска- і рускамоўных натуральна-маўленчых інтэрфейсаў для даведкавых сістэм / Ю. С. Гецэвіч [і інш.] // Інфарматыка. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 40–52.
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-40-52>

Канфлікт інтарэсаў. Аўтары заяўляюць аб адсутнасці канфлікту інтарэсаў.

Design of Belarusian and Russian natural language interfaces for online help systems

Yuras S. Hetsevich, Dzmitry A. Dzenisyk, Sviatlana A. Hetsevich, Lesia I. Kaigorodova[✉], Kiryl A. Nikalaenka

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Sarganova, 6, Minsk, 220012, Belarus
✉E-mail: lesia.piatrouskaya@gmail.com*

Abstract

Objectives. The main goal of the work is a research of the natural language user interfaces and the development of a prototype of such an interface. The prototype is a bilingual Russian and Belarusian question-and-answer dialogue system. The research of the natural language interfaces was conducted in terms of the use of natural language for interaction between a user and a computer system. The main problems here are the ambiguity of natural language and the difficulties in the design of natural language interfaces that meet user expectations.

Methods. The main principles of modelling the natural language user interfaces are considered. As an intelligent system, it consists of a database, knowledge machine and a user interface. Speech recognition and speech synthesis components make natural language interfaces more convenient from the point of view of usability.

Results. The description of the prototype of a natural language interface for a question-and-answer intelligent system is presented. The model of the prototype includes speech-to-text and text-to-speech Belarusian and Russian subsystems, generation of responses in the form of the natural language and formal text.

An additional component is natural Belarusian and Russian voice input. Some of the data, required for human voice recognition, are stored as knowledge in the knowledge base or created on the basis of existing knowledge. Another important component is Belarusian and Russian voice output. This component is the top required for making the natural language interface more user-friendly.

Conclusion. The article presents the research of natural language user interfaces, the result of which provides the development and description of the prototype of the natural language interface for the intelligent question-and-answer system.

Keywords: natural language interface, voice services, speech recognition, speech synthesis, question-and-answer systems

For citation. Hetsevich Y. S., Dzenisyk D. A., Hetsevich S. A., Kaigorodova L. I., Nikalaenka K. A. *Design of Belarusian and Russian natural language interfaces for online help systems*. *Informatika [Informatics]*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 40–52 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-40-52>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Уводзіны. У сувязі з дынамічным развіццём і распаўсюджваннем камп'ютарных сістэм у розных сферах дзейнасці чалавека актуальным з'яўляецца зніжэнне выдаткаў на падрыхтоўку новых карыстальнікаў, а таксама магчымасць вядзення зручных чалавечымі дыялогаў. Перспектыўным у гэтым выпадку ўяўляецца выкарыстанне звыклай для карыстальніка натуральнай мовы арганізацыі дыялогу з камп'ютарнай сістэмай. Такая магчымасць рэалізуецца сродкамі натуральна-маўленчага карыстальніцкага інтэрфейсу, які валодае шэрагам пераваг: мінімальнай падрыхтоўкай карыстальніка для працы з сістэмай, прастатой і высокай хуткасцю задання адвольных запытаў да карыстальніцкага інтэрфейсу і высокім узроўнем мадэлі прадметнай вобласці. Выкарыстанне маўленчага сінтэзу пры гэтым дазваляе зменшыць нагрузку на карыстальніка па ўспрыманні вынікаў апрацоўкі не праз графічны інтэрфейс (зрокавую сістэму), а пасродкам маўлення. Акрамя таго, моўны ўвод каманд і пытанняў дазваляе карыстальніку ўжываць гэту ж сістэму ў якасці даведкавай і атрымліваць ад яе дапамогу ў выкананні рознай дзейнасці.

Варта адзначыць, што для натуральна-маўленчага карыстальніцкага інтэрфейсу пытальна-адказных сістэм магчыма выкарыстанне абмежаванага набору лексікі і граматыкі мовы без значнай шкоды функцыянальнасці для пытальна-адказнай сістэмы. Абмежаваная натуральная мова (як падмноства натуральнай мовы, пасродкам якога без якіх-небудзь намаганняў успры-

маецца носьбітам зыходная натуральная мова) не патрабуе працяглага вывучэння для набыцця навыкаў складання тэкстаў, бо мае скарочаны набор лексікі і граматыкі. Гэта дазваляе зменшыць час апрацоўкі натуральна-маўленчых канструкцый у пытална-адказнай сістэме, а таксама часткова пазбегнуць лінгвістычных неадназначнасцяў.

Прапанаваная мадэль карыстальніцкага натуральна-маўленчага інтэрфейсу для беларускай і рускай мовы складаецца з асобных кампанентаў, якія ўзаемадзейнічаюць паміж сабой: сістэмы распазнавання і сінтэзу маўлення, сістэмы аналізу і генерацыі тэксту. У дадзеным артыкуле разглядаецца распрацоўка ўніверсальных і спецыялізаваных моў зносін для ўсіх кампанентаў, прычым адным з такіх базавых моў з'яўляецца семантычная мова пытанняў.

Мадэляванне натуральна-маўленчага карыстальніцкага інтэрфейсу. Натуральна-маўленчы карыстальніцкі інтэрфейс зручна разглядаць як спецыялізаваную інтэлектуальную сістэму, якая забяспечвае дыялог паміж прыкладной сістэмай і карыстальнікам. Такі інтэрфейс, як і любая іншая падобная сістэма, у якасці асноўных сваіх кампанентаў валодае базай ведаў, машынай апрацоўкі ведаў і карыстальніцкім інтэрфейсам.

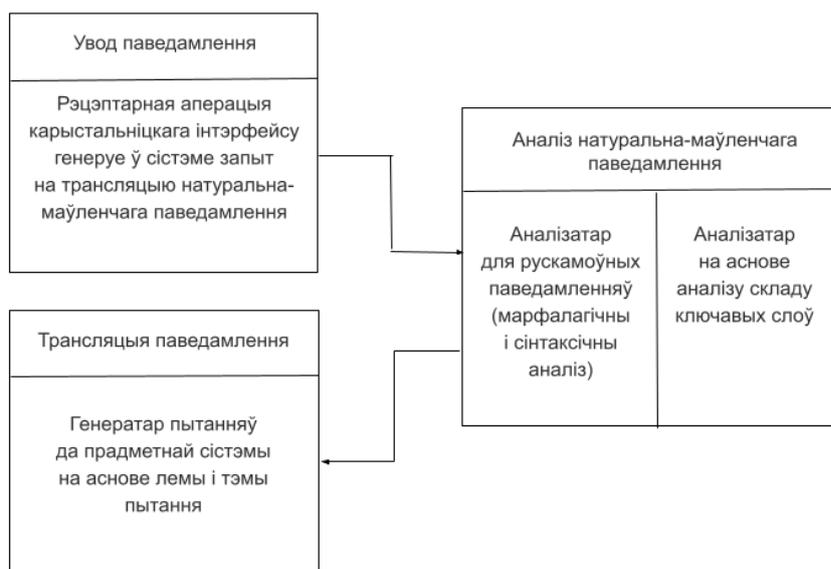
Вызначым асноўныя функцыянальныя магчымасці натуральна-маўленчага карыстальніцкага інтэрфейсу:

- увод паведамлення ў натуральна-маўленчай форме пасродкам тэксту ці маўлення;
- трансляцыя паведамлення карыстальніка на ўнутраную мову інтэлектуальнай сістэмы;
- трансляцыя адказу сістэмы ў тэксты натуральнай мовы ў форме тэксту ці маўлення.

Структура інтэлектуальнай сістэмы натуральна-маўленчага інтэрфейсу адпаведна вызначанаму функцыяналу ўключае:

- карыстальніцкі інтэрфейс, пасродкам якога адбываецца ўвод паведамленняў карыстальніка і вывад адказу сістэмы карыстальніку;
- транслятары натуральна-маўленчых запытаў на ўнутраную мову пытанняў;
- транслятары ўнутранага выяўлення ведаў на натуральную мову.

Калі ў сістэме выкарыстоўваецца толькі адна натуральная мова, то дзейнасць складальнікаў сістэмы ўяўляе сабой паслядоўную апрацоўку ўваходнага паведамлення. Калі ж у сістэме выкарыстоўваюцца некалькі моў ці некалькі кампанентаў, якія выконваюць адны і тыя ж функцыі, працэс працы натуральна-маўленчага інтэрфейсу пачынае разгаліноўвацца (мал. 1).



Мал. 1. Паслядоўнасць дзейнасці кампанентаў натуральна-маўленчага інтэрфейсу з некалькімі транслятарамі

Fig. 1. Sequence of activities of components of natural language interface with several translators

Пакуль адзін з транслятараў не створыць у сістэме рэму і тэму зададзенага карыстальнікам пытання, трансляцыя самага пытання не адбудзецца. Такім чынам, карыстальнік убачыць адказ на сваё пытанне толькі тады, калі прадметная інтэлектуальная пытална-адказная сістэма апрацуе ўваходны запыт, што адбудзецца толькі пасля таго, як аналізатар ці транслятар яго згенеруе. Можна сказаць, што ў сістэме адбываецца вольная канкурэнцыя функцыянальна падобных кампанентаў. Тыя кампаненты, якія «не паспелі» згенераваць запыт, пры яго з'яўленні ў памяці сістэмы завяршаюць сваю бягучую задачу.

Для аналізу натуральна-маўленчага запыту на беларускай мове былі распрацаваны адпаведныя лінгвістычныя рэсурсы. А менавіта для атрымання лем з пытання карыстальніка былі падрыхтаваны спісы патэнцыйных словаформаў, якія могуць быць у пытаннях карыстальніка, для кожнай лемы (табл. 1).

Табліца 1. Фрагмент лінгвістычных рэсурсаў (усяго 3061 запіс) для вызначэння лемы словаформы на беларускай мове
Table 1. Fragment of linguistic resources (3061 records in total) for determining lemma of a word form in Belarusian language

Словаформа <i>Wordform</i>	Лема <i>Lemma</i>	Граматычны шаблон <i>Grammar template</i>
азначэнні	азначэнне	NOUN+FLX=АБАБІВАННЕ+Accusative+Common+Inanimate+ +Neuter+Plural
азначэнні	азначэнне	NOUN+FLX=АБАБІВАННЕ+Common+Inanimate+Neuter+ +Nominative+Plural
азначэнні	азначэнне	NOUN+FLX=АБАБІВАННЕ+Common+Inanimate+Neuter+ +Prepositional
...		
азначэнне	азначэнне	NOUN+FLX=АБАБІВАННЕ+Accusative+Common+Inanimate+ +Neuter
азначэнняў	азначэнне	NOUN+FLX=АБАБІВАННЕ+Common+Genitive+Inanimate+ +Neuter+Plural
азначэнням	азначэнне	NOUN+FLX=АБАБІВАННЕ+Common+Dative+Inanimate+ +Neuter+Plural
азначэннямі	азначэнне	NOUN+FLX=АБАБІВАННЕ+Common+Inanimate+Instrumental+ +Neuter+Plural
...

Да ўніверсальнага аналізатара паведамленняў былі дададзены ўсе тэрміны базы ведаў па геаметрыі, а таксама абазначаны адпаведныя сувязі між лемамі семантычна аднолькавых слоў на розных мовах. Ніжэй прыведзены фрагменты дадзенай базы ведаў.

Ключавыя вузлы базы ведаў:

...
разбіццё
сцвярджэнне вызначальнага тыпу
дамен
надмноства
вобласць азначэння
азначэнне
асноўны
бісектрыса
...

Спісы адпаведных слоў:

...
\$syn3652={};
\$syn3652=c="/цэнтр*";
##"LANG","STRING", "con(цэнтр*)"->\$syn3652;
...
\$syn3667={};
\$syn3667=c="/цэнтральны вугал*";
"LANG" ,"STRING", "con(цэнтральны вугал*)"-
>\$syn3667;
...

Падчас распрацоўкі кампанента маўленчага ўводу інфармацыі на аснове пакета НТК (The Hidden Markov Model Toolkit; URL: <http://htk.eng.cam.ac.uk>) адной з найбольш значных задач з'яўляўся выбар прыдатнай тэхналогіі і методыкі для стварэння модуля распазнавання

звязанага рускага і беларускага маўлення ў мэтах забеспячэння выкарыстання галасавога ўводу для рэалізацыі запытаў да баз ведаў. Пры гэтым акцэнт ставіўся на распрацоўку адносна менавіта аўтаномнага кампанента, які мог бы быць скарыстаны распрацоўшчыкам без высокай кваліфікацыі ў сферы апрацоўкі сігналаў ці распазнавання маўлення. Такая падсістэма павінна стаць часткай праекту OSTIS (Open Semantic Technologies for Intelligent Systems; URL: <http://proc.ostis.net/by/main.html>).

Магчымасць распазнавання беларускага маўлення з'яўляецца вельмі актуальнай праблемай з-за малой колькасці аналагаў. Па розным прычынам мала ўвагі надаецца ўключэнню беларускай мовы ў інтэрфейсы мноства лічбавых прылад. Аднак аўтары не сумняваюцца ў неабходнасці развіцця беларускамоўных спосабаў узаемадзеяння і ажыццяўляюць пэўныя крокі ў гэтым накірунку.

Самым трывіяльным падыходам да пабудовы мультылінгвістычных сістэм з'яўляецца стварэнне асобных набораў акустычных і моўных мадэляў для кожнай мовы. Пры распазнаванні запускаюцца некалькі моўных дэкодераў адначасова. Фраза з найбольшай верагоднасцю выдаецца як вынік працы распазнавальніка. Такі падыход просты ў рэалізацыі. Аднак праблемы ўзнікаюць, калі ў сістэму неабходна ўключыць новую мову, для якой няма дастатковай колькасці навучальных дадзеных.

Паводле альтэрнатыўнай тэхнікі можна вылучыць шэраг фанем ці іншых моўных элементаў у якасці агульных для некалькіх моў. Такі падыход дазваляе больш рацыянальна выкарыстоўваць навучальны корпус, аднак у той жа час ён звязаны з цяжкасцямі ў аналізе падабенстваў паміж некалькімі мовамі [1].

Праблема пашырэння дадзенай сістэмы беларускай мовай вырашаецца праз выкарыстанне першага апісанага падыходу ў якасці пачатковага набліжэння для далейшага памяншэння лішкавасці.

Тэорыя схаваных маркаўскіх мадэляў (СММ) была абрана ў якасці метадалагічнай асновы для стварэння модуля распазнавання маўленчых запытаў. У якасці набору прылад, які рэалізуе ўсе асноўныя функцыі і алгарытмы СММ, быў скарыстаны пакет НТК.

Тэставыя дыялогі для інтэрфейсу семантычных баз ведаў. Пры стварэнні прататыпа маўленчага інтэрфейсу для ажыццяўлення рознага роду запытаў да семантычных баз ведаў былі абраны наборы тэставых фраз карыстальніка да сістэмы з мэтай выбару неабходных у зносінах слоў і фраз для наступнага стварэння СММ з адпаведнымі параметрамі. У якасці прыкладу прывядзем наступныя дыялогі.

На беларускай мове

Пытанне: Якія сінонімы існуюць у паняцця квадрат?

Адказ: Сінонімы паняцця квадрат: роўнабаковы прамавугольнік, прамавугольны ромб.

На рускай мове

Пытанне: Какие синонимы существуют у понятия квадрат?

Адказ: Синонимы понятия квадрат: равносторонний прямоугольник, прямоугольный ромб.

Варта адзначыць, што фразы выбіраліся па наступнаму крытэрыю: словы, якія ўваходзяць у запыты, павінны складацца па магчымасці з найбольшай колькасці гукаў, каб павялічыць якасць распазнавання.

Выбар спосабу надрыхтоўкі дадзеных для стварэння мадэляў. У якасці варыянтаў як для рускамоўнага, так і для беларускамоўнага распазнавальнікаў разглядаліся: манафонныя сістэмы без разметкі навучальных дадзеных і з разметкай навучальных дадзеных; сістэмы на аснове звязаных трыфонаў, дзе навучанне праводзілася без разметкі навучальных дадзеных. Крытэрыем для параўнання выступалі сярэдні час распазнавання на адзін фрэйм, дакладнасць распазнавання па фразях, а таксама дакладнасць распазнавання па асобных словах. Навучанне ажыццяўлялася на аднолькавым абмежаваным наборы з 71 фразы на рускай мове (на працягу 485,7 с гучання) і 71 фразы (406,4 с гучання) для беларускай мовы, якія змяшчаюць у дадатку 291 і 302 словы адпаведна. Вынікі прадстаўлены ў зборнай табл. 2 для абедзвюх моў.

На аснове вышэй прыведзенай інфармацыі выбар быў зроблены на карысць сістэмы на аснове манафонаў, для стварэння якой выкарыстоўваліся дадзеныя, размечаныя ўручную. Вырашальным фактарам стаў высокі ўзровень (свыш 90 %) і прымальны час распазнавання па фразам (табл. 2). Такія вынікі можна растлумачыць наступным чынам: зыходзячы з умовы абмежаванасці слоўніка і магчымых паслядоўнасцяў слоў, мэтазгоднай выглядае разметка абмежаванай колькасці навучальных файлаў уручную. Між тым пры наяўнасці вялікай колькасці навучальных дадзеных цалкам дапушчальным выглядае будучы пераход на аўтаматычную разметку з выкарыстаннем звязаных трыфонаў.

Табліца 2. Ацэнка характарыстык сістэм распазнавання

Table 2. Evaluation of the characteristics of recognition systems

Сістэма распазнавання	Сярэдні час распазнавання на адзін фрэйм, с/фрэйм <i>Average recognition time per frame, s/frame</i>	Дакладнасць распазнавання фраз, % <i>Phrase recognition accuracy, %</i>	Дакладнасць распазнавання слоў, % <i>Accuracy of word recognition, %</i>
<i>Беларуская мова</i>			
На аснове манафонаў (навучанне без разметкі дадзеных)	0,000 389 378 380	93,00	96,80
На аснове звязаных трыфонаў (навучанне без разметкі дадзеных)	0,000 459 622 045	96,00	98,58
На аснове манафонаў (навучанне з разметкай дадзеных)	0,000 370 541 410	97,50	98,82
<i>Руская мова</i>			
На аснове манафонаў (навучанне без разметкі дадзеных)	0,000 423 419 651	82,00	91,49
На аснове звязаных трыфонаў (навучанне без разметкі дадзеных)	0,000 496 022 965	79,50	90,04
На аснове манафонаў (навучанне з разметкай дадзеных)	0,000 396 626 995	99,00	99,51

Алгарытм стварэння сістэмы СММ для распазнавання маўлення. Поўны цыкл стварэння добра навучаных СММ уключае два асноўныя этапы: падрыхтоўку дадзеных для навучання і непасрэдна саманавучанне (мал. 2).

Падрыхтоўка дадзеных:

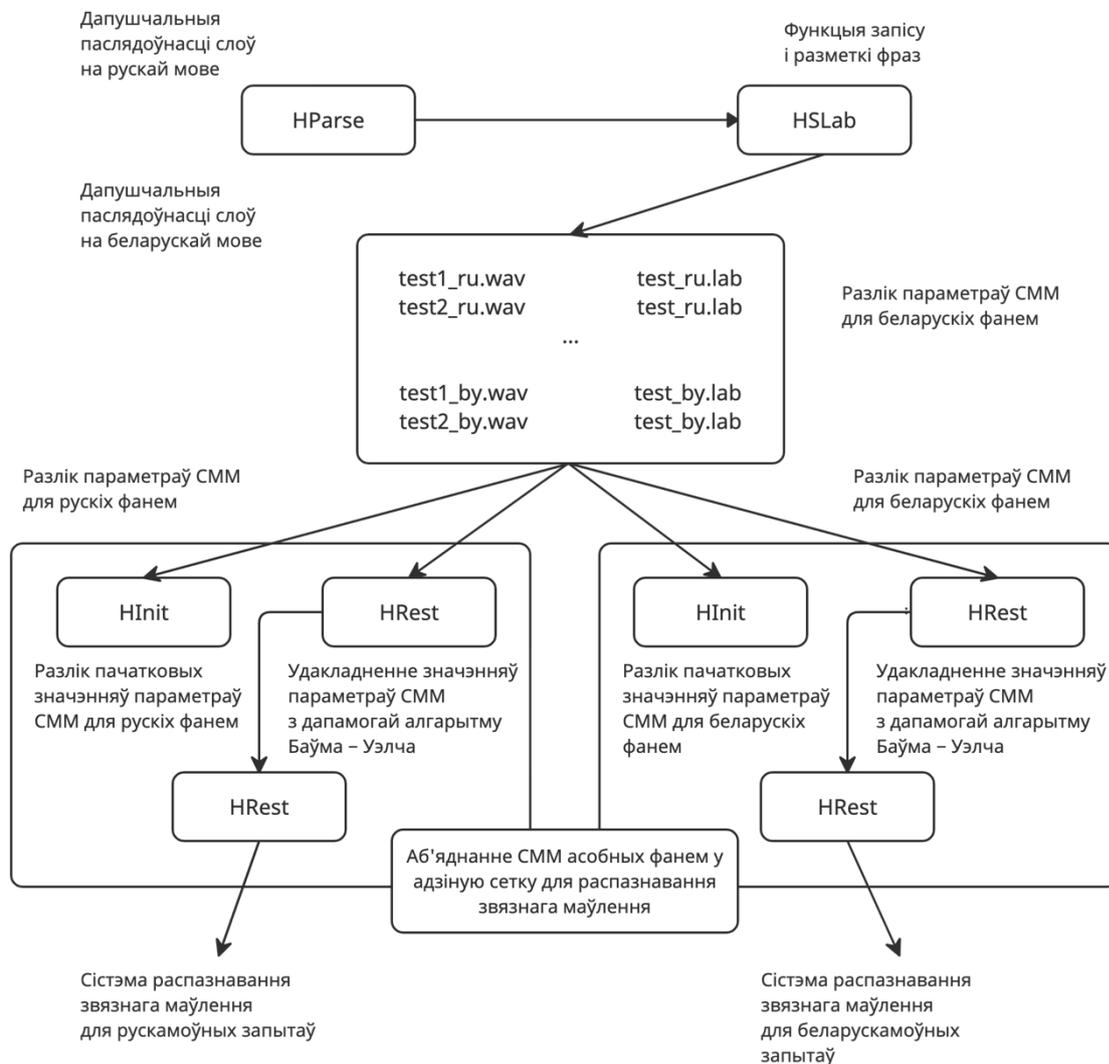
Крок 1. Стварэнне граматыкі кожнага тыпу. Граматыка ў дадзеным выпадку ўяўляе сабою сетку, якая ўключае строга паслядоўнасці слоў, дапушчальных для распазнавання.

Крок 2. Спускаючыся ніжэй па іерархіі ад фраз да асобных слоў, быў створаны ўпарадкаваны слоўнік, у які ўваходзяць словы з запытаў. Закрыты слоўнік дае магчымасць стварэння ўнікальнай фанетычнай транскрыпцыі, якая адаптавана для пэўнага дыктара і ўлічвае рэгіянальныя асаблівасці вымаўлення некаторых слоў рускай і беларускай моў. Асабліва гэта датычыцца спецыфічных гукаў, характэрных выключна для беларускай мовы: *дз, дж, ць* і г. д.

Крок 3. Запіс дадзеных. Ажыццяўляецца стварэнне набору файлаў фармату wav, якія ўтрымліваюць некалькі варыянтаў (не менш за трох) запісаў базавых слоў, вымаўленых дыктарам. У якасці прыстасавання выкарыстана функцыя HSLab з пакета НТК, якая дазваляе не толькі запісваць дадзеныя, але і пазначаць у іх фанемы, якія змяшчаюцца. Усяго для навучання выкарыстоўвалася 113 фраз, якія складаюцца ў суме з 613 слоў.

Крок 4. Кадаванне дадзеных. Фінальным крокам у падрыхтоўцы дадзеных з'яўляецца апрацоўка маўленчых сігналаў і пераўтварэнне іх у паслядоўнасці вектараў прыкмет. У дадзенай працы ў якасці такіх вектараў былі выкарыстаны мел-частотныя кепстральныя каэфіцыенты [3, 10].

Крок 5. Стварэнне пачатковых манафонаў. З гэтага моманту пачынаецца стварэнне набору навучаных СММ, эмісійныя верагоднасці ў якіх апісваюцца сумесцю шчыльнасцяў размеркавання гаўсавых выпадковых велічынь [4].



Мал. 2. Алгарытм стварэння набору СММ для распазнавання запытаў на рускай і беларускай мовах

Fig. 2. Algorithm for creating a set of Hidden Markov Models for query recognition in Russian and Belarusian

Першым крокам у стварэнні сістэмы СММ з'яўляецца вызначэнне мадэлі прататыпа. Для сістэмы, заснаванай на фанемах, добрай тапалогіяй з'яўляецца левая-правая схема з трыма станамі [5]. Пачатковыя значэнні для мадэлі кожнай фанемы разлічваліся на падставе навучальных дадзеных з дапамогай алгарытму Вітэрбі [6]. Праграмны сродак тут прадстаўлены функцыяй HInit.

Крок 7. Пералік каэфіцыентаў манафонаў. Параметры мадэлі кожнай фанемы пералічваюцца па метады Баўма – Уэлча (алгарытму прамога зваротнага ходу, ці алгарытму максімізацыі праўдападобнасці) [5]. Пералік вырабляецца з дапамогай функцыі HRest.

Крок 8. Стварэнне сістэмы СММ для распазнавання фраз. Апошнім крокам з'яўляецца карэктыроўка параметраў мадэляў фанем, але ўжо не па асобку, а ў звязку адзін з адным у кантэксце як асобных слоў, так і цэлых сказаў. Такая інтэграваная сістэма ствараецца функцыяй HRest.

Ключавыя асаблівасці кампанента маўленчага ўводу. Вынікам працы стала стварэнне модуля распазнавання маўлення для ажыццяўлення галасавых запытаў да інтэлектуальнай базы ведаў. Гэта было дасягнута праз рашэнне наступных падзадач:

- выбар спосабу рэалізацыі сістэмы з улікам патрабаванняў да дакладнасці і часу распазнавання;

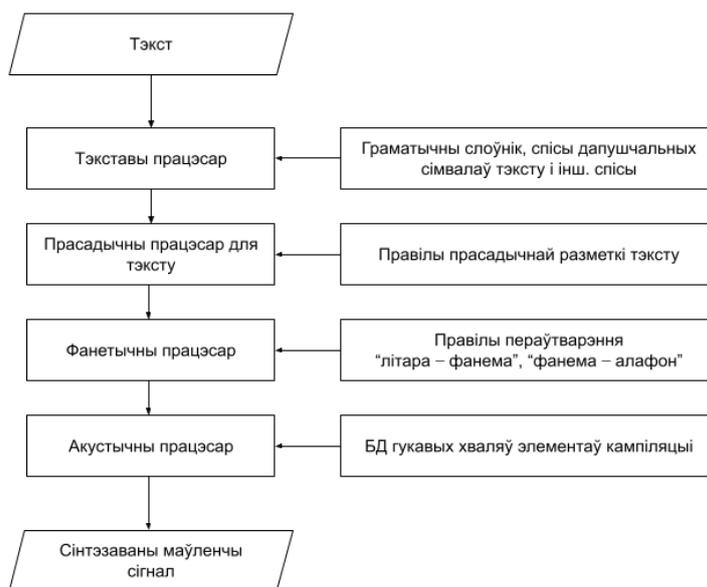
- стварэнне прататыпа модуля, які здольны з высокай дакладнасцю распазнаваць шырокі спектр запытаў да базы ведаў па геаметрыі. Пры гэтым у модулі была рэалізавана двухмоўнасць, якая дазваляе рабіць вусныя запыты на рускай і беларускай мовах;

- выпрацоўку метадыкі стварэння модуля распазнавання як для рускамоўных, так і для беларускамоўных фраз. Метадыка можа быць выкарыстана распрацоўшчыкам, які не з’яўляецца спецыялістам у сферы маўленчых тэхналогій, для стварэння модуля распазнавання запытаў да баз ведаў у любых іншых сферах (апроч геаметрыі).

Акрамя таго, дзякуючы значнай доле (%) працяглых галосных у беларускай мове, патэнцыйна сістэмы распазнавання фраз беларускай мовы валодаюць большай дакладнасцю распазнавання пры іншых роўных умовах.

Распрацоўка кампанента маўленчага вываду інфармацыі на аснове сінтэзатара беларускай і рускай моў. Для пераводу тэкставай інфармацыі ў маўленчую з пытальна-адказнай сістэмы выкарыстоўваюцца два кампаненты, заснаваныя на сінтэзатары маўлення па тэксце на беларускай [8] ці рускай [9] мове. Дадзеныя кампаненты рэалізуюцца ў якасці знешніх падключальных модуляў. У выніку такога падключэння сінтэзатараў маўлення па тэксце да сістэмы карыстальнік атрымлівае агучаны маўленчы адказ. Такім чынам, сістэма натуральна-маўленчага інтэрфейсу становіцца яшчэ больш натуральнай для карыстальніка.

Сінтэз вуснага маўлення па тэксце ажыццяўляецца на аснове лексіка-граматычнага аналізу ўваходнага тэксту шляхам мадэлявання працэсаў моваўтварэння з улікам правіл вымаўлення гукаў і інтанавання для кожнай мовы. Арфаграфічны тэкст паступае на ўваход сінтэзатара і далей падвяргаецца паслядоўнай апрацоўцы спецыялізаванымі працэсарамі-модулямі ў адпаведнасці з агульнай структурай сінтэзатара маўлення па тэксце (мал. 3). Сінтэзатар уключае наступныя модулі: тэкставы працэсар, прасадычны працэсар тэксту і сігналу, фанетычны і акустычны працэсары. Кожны з гэтых модуляў падтрымліваецца спецыяльнымі наборамі адпаведных баз дадзеных і правілаў, распрацаваных для беларускай і рускай моў.



Мал. 3. Агульная мованезалежная структура сістэмы сінтэзу маўлення па тэксце
 Fig.3. General language-independent structure of the system of speech-to-text synthesis

Уваходны арфаграфічны тэкст падвяргаецца шэрагу паслядоўных апрацовак у кожным з працэсараў. Тэкставы працэсар апрацоўвае ўваходны арфаграфічны тэкст у наступнай паслядоўнасці: ачыстка тэксту, пераўтварэнне знакаў (абрэвіятур, скарачэнняў, лікаў і інш.), расстаноўка слоўных націскаў і граматычных прыкмет словаформаў.

Ператвораны тэкст паступае на ўваходы прасадыхнага працэсару тэксту, а затым – фанетычнага працэсару. У выніку працы прасадыхнага працэсара тэкст падзяляецца на сінтагмы, акцэнтныя адзінкі і элементы акцэнтных адзінак: інтанацыйнае перад’ядро, ядро і заядро. Фанетычны працэсар ажыццяўляе пераўтварэнне паслядоўнасці літар, з якіх сінтагма складаецца ў паслядоўнасць фанем і алафонаў. І нарэшце прасадыхны працэсар для моўнага сігналу ўстанаўлівае ў адпаведнасці з базай дадзеных прасадыхных «партрэтаў» сінтагмаў значнасці амплітуды, працягласці фанем і частот асноўнага тону для кожнага элемента акцэнтных адзінак.

Акустычны працэсар на аснове інфармацыі пра тое, якія неабходна сінтэзаваць алафоны і якія прасадыхныя характарыстыкі павінны быць прыпісаны кожнаму алафону, генеруе маўленчы сігнал шляхам кампіляцыі адрэзкаў натуральных гукавых хваль адпаведных алафонаў і мультыфонаў. У выніку ўваходны тэкст пераўтвораецца ў маўленчы сігнал.

Такім чынам, спраектаваная архітэктурна дазваляе маштабаваць і папаўняць сінтэзатар маўлення па тэксце для рускага і беларускага маўлення ў з высокай ступенню лінгвістычнага разумення ўваходнага тэксту і генерацыяй маўлення для самага шырокага круга спажыўцоў.

Інтанацыйная разметка тэксту. Прасодыка адыгрывае важную ролю як пры ўспрыманні сэнсу, так і пры ўспрыманні індывідуальнасці голасу і мовы дыктара. Таму прасадыхная мадэль, якая выкарыстоўваецца пры сінтэзе маўлення па тэксце, павінна адэкватна адлюстроўваць як мовазалежныя, так і дыктаразалежныя характарыстыкі.

У фанетыцы і філасофіі маўлення словазлучэнне лічыцца адносна незалежнай адзінкай маўленчай інтанацыі. Незалежнасць інтанацыі праяўляецца ў артыкуляцыі, семантычнай і сінтаксічнай уласцівасцях лінгвістычных адзінак, а таксама ў якасці іншых праяўленняў, якія дазваляюць вылучыць асобны набор слоў з патоку маўлення. Любы пунктуацыйны знак можа падзяляць тэкст на асобныя часткі. Але вельмі часта колькасць незалежных адзінак маўленчай інтанацыі можа быць болей за колькасць знакаў пунктуацыі. Звычайна словазлучэнне – гэта камбінацыя ад двух да пяці слоў, больш часта складаецца з трох слоў.

Дакладнае месца падзелу маўлення на словазлучэнні вызначаецца аптымальным задавальненнем семантыка-сінтаксічных, фанетычных і фізіялагічных патрабаванняў.

Першае з названых патрабаванняў прадугледжвае аб’яднанне ўнутры фразы семантычна звязаных слоў, якія, у сваю чаргу, нельга падзяліць на дзве фразы. Другое патрабаванне – тэндэнцыю ператварэння моўных фанетычных сістэм у пэўную рытмічную канструкцыю (напрыклад, група з двух-трох слоў, аб’яднаных у адну фразу), а трэцяе – утварэнне фразы з колькасцю слоў, якія магчыма вымавіць на працягу аднаго подыху.

Наступным этапам інтанацыйнага аналізу маўлення з’яўляецца вызначэнне тыпу словазлучэння (<PHRASE TYPE>). Да асноўных тыпаў інтанацыйных фраз адносяцца: завершаныя (*P*) і няскончаныя (*C*) фразы, спецыяльныя і агульныя пытанні (*Q*), клічныя фразы (*E*) і іх падтыпы, пазначаныя індэксамі 1 – *n*.

Прыклад інтанацыйнай разметкі тэксту:

```
<PHRASE TYPE="C1">Амаль забылася</PHRASE> і <PHRASE
TYPE="C7">здарэнне з лазняй</PHRASE>, а <PHRASE TYPE="C1"> потым
</PHRASE> і <PHRASE TYPE="P4">лазню злізаў Дняпро</PHRASE>.
<PHRASE TYPE="C7">Быццам і не было ні людзей</PHRASE>, ні
<PHRASE TYPE="P4">закуранай нізкай будыніны на беразе</PHRASE>.
```

Кожнае словазлучэнне ў сказе анатавана інтанацыйным індэксам, дзе *C1* – незавершанае словазлучэнне, якое знаходзіцца перад злучнікамі *i*; *C7* – незавершанае словазлучэнне, якое стаіць перад коскай; *P4* – завершанае словазлучэнне напрыканцы сказа.

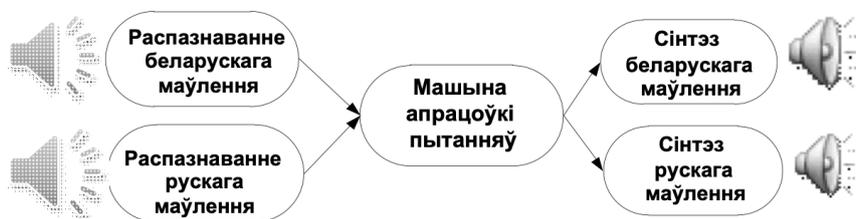
Пры анатаванні словазлучэння інтанацыйнай меткай улічваецца не толькі пунктуацыя, а таксама і найбліжэйшы кантэкст. Напрыклад, інтанацыйны тып Q12 суадносіцца з паслядоўнасцю тыпаў, тып Q11 – з пыталымі словазлучэннямі, якія маюць у сваім складзе пыталыя словы:

<PHRASE TYPE="Q11">Як так атрымалася</PHRASE>
<PHRASE TYPE="Q12">Чаму ты мне нічога не сказаў</PHRASE>?

Колькасць інтанацыйных падтыпаў асноўных тыпаў інтанацыйных фраз можа дасягаць некалькіх дзясяткаў. Задача вызначэння інтанацыйнага падтыпу дасягаецца аналізам двух фактараў: месцазнаходжання фразы ў тэксце і яго сэнсавага значэння. Першы фактар, пазіцыя ў тэксту, вызначаецца аналізам месцазнаходжання фразы ў адносінах да бліжэйшага знака прыпынку. Напрыклад: знак прыпынку напачатку ці напрыканцы тэксту, становішча словазлучэння да знака прыпынку ці пасля, а таксама тып знакаў прыпынку ў сказе. Другі фактар, менавіта сэнсавае значэнне словазлучэння, вызначаецца на аснове непасрэднага значэння фразы і выдзялення лагічнага інтанацыйнага цэнтру. У прыватнасці, трэба вызначыць, ці адлюстроўвае фраза намеры, тлумачэнні, наступныя пытанні і г. д. Канчатковая ідэнтыфікацыя інтанацыйнага тыпу і падтыпу фразы робіцца з улікам абодвух фактараў [11].

Сэрвіс «Інтанацыйны працэсар» дазваляе карыстальніку ў рэжыме анлайн разбіць тэкст на адмысловыя адзінкі (словазлучэнні). На ўваход сэрвісу даецца тэкст на беларускай ці рускай мове, на выхадзе карыстальнік атрымлівае спіс словазлучэнняў.

Двухмоўная пытална-адказная дыялогавая сістэма. Структура эксперыментальнай сістэмы натуральна-маўленчых інтэрфейсаў, якая знаходзіцца на этапе распрацоўкі, прыведзена на мал. 4 [7]. Яна ўспрымае галасавыя пытанні на беларускай ці рускай мове, апрацоўвае ў адпаведны тэкст. З дапамогай машыны апрацоўкі пытанняў генеруецца тэкставае паведамленне, па якім у выніку сінтэзуецца маўленне-адказ.



Мал. 4. Функцыянальная схема двухмоўнай пытална-адказнай дыялогавай сістэмы

Fig. 4. Functional diagram of a bilingual question-answering dialogue system

Эксперыментальная мадэль сістэмы была распрацавана для тэмы «геаметрыя». Прывядзём прыклады пытанняў-запытаў карыстальніка да сістэмы і паведамленняў, якія былі згенераваны яму ў адказ.

Па-беларуску

Пытанне-запыт: Вывесці поўнае семантычнае наваколле паняцця квадрат.

Адказ (фрагмент): Для паняцця квадрат існуюць наступныя сінонімы: правільны шматвугольнік з чатырма бакамі, клас квадратаў, правільны прамавугольнік, квадрат. Для паняцця квадрат існуюць адносіны: мяжа*, дыяганаль*, вяршыня*, перыметр*, плошча*, бісектрыса*, вобласць якіх дакладна перасякаецца з гэтым мноствам (квадрат)...

Па-руску

Пытанне-запыт: Вывести разбиение понятия четырехугольник.

Адказ: Понятие четырехугольник разбивается на понятие квадрат, понятие прямоугольник, понятие ромб, понятие трапеция.

Такім чынам, распрацаваная эксперыментальная двухмоўная дыялогавая сістэма дае карыстальніку магчымасць вусна задаваць пытанне і чуць адказ на пажаданай для карыстальніка мове, а не проста ўводзіць пытанне праз клавiятуру і чытаць адказ з экрана камп'ютара. Гэта робіць iнтэрфейс сістэмы больш зручным.

Даследаванне натуральна-маўленчых iнтэрфейсаў. Выкарыстанне натуральнай мовы для арганiзацыi дыялогу карыстальніка з камп'ютарнай сістэмай у агульным выпадку звязана з шэрагам праблем: неадназначнасцю натуральнай мовы, неадпаведнасцю магчымасцяў рэалiзацыi натуральна-маўленчага iнтэрфейсу спадзяваннем карыстальніка і iнш.

Для натуральна-маўленчага карыстальніцкага iнтэрфейсу пытална-адказных сістэм магчыма выкарыстанне абмежаванай натуральнай мовы без сур'ёзнай шкоды iх функцыянальнасці. Дзякуючы выкарыстанню абмеркаваных лексічных і граматычных абмежаванняў, прынятых з улікам абмежавання натуральнай мовы, з'яўляецца магчымасць пазбегнуць шматлікіх праблем, звязаных з аналізам неабмежаванай натуральнай мовы. Пры гэтым мова зносін карыстальніка з камп'ютарнай сістэмай па-ранейшаму застаецца цалкам натуральнай, а працэс рэалiзацыi гэтых зносін становіцца больш кіраваным і ў значнай ступені спрашчаецца.

Карыстальнік, які ўпершыню сутыкнуўся з натуральна-маўленчым iнтэрфейсам, можа мець завышаныя ці занiжаныя спадзяванні ад такой формы ўзаемадзеяння з камп'ютарнай сістэмай. Параўнальны аналіз тыпаў карыстальніцкіх iнтэрфейсаў (заснаваных на формах з фармальнай мовай запытаў, графічных карыстальніцкіх iнтэрфейсаў і iнш.) паказвае, што пры пабудове карыстальніцкіх iнтэрфейсаў з выкарыстаннем натуральнай мовы ў распрацоўшчыкаў пераважае жаданне максімальна наблізіць iнтэрфейс да запатрабаванняў непадрыхтаванага карыстальніка. Гэта некалькі падымае планку патрабаванняў да ступені прыязнасці і надзейнасці (безадмоўнасці) натуральна-маўленчых карыстальніцкіх iнтэрфейсаў, паколькі карыстальнік, упершыню сутыкнуўшыся з сістэмай, якая «разуме» натуральную мову, слаба ўяўляе рэальныя магчымасці такой сістэмы. Пры гэтым яго спадзяванні да ступені разумення натуральнай мовы могуць адрознівацца ад рэальных здольнасцяў сістэмы ў абодва бакі. Карыстальнік можа спытаць у сістэмы пра тое, чаго яна «не ведае», а можа па звычцы выкарыстаць найпростыя фармулёўкі запытаў.

Для рашэння пазначанай вышэй праблемы на пачатковых этапах развіцця натуральна-моўнага iнтэрфейсу можа быць выкарыстана спецыяльна прадугледжаная зваротная сувязь з карыстальнікам. У межах такой зваротнай сувязі карыстальніку, які задае пытанне сістэме, падаецца магчымасць бачыць вынік разбору гэтага запыту і яго ўяўленне на фармальнай мове. Такім чынам, карыстальнік метадам спроб і памылак падчас работы з пытална-адказнай сістэмай можа прыстасавацца (навучыцца) больш эфектыўна выкарыстоўваць усе магчымасці натуральна-маўленчага iнтэрфейсу. У якасці мэтавай фармальнай семантычнай мовы выкарыстоўваецца спецыялізаваная прадметнанезалежная мова пытанняў. Такая мова пытанняў валодае большай семантычнай магутнасцю ў параўнанні з мовамі запытаў да баз дадзеных і ведаў, што спрашчае аналіз натуральна-маўленчых карыстальніцкіх запытаў.

Семантычная (сэнсавая) неадназначнасць натуральна-маўленчага дыялогу можа развязацца за кошт таго, што прадметная і лінгвістычная базы ведаў ствараюцца ў рамках адзінай інфармацыйнай прасторы, адзінай прадметнай вобласці. У кожнага паняцця і адносіны ў гэтым выпадку маюцца ў прадметнай базе ведаў адпаведныя словы натуральнай мовы. Такім чынам складаецца першасная сувязь прадметных і лінгвістычных ведаў. Пабудова больш разгорнутых сувязяў з'яўляецца задачай распрацоўшчыка лінгвістычнай базы ведаў пэўнай пытална-адказнай сістэмы для вызначанай прадметнай вобласці.

Заклучэнне. Прадстаўленая мадэль кампанентнага праектавання натуральна-маўленчых карыстальніцкіх iнтэрфейсаў дае аснову для аналізу натуральна-маўленчых тэкстаў, пачынаючы з уводу тэксту, марфалагічнага, сінтаксічнага і семантычнага аналізу, а таксама генерацыі тэксту. Кампаненты сістэмы распазнавання і сінтэзу маўлення па тэксце даюць канчатковаму карыстальніку магчымасць вусна задаваць пытанне і чуць адказ на яго ад сістэмы, а не проста ўводзіць пытанне праз клавiятуру і чытаць адказ з экрана камп'ютара. Магчымасць iнтэграцыі iншых распрацовак і праектаў (у якасці знешніх кампанентаў) дазваляе

рабіць інтэграцыю розных падыходаў і метадаў у рамках аднаго праекта, эфектыўна выкарыстоўваць іх лепшыя бакі.

Мадэль двухмоўнай пытальна-адказнай сістэмы можа быць пашырана да выкарыстання большага набору моў.

Уклад аўтараў. Ю. С. Гецэвіч – распрацоўка дызайну аглядна-аналітычнага даследавання. Аналіз і інтэрпрэтацыя вынікаў працы, зацвярджэнне канчатковага варыянту артыкула для публікацыі. Д. А. Дзенісюк – камп’ютарнае мадэляванне канцэпцыі інтэрфейсаў, збор і сістэматызацыя дадзеных. С. А. Гецэвіч – аналіз і абагульненне дадзеных літаратуры, напісанне тэксту і крытычны перагляд яго зместу. Л. І. Кайгародава – збор і сістэматызацыя дадзеных, абгрунтаванне канцэпцыі даследавання, правядзенне параўнальнага аналізу, абагульненне і інтэрпрэтацыя вынікаў даследавання. К. А. Нікалаенка – распрацоўка дызайну эксперыментальнага даследавання, камп’ютарнае мадэляванне канцэпцыі інтэрфейсаў.

Спіс выкарыстаных крыніц

1. Current trends in multilingual speech processing / H. Bourlard, J. Dines, M. Mathew-Doss, P. Garner, D. Imseng, ..., F. Valente // *Indian Academy of Science*. – 2011. – Vol. 36, part 5. – P. 885–915.
2. Landauer T. K. Selection from alphabetic and numeric menu trees using a touch screen: Breadth, depth, and width / T. K. Landauer, D. W. Nachbar // *CHI '85 Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems*. – N. Y. : ACM, 1985. – Vol. 16, iss. 4. – P. 73–78.
3. Oppenheim, A. V. From frequency to quefrancy: A history of the cepstrum / A. V. Oppenheim, R. W. Schafer // *IEEE Signal Processing Magazine*. – 2004. – Vol. 21. – P. 95–106.
4. Rabiner, L. A. Tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech / L. A. Rabiner // *Proc. of the IEEE*. – 1988. – Vol. 77, iss. 2. – P. 257–286.
5. Бовбель, Е. И. Скрытые марковские модели и машины на опорных векторах: от теории к практике : пособие для студентов естественно-научных специальностей / Е. И. Бовбель, И. Э. Хейдоров, Ю. В. Пачковский. – Минск : БГУ, 2007. – 131 с.
6. Бовбель, Е. И. Статистические методы распознавания речи: скрытые марковские модели / Е. И. Бовбель, И. Э. Хейдоров // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной электроники*. – 1998. – № 3. – С. 36–54.
7. Семантическая технология проектирования белорусско- и русскоязычных ЕЯ-интерфейсов вопросно-ответных систем / С. А. Гецевич [и др.] // *Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2012) : материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 февр. 2012 г. / редкол. : В. В. Голенков (отв. ред.) [и др.]*. – Минск : БГУИР, 2012. – С. 401–412.
8. Гецевич, Ю. С. Система синтеза белорусской речи по тексту / Ю. С. Гецевич, Б. М. Лобанов // *Речевые технологии*. – 2010. – № 1. – С. 91–100.
9. Лобанов, Б. М. Компьютерный синтез и клонирование речи / Б. М. Лобанов, Л. И. Цирульник. – Минск : Беларус. навука, 2008. – 342 с.
10. Оппенгейм, А. В. Цифровая обработка сигналов / А. В. Оппенгейм, Р. В. Шафер. – М. : Связь, 1979. – 416 с.
11. Лобанов, Б. М. Компьютерная система анализа и интерпретации интонации речи / Б. М. Лобанов, В. А. Житко, Ю. А. Здронюк // *Междунар. конгресс по информатике: информационные системы и технологии = International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies / под ред. С. В. Абламейко*. – Минск : БГУ, 2016. – P. 589–594.

References

1. Bourlard H., Dines J., Mathew-Doss M., Garner P., Imseng D., Motlicek P., Liang H., Saheer L., Valente F. Current trends in multilingual speech processing. *Indian Academy of Science*, 2011, vol. 36, part 5, pp. 885–915.
2. Landauer T. K., Nachbar D. W. Selection from alphabetic and numeric menu trees using a touch screen: Breadth, depth, and width. *CHI '85 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, ACM, 1985, vol. 16, iss. 4, pp. 73–78.
3. Oppenheim A. V., Schafer R. W. From frequency to quefrancy: A history of the cepstrum. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2004, vol. 21, pp. 95–106.

4. Rabiner L. A. Tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol. 77, iss. 2, pp. 257–286.
5. Bovbel E. I., Heidorov I. E., Pachkovsky Y. V. Skrytye markovskie modeli i mashiny na opornyx vektorax: ot teorii k praktike : posobie dlya studentov estestvenno-nauchnykh specialnostej. *Hidden Markov Models and Support Vector Machines: From Theory to Practice: A Handbook for Science Students*. Minsk, BSU, 2007, 131 p. (In Russ.).
6. Bovbel E. I., Heidorov I. E. *Statistical speech recognition techniques: hidden Markov models*. Zarubezhnaya radioelektronika. Uspexi sovremennoj elektroniki [*Foreign Radio Electronics. Advances in Modern Electronics*], 1998, no. 3, pp. 36–54 (In Russ.).
7. Hetsevich S. A., Hetsevich Y. S., Eliseeva O. E., Zhitko V. A., Kuzmin A. A. Semantic technology for designing Belarusian- and Russian-language NL-interfaces of question-answer systems. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem : materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 16–18 fevralja 2012 g. Redkollegija : V. V. Golenkov (otvetstvennyj redaktor) [i dr.]. [*Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2012) : Materials of the II International Scientific and Technical Conference, Minsk, 16–18 February 2012*. In V. V. Golenkov (ed.) [et al.]]. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2012, pp. 401–412 (In Russ.).
8. Hetsevich Y. S., Lobanov B. M. *System for the synthesis of Belarusian speech by text*. Rechevye tehnologii [*Speech Technology*], 2010, vol. 1, pp. 91–100 (In Russ.).
9. Lobanov B. M., Cirulnik L. I. Kompyuternyj sintez i klonirovanie rechi. *Computer Synthesis and Cloning of Speech*. Belaruskaya navuka, 2008, 342 p. (In Russ.).
10. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. *Digital Signal Processing*. 1st ed. New Jersey, Prentice Hall, 585 p.
11. Lobanov B. M., Zhitko V. A., Zdaranok Y. A. Computer system for analyzing and interpreting speech intonation. Mezhdunarodnyj kongress po informatike: informacionnye sistemy i tehnologii. Pod redakciej S. V. Ablamejko [*International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies*. In S. V. Ablamejko]. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet, 2016, pp. 589–594.

Інфармацыя пра аўтараў

Юрась Станіслававіч Геўзвіч, кандыдат тэхнічных навук, загадчык лабараторыі распазнавання і сінтэзу маўлення, Аб'яднаны інстытут праблем інфарматыкі Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі.
E-mail: yuras.hetsevich@gmail.com

Дзмітры Анатольевіч Дзенісюк, магістр тэхнічных навук.
E-mail: d.denissyuk@gmail.com

Святлана Анатольеўна Геўзвіч, магістр філалагічных навук, малодшы навуковы супрацоўнік, Аб'яднаны інстытут праблем інфарматыкі Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі.
E-mail: novaeimya@gmail.com

Лёся Іосіфаўна Кайгародава, магістр тэхнічных навук, навуковы супрацоўнік, Аб'яднаны інстытут праблем інфарматыкі Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі.
E-mail: lesia.piatrouskaya@gmail.com

Кірыл Аляксандравіч Нікалаенка, магістр тэхнічных навук.
E-mail: Anak247@gmail.com

Information about the authors

Yuras S. Hetsevich, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Speech Recognition and Synthesis Laboratory, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: yuras.hetsevich@gmail.com

Dzmitry A. Dzenisnyk, M. Sci. (Eng.).
E-mail: d.denissyuk@gmail.com

Sviatlana A. Hetsevich, M. of Philological Sci., Junior Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: novaeimya@gmail.com

Lesia I. Kaigorodova, M. Sci. (Eng.), Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: lesia.piatrouskaya@gmail.com

Kiryl A. Nikalaenka, M. Sci. (Eng.).
E-mail: Anak247@gmail.com



УДК 004.942, 519.876.5

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-53-68>

Оригинальная статья
Original Paper

Оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора системы управления движением мобильного робота по цветоконтрастной линии на основе генетического алгоритма

Т. Ю. Ким[✉], Г. А. Прокопович

Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
[✉]E-mail: tatyana_kim92@mail.ru

Аннотация

Цели. Разработать систему управления движением мобильного робота по цветоконтрастной линии, а также найти значения коэффициентов пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД-) регулятора, позволяющего роботу двигаться вдоль линии с заданной скоростью.

Методы. Для настройки значений коэффициентов ПИД-регулятора используются методы перебора, автоматической настройки и генетический алгоритм.

Результаты. Разработан программный комплекс настройки ПИД-регулятора учебного мобильного робота RoboCoke, предназначенного для движения по замкнутой цветоконтрастной линии с заданной скоростью. Программный комплекс состоит из имитационной модели указанного робота в среде Simulink, четырех виртуальных трасс-полигонов и специализированного решателя на базе разработанного генетического алгоритма. С помощью предложенной функции пригодности реализована система управления мобильным роботом, удовлетворяющая поставленным условиям. На основе проведенных модельных экспериментов получены искомые значения параметров ПИД-регулятора.

Заключение. Проведено сравнение эффективности различных методов настройки ПИД-регулятора. Разработанный программный комплекс предназначен для решения практической задачи движения мобильного робота по цветоконтрастной линии со скоростью 1 м/с. Полученные результаты могут быть применены для исследования методов эволюционной настройки систем стабилизации транспортных роботов, обеспечивающих их движение без перерегулирования.

Ключевые слова: система стабилизации движения, генетический алгоритм, ПИД-регулятор, имитационная модель, имитационное моделирование, обратная связь, сенсоры

Благодарности. Работа выполнялась в рамках проекта БРФФИ Ф20Р-324 и задания Т31 ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства» (2021–2025).

Для цитирования. Ким, Т. Ю. Оптимизация коэффициентов ПИД-регулятора системы управления движением мобильного робота по цветоконтрастной линии на основе генетического алгоритма / Т. Ю. Ким, Г. А. Прокопович // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 53–68.

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-53-68>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 04.10.2021
Подписана в печать | Accepted 10.11.2021
Опубликована | Published 29.12.2021

Optimization of the PID coefficients for the line-follower mobile robot controller employing genetic algorithm

Tatyana Yu. Kim[✉], Ryhor A. Prakapovich

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus
✉E-mail: tatyana_kim92@mail.ru*

Abstract

Objectives. To develop a control system for the movement of a mobile robot along a color-contrast line, as well as to find the values of the coefficients of a proportional-integral-differentiating (PID) controller that allows the robot to move along the line at a given speed.

Methods. To adjust the values of the coefficients of the PID controller, methods of enumeration, automatic tuning and a genetic algorithm are used.

Results. A software package for tuning the PID controller of the educational mobile robot RoboCake, designed to move along a closed color-contrast line at a given speed, has been developed. The software package consists of a simulation model of the specified robot in the Simulink environment, several virtual traces-polygons and a specialized solver based on the developed genetic algorithm. With the help of the proposed fitness function, a mobile robot control system that satisfies the stated conditions is implemented. Based on the conducted model experiments, the desired values of the parameters of the PID controller are obtained.

Conclusion. A comparison of the effectiveness of various methods of tuning the PID controller is carried out. The developed software package is designed to solve the practical problem of moving a mobile robot along a color-contrast line at a speed of 1 m/s. The results obtained can be used to study methods of evolutionary tuning of stabilization systems for transport robots, ensuring their movement without overshoot.

Keywords: motion stabilization system, genetic algorithm, PID controller, simulation model, simulation, feedback, sensors

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the BRFFR project F20R-324 and the task T31 of the State Scientific Research Program "Digital and Space Technologies, Human, Society and State Security" (2021–2025).

For citation. Kim T. Yu., Prakapovich R. A. *Optimization of the PID coefficients for the line-follower mobile robot controller employing genetic algorithm*. Informatika [Informatics], 2021, vol. 18, no. 4, pp. 53–68 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-53-68>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Наиболее исследованы и часто применяются в промышленности ПИД-регуляторы, которые занимают до 90 % всего рынка [1, 2]. Как правило, точность и быстродействие ПИД-регуляторов являются приемлемыми для большинства современных задач по соотношению «цена – качество» и обеспечивают хорошую скорость решений для многих прикладных задач. Для настройки ПИД-регулятора требуется наличие аналитического описания объекта управления и его имитационной модели либо обеспечение возможности безопасного пробного запуска и тестовой эксплуатации самого объекта управления в различных режимах. Остальные 10 % рынка заняты узкоспециализированными регуляторами, которые требуют применения более сложных методов теории автоматического управления.

Для относительно несложных объектов управления ПИД-регуляторы могут подбираться либо вручную методом проб и ошибок (при условии, что это не приводит к аварийным ситуациям), либо с применением классических методов автоматической настройки ПИД-регуляторов. К классическим относятся, например, непараметрические методы настройки, основанные на принципе непрерывного цикла Циглера – Николса [3], и метод минимизации интеграла абсолютной погрешности [4]. Однако из-за специфики физических законов функционирования не-

которых объектов управления названные методы не всегда соответствуют требованиям вычислительной эффективности, скорости работы и качеству их настройки. Подобные исследования рассмотрены в работе [5], где были оптимизированы коэффициенты ПИД-регулятора для мобильного робота, следующего по линии.

Существует несколько программных продуктов для настройки ПИД-регуляторов. Они могут быть как специализированными, так и универсальными. К первым относятся, например, PID-expert [6] и ExperTune (URL: <https://lapshinvr.ru/articals/expertune.html>). Ко второму типу можно отнести библиотеку Simulink Control Design (URL: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/control/control_gs.pdf), которая является одним из многочисленных пакетов прикладных программ популярного математического обеспечения MATLAB. Библиотека Simulink Control Design способна автоматически настраивать ПИД-регуляторы одноконтурных и многоконтурных систем управления, что избавляет от необходимости ручного подбора параметров и многократного повторения реальных практических экспериментов. Однако для этого требуется наличие аналитических формул, которые в той или иной степени описывают физические процессы функционирования объектов управления. Если же по каким-либо причинам таких формул нет или объекты управления являются достаточно сложными, то существуют подходы, использующие имитационное моделирование, например, с помощью библиотеки Simscape Multibody. К сожалению, для указанных программных средств важным критерием является то, что исследуемая модель должна быть линейной. В этом случае автоматическая настройка реализуется с помощью метода интерактивной оценки параметров имитационной модели на основе данных отклика (Interactively Estimate Plant Parameters from Response Data; URL: <https://www.mathworks.com/help/control/getstart/interactively-estimate-plant-parameters-from-response-data.html>) приложения PID-Tuner. Существуют работы, в которых для подбора коэффициентов ПИД-регулятора дополнительно применяются методы эволюционного моделирования, в частности генетические алгоритмы [7–11].

В статье описывается опыт авторов по автоматической настройке коэффициентов ПИД-регулятора системы управления движением мобильного робота по цветоконтрастной линии с помощью его имитационной модели и генетического алгоритма. Для этого были разработаны оптический сенсор для обратной связи системы управления и функция пригодности, обеспечивающая выполнение условия минимизации расстояния между сенсором и краем линии.

Конструкция тестового мобильного робота RoboCake. В качестве объекта исследования был выбран мобильный робот RoboCake Beginner (рис. 1, а), задача которого заключалась в минимизации времени прохождения по нелинейной цветоконтрастной линии. Данная задача является типовой для мобильной робототехники и формулируется как движение по заранее известной траектории, которая задана в виде нанесенных на поверхность движения цветоконтрастных или магнитных полос либо в виде набора связанных пространственных точек на цифровых картах помещений.

Мобильный робот RoboCake Beginner имеет двухколесную платформу с дифференциальным приводом, оснащенную инкрементными энкодерами и двумя шарнирными опорами для устойчивости. Под корпусом робота установлены три датчика света для обнаружения цветоконтрастной линии. На рис. 1 эти датчики отмечены красным цветом. Зона расположения датчиков представляет собой равнобедренный треугольник с основанием 5,5 см и высотой 6 см, вершина которого расположена на расстоянии 2,5 см от центра платформы в сторону движения. Центр робота находится между двумя колесами, которые равноудалены от него на 4,25 см.

Рассмотрим актуальную задачу, являющуюся типичной при использовании транспортных тележек на складах и производствах. Требуется разработать систему управления движением мобильного робота,двигающегося по цветоконтрастной линии со скоростью 1 м/с. При этом цветоконтрастная линия должна находиться между двумя передними датчиками робота. Для обеспечения нормальной работы алгоритма движения данного робота ширина линии должна быть равной 2,4 см (рис. 2).

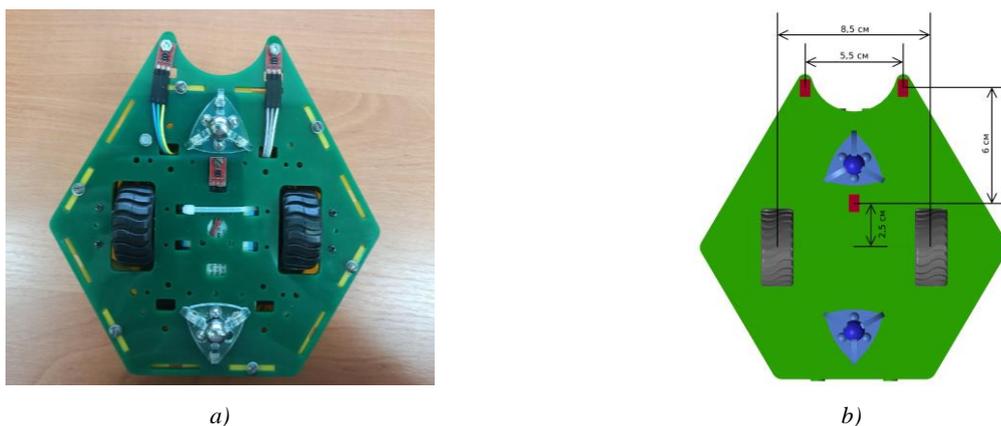


Рис. 1. Расположение датчиков света на нижней поверхности робота RoboCake Beginner (a) и его имитационной модели (b)

Fig. 1. Location of light sensors on the bottom of the robot RoboCake Beginner (a) and its simulation model (b)

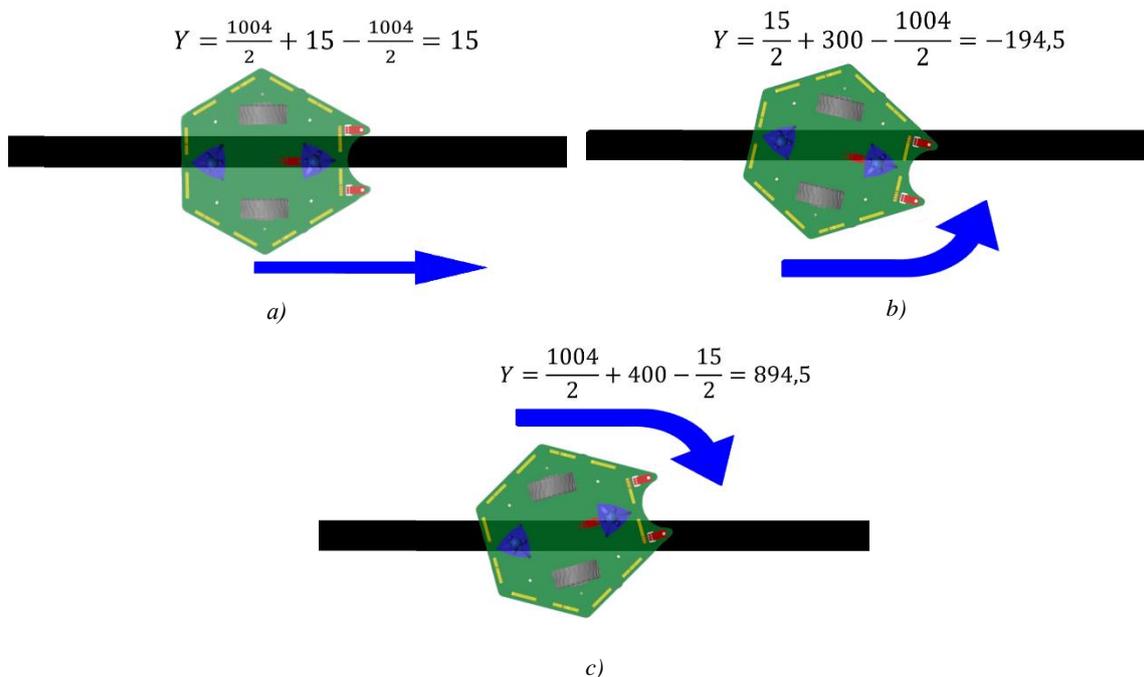


Рис. 2. Процесс корректировки положения мобильного робота относительно края линии в процессе его движения: a) вперед без изменений; b) вперед со смещением против часовой стрелки; c) вперед со смещением по часовой стрелке

Fig. 2. The process of correcting the position of the mobile robot relative to the edge of the line in the process of movement: a) move forward unchanged; b) move forward offset counterclockwise; c) forward offset clockwise

Чтобы определить положение робота RoboCake Beginner над цветоконтрастной линией, было предложено разработать на основе имеющихся трех датчиков света QRE1113 специальный сенсор. На вход сенсора должны поступать значения яркости от трех указанных датчиков, а на выходе он должен показывать расстояние от края цветоконтрастной линии до середины высоты равнобедренного треугольника, в вершинах которого находятся датчики света (см. рис. 1, b). Для определения положения сенсора над линией была предложена эмпирическая формула

$$Y = k \left(\frac{1}{2} S_L + S_F - \frac{1}{2} S_R \right), \quad (1)$$

где Y – расстояние от сенсора до края цветоконтрастной линии; k – эмпирический коэффициент взаимосвязи расстояния от центра сенсора до края линии и значения яркости отраженного света под ним; S_L , S_F и S_R – значения яркости отраженного света от поверхности, получаемые левым, центральным и правым датчиками света соответственно, которые выдает аналого-цифровой преобразователь бортового микроконтроллера.

Опишем предложенный алгоритм слежения за краем цветоконтрастной линии. Если $Y = 0$, то высота равнобедренного треугольника расположена вдоль края цветоконтрастной линии и корректировка не требуется (рис. 2, а). Если $Y < 0$, то во время движения мобильному роботу необходимо повернуть корпус против часовой стрелки (рис. 2, b); если $Y > 0$, то по часовой стрелке (рис. 2, c), чтобы выровнять положение и уменьшить расстояние от центра сенсора до края линии.

Было решено реализовать аппаратную часть системы управления движением мобильного робота на основе микроконтроллерной платы Arduino Mega, а программную часть – на основе библиотек пакета прикладных программ MATLAB/Simulink. В частности, библиотека Support Package for Arduino Hardware позволяет на базе созданной Simulink-модели системы управления сгенерировать управляющий код для любой из имеющихся в наборе микроконтроллерных плат семейства Arduino. Объект управления имеет два независимых ведущих колеса, соотношение скоростей вращения которых формирует требуемые линейную и угловую скорости всей платформы (рис. 3).

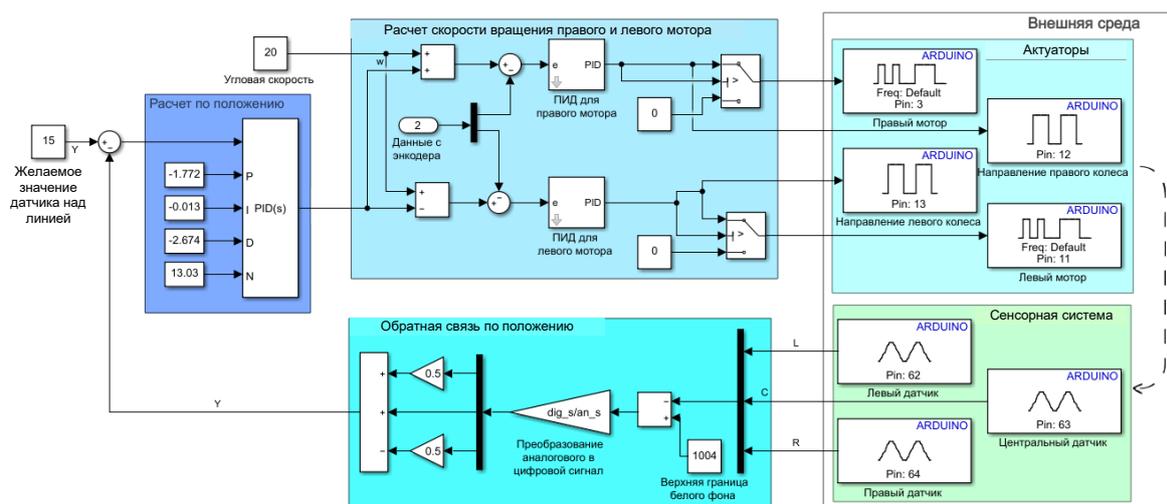


Рис. 3. Simulink-модель системы управления дифференциального привода колесной платформы с обратной связью по положению робота

Fig. 3. Simulink-model of a wheel platform differential drive control system with robot position feedback

Изначально для контроля за движением мобильного робота по линии был применен готовый ПИД-регулятор из библиотеки Control System Toolbox (URL: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/control/control_gs.pdf), для которого требуется ручной ввод значений коэффициентов управления: пропорционального (P), интегрального (I) и дифференциального (D) коэффициентов, а также фильтра (N) для дифференциального коэффициента. Как правило, на дифференциальный коэффициент ПИД-регулятора сильное влияние оказывает входной шум от анализируемых сенсоров. Для минимизации этого влияния применяется указанный дифференциальный фильтр. Система управления движением мобильного робота вдоль линии была разработана на основе классического ПИД-контроллера [12] с двухконтурным управлением: обратной связью по положению центра оптического сенсора над линией и обратной связью по заданной скорости вращения колес. Коэффициенты ПИД-контроллера последней связи были вычислены отдельно и в настоящей статье не рассматриваются.

Проблема настройки ПИД-регуляторов. В среде MATLAB/Simulink есть возможность использовать алгоритм автоматической настройки коэффициентов с применением дополнительного приложения PID Tuner [1, 12]. Для этого на основе реальных параметров робота, указанных ниже, в библиотеке Simscape MultiBody авторами была разработана имитационная модель мобильного робота RoboCake, которая представлена на рис. 4 в виде его отдельного блока.

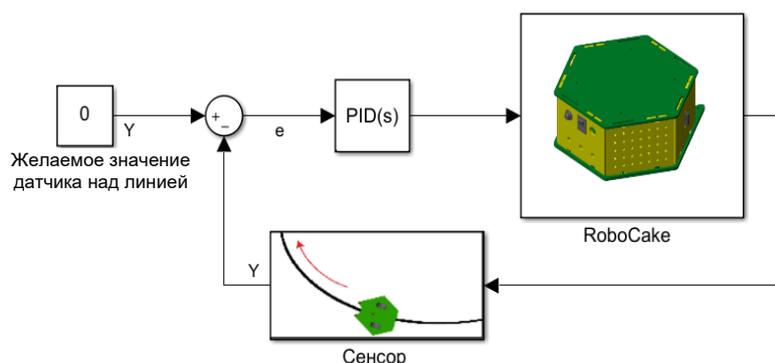


Рис. 4. Система управления имитационной моделью мобильного робота RoboCake

Fig. 4. Control system for a simulation model of a mobile robot RoboCake

Робот RoboCake имеет следующие физические параметры: радиус колеса 2,5 см, расстояние между колесами 8,5 см, ширина корпуса 16,9 см, длина корпуса 17,1 см, масса корпуса 400 г.

Для моделирования движения мобильного робота были созданы виртуальные трассы, которые представляют собой цифровые изображения цветоконтрастных линий в виде простейших геометрических фигур: окружности радиусом 1 м, эллипса с главными полуосями 0,3 и 1 м, квадрата со сторонами 1 м. На основе частей этих геометрических примитивов впоследствии можно комбинировать различные траектории, встречающиеся в реальных практических приложениях.

С целью корректного моделирования работы оптического сенсора были выбраны виртуальные трассы в виде квадрата размером 4×4 м и карта трассы, представленная в виде матрицы размером 2000×2000 пикселей (пк). С учетом этих размеров масштабный коэффициент равен 2 мм/пк, на вход каждого из трех виртуальных датчиков света подаются значения яркостей соответствующих скользящих окон в виде матриц размером 3×3 пак, ширина цветоконтрастных линий равняется 12 пак. Размер виртуальных карт взят с запасом, чтобы не стеснять движения робота и не потерять его координаты, если тот сойдет с линии.

Датчики света являются аналоговыми, поэтому в используемой авторами библиотеке Simulink Support Package for Arduino Hardware (URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40312-simulink-support-package-for-arduino-hardware>) цвет кодируется целыми числами от 0 до 1034. При проведении экспериментов на реальном мобильном роботе при естественном освещении и расположении датчиков на расстоянии 10 мм от поверхности трассы белый цвет кодируется числом 1004, черный – числом 15. Выходное значение находится путем вычисления среднего значения яркости всех 9 пак каждого из датчиков.

Для имитирования оптического сенсора потребовалось суммарно проанализировать фрагмент карты размером 27 пак. Сенсор считывает на карте три матрицы размером 3×3 пак, из которых формируется массив данных размером 9×3 пак элементов яркости отраженного света. Было разработано графическое окно с изображением виртуальных карт, которое позволяет видеть передвижение робота в 2D-проекции (рис. 5).

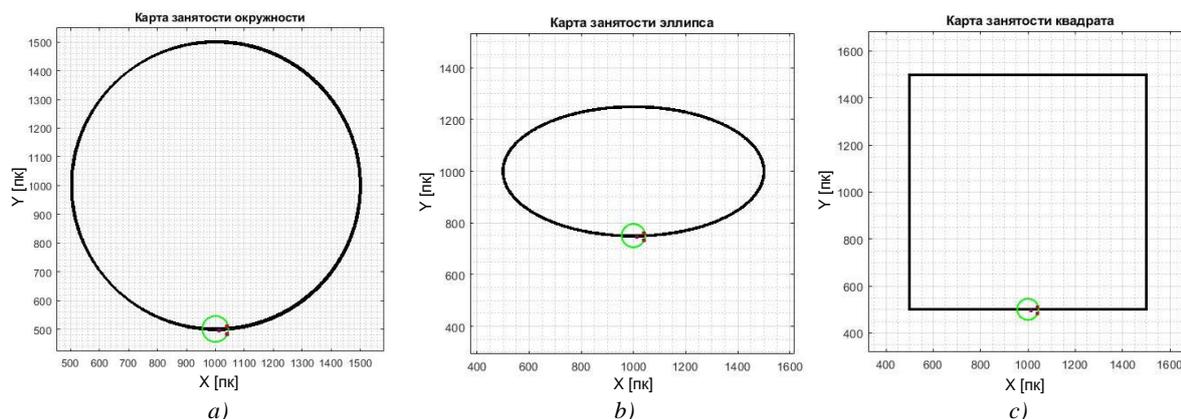


Рис. 5. Виртуальные полигоны: а) окружность ($R = 1$ м); б) эллипс ($Ra = 1$ м, $Rb = 0,25$ м); в) квадрат ($L = 1$ м)

Fig. 5. Virtual map: a) circle ($R = 1$ m); b) ellipse ($Ra = 1$ m, $Rb = 0,25$ m); c) square ($L = 1$ m)

Чтобы разработанная имитационная модель могла следовать по цветоконтрастной линии с заданной скоростью, необходимо настроить ПИД-регулятор. На первом этапе был применен метод проб и ошибок, где значения коэффициентов ПИД-регулятора подбирались вручную (табл. 1) на основе правил, указанных в работах [13, 14]. Ручным методом перебора удалось найти различные рабочие варианты наборов значений коэффициентов, при которых мобильный робот проходил всю дистанцию, однако его скорость составляла 0,3 м/с. При увеличении скорости до 1 м/с мобильный робот сходил с линии в районе фокусов указанного эллипса. Среднее время прохождения составило 210 мс. Данные результаты указывают на то, что ручная настройка ПИД-регулятора отнимает много времени и не гарантирует оптимального качества управления.

Таблица 1. Значения коэффициентов ПИД-регулятора, полученные в результате экспериментов методом ручной настройки

Table 1. The values of the PID controller coefficients obtained as a result of experiments using the manual tuning method

P	I	D	N	Время прохождения, мс Transit time, ms
2,575	-7,207	-3,675	100,000	285
3,676	-0,159	-4,665	80,250	183
-9,550	1,601	-2,827	100,000	223
6,252	-4,969	1,045	20,610	192
-4,047	-0,005	-4,085	1,280	167
Среднее значение				210

Следующим этапом была автоматическая настройка ПИД-регулятора с помощью приложения PID Tuner (URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/pidtuner-app.html>), входящего в библиотеку System Identification Toolbox. В инструкции к PID Tuner указано, что данный инструмент может выполнять свои функции автоматической настройки только при условии линеаризованной модели объекта управления. Однако в связи с тем, что в разработанной имитационной модели учитываются трение и инерция, она является изначально нелинейной. Поэтому авторам пришлось воспользоваться дополнительной возможностью приложения PID Tuner, которое численным методом подбирает исследуемому объекту максимально правдоподобную передаточную функцию. Данный метод включает следующие этапы: 1) воздействие на объект управления тестовыми входными данными; 2) сбор полученных выходных данных, на основе которых происходит идентификация самого объекта управления; 3) обработку полученных данных отклика; 4) корректировку структуры и параметров новой модели объекта управления;

5) сохранение модифицированного объекта управления. После этого PID Tuner выдает эталонные значения, которые отображают новый отклик с обратной связью. Полученные данные были применены в готовой модели (табл. 2). С помощью автоматической настройки удалось уменьшить среднее время прохождения дистанции до 133 мс, однако не удалось достичь требуемой скорости в 1 м/с. При этом даже со скоростью 0,45 м/с мобильный робот двигался рывками, поэтому было решено использовать генетический алгоритм.

Таблица 2. Значения коэффициентов ПИД-регулятора, полученные в результате автоматической настройки в приложении PID Tuner

Table 2. The values of the PID controller coefficients obtained as a result of automatic tuning by the PID Tuner application

P	I	D	N	Время прохождения, мс <i>Transit time, ms</i>
0,067	0,006	0,648	1,280	126
0,001	1,551	0,000	0,152	142
-0,012	-5,870	-0,473	0,129	138
0,572	0,001	0,005	1,540	122
0,383	0,010	0,035	2,550	137
<i>Среднее значение</i>				133

Оптимизация значений параметров ПИД-регулятора на основе разработанного генетического алгоритма. В связи с тем что настройку ПИД-регулятора можно представить как задачу поиска локального минимума для функции четырех переменных, было предложено воспользоваться одним из современных методов эволюционной оптимизации – генетическим алгоритмом. Основным преимуществом генетического алгоритма, который оказался эффективным для настройки ПИД-регулятора, является то, что процесс поиска локального минимума функции пригодности реализуется параллельно из большого числа точек фазового пространства управляющих коэффициентов ПИД-регулятора.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии со следующими шагами генетического алгоритма (рис. 6), реализованного в библиотеке Global Optimization Toolbox (URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm-options.html>):

1. Подбор коэффициентов для каждой особи из популяции.
2. Загрузка данных в имитационную модель, где время симуляции занимает 6 с и за это время мобильный робот совершает полный круг по эллиптической кривой.
3. Формирование выходных данных в виде матрицы и графиков.
4. Вычисление функции пригодности для эллиптической кривой, где вычисляется расстояние e .
5. Проверка приведенных ниже критериев остановки:

MaxGenerations – алгоритм останавливается, если было достигнуто максимальное число итераций.

MaxStallGenerations – алгоритм останавливается, если среднее относительное изменение в значении наилучшей функции пригодности **MaxStallGenerations** меньше или равно **FunctionTolerance**, где для последней функции устанавливается предел, который не должен превышать среднее изменение функции пригодности.

MaxTime – превышение заданного времени остановки.

6. Если условия не выполняются, то следует вернуться к шагу 1 и сформировать следующее поколение.

Более подробное описание работы предложенного генетического алгоритма можно найти по ссылке на [GitHub.com](https://github.com/TatyanaKim3160/RoboCake/blob/master/блок-схема.docx) (URL: <https://github.com/TatyanaKim3160/RoboCake/blob/master/блок-схема.docx>).

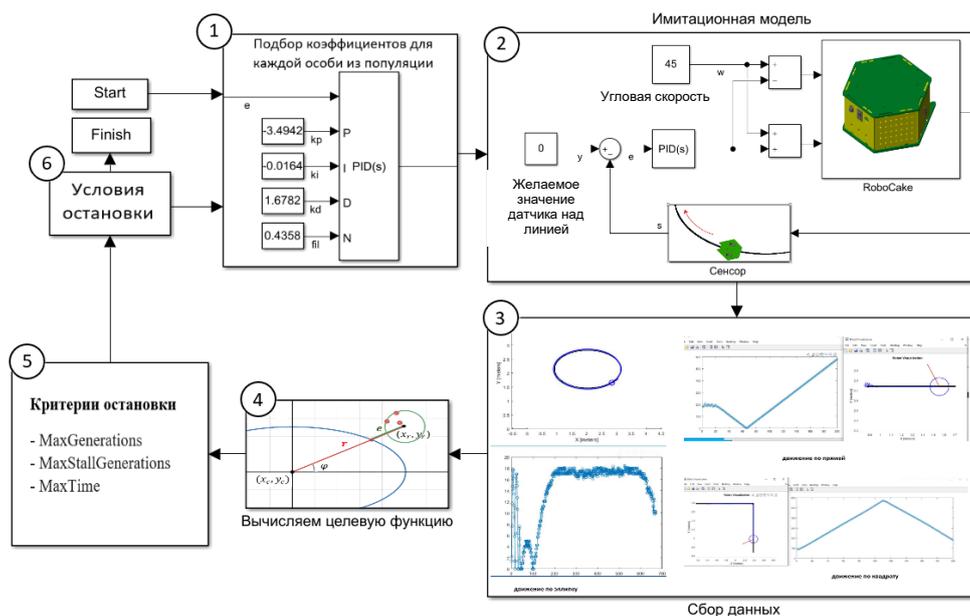


Рис. 6. Схема работы генетического алгоритма, позволяющего найти требуемые коэффициенты для ПИД-регулятора

Fig. 6. The scheme of the genetic algorithm, which allows to find the required coefficients for the PID controller

Формализация задачи и формирование функции пригодности для разработанного генетического алгоритма. Первым и наиболее важным шагом при использовании генетических алгоритмов является формализация задачи. Авторы предложили, чтобы популяция в каждом поколении (конкретные значения популяции в каждой итерации) была представлена в виде набора особей, где каждая особь кодируется одной хромосомой в виде вектора из коэффициентов P_i, I_i, D_i и N_i :

$$\underbrace{P_1 \ I_1 \ D_1 \ N_1}_{\text{Особь 1}} \ \underbrace{P_2 \ I_2 \ D_2 \ N_2}_{\text{Особь 2}} \ \underbrace{\dots \ \dots \ \dots \ \dots}_{\dots} \ \underbrace{P_n \ I_n \ D_n \ N_n}_{\text{Особь } n} \ . \quad (2)$$

Другими словами, в рассматриваемом случае особь содержит одну хромосому, в которой присутствуют четыре гена, отвечающих за пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты настраиваемого ПИД-регулятора, а также коэффициент фильтра для дифференциальной составляющей регулятора. Подобная задача формализации уже использовалась в работе [15]. В настоящей статье для решения задачи оптимизации коэффициентов ПИД-регулятора системы управления движением мобильного робота предложена собственная функция пригодности.

Вторым шагом является разработка функции пригодности, минимизирующей расстояния между центром сенсора мобильного робота и краем цветоконтрастной линии. Операция оценивания функции пригодности является основополагающей для эффективной работы генетического алгоритма. Для успешного формирования функции пригодности необходимо определить условия, при которых в процессе движения мобильного робота будут подбираться коэффициенты для ПИД-регулятора, позволяющие роботу в процессе движения минимизировать расстояние до края цветоконтрастной линии (рис. 7).

Рассмотрим принцип формирования функции пригодности на примере первого виртуального полигона, в который поочередно загружались две замкнутые кривые в виде эллипсов с параметрами $Ra = 1$ м, $Rb = 0,5$ м и $Ra = 1$ м, $Rb = 0,25$ м. Имитационная модель мобильного робота двигалась со скоростью 1 м/с. Функция пригодности $F_{ГА}$ заключается в том, чтобы за выделенное модельное время робот смог проехать вдоль замкнутой линии максимально возможное рас-

стояние L . Суммарная ошибка E , являющаяся расстоянием между центром робота и краем линии, должна быть минимальной. В результате функция пригодности для каждой особи вычисляется следующим образом:

$$F_{\Gamma A} = \frac{E}{L}. \quad (3)$$

Путь, пройденный роботом за выделенное модельное время, определяется равенством

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (4)$$

где x_i и y_i – координаты положения центра мобильного робота на i -м шаге моделирования, n – количество шагов модельного времени.

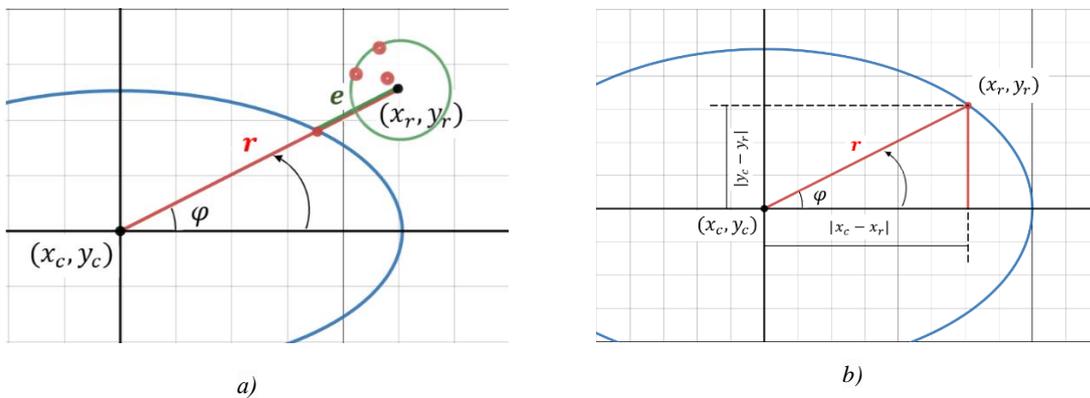


Рис. 7. Графики, демонстрирующие формирование функции пригодности: а) определение ближайшего расстояния e от центра робота до цветоконтрастной линии; б) вычисление угла φ пройденного расстояния между осью абсцисс и текущим положением робота с координатами x_r, y_r

Fig. 7. Graphs demonstrating the formation of the fitness function: a) determination of the closest distance e from the center of the robot to the color contrast line; b) calculating the angle φ of the distance traveled between the abscissa axis and the current coordinates of the robot x_r, y_r ;
b) determination of the closest distance e from the center of the robot with coordinates x_r, y_r

Будем считать, что ошибка рассогласования e движения робота вдоль края линии равняется расстоянию между текущим положением робота и точкой эллипса, получаемой пересечением края линии с отрезком, который соединяет центры эллипса и робота (рис. 7, а):

$$e = \sqrt{(x_c - x_r)^2 + (y_c - y_r)^2} - r, \quad (5)$$

где x_c и y_c – координаты центра эллипса; x_r и y_r – текущие координаты положения центра мобильного робота; r – радиус эллипса, соответствующий пройденному роботом углу φ :

$$\varphi = \arcsin \frac{|y_c - y_r|}{\sqrt{(x_c - x_r)^2 + (y_c - y_r)^2}}; \quad (6)$$

$$r = \frac{ab}{\sqrt{b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (7)$$

Тогда суммарная ошибка E , накопленная за время прохождения роботом пути, будет равняться сумме квадратов минимального расстояния между роботом и линией:

$$E = \sum_{i=1}^n e_i^2. \quad (8)$$

Рассматриваемый подход использовался также для виртуальных полигонов «окружность» и «квадрат», описания их функций пригодности в статье не приводятся. При этом во время работы генетического алгоритма были получены промежуточные управляющие операторы.

Создание начальной популяции и выбор операторов для предложенного генетического алгоритма. Для формирования начальной популяции было проведено более 100 пробных запусков, где количество особей располагалось в диапазоне от 5 до 150. Были выбраны оптимальные управляющие операторы генетического алгоритма с минимальной ошибкой отклонения. Не всегда большое количество особей в одной итерации приводит к хорошим результатам, наиболее эффективное число особей для используемой модели – от 25 до 50 на популяцию.

Для того чтобы сократить время поиска значений коэффициентов ПИД-регулятора и, следовательно, сузить пространство поиска, были найдены границы области допустимых значений (см. табл. 2), которые использовались при последующей работе генетического алгоритма.

Следующим этапом для реализации предложенного генетического алгоритма является выбор операторов для правильной оптимизации ПИД-регулятора из библиотеки Optimization Toolbox (URL: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/optim/optim.pdf). С целью получения качественных результатов и повышения скорости обучения работа по восьми возможным параметрам настройки генетического алгоритма путем перебора и сравнения были выбраны:

1. *Оператор селекции.* Функция селекции предназначена для отбора родительских хромосом в новое поколение. Для этого оказался более эффективным метод стохастической равномерной селекции, используемый по умолчанию. Суть метода заключается в том, что родительские хромосомы могут выбираться более одного раза и передаваться нескольким потомкам.

2. *Оператор скрещивания.* В процессе скрещивания формируется следующее поколение. Из семи предложенных в библиотеке параметров путем перебора была выбрана функция арифметического пересечения Arithmetic, которая использует среднеарифметическое взвешенное значение от предыдущего поколения.

3. *Оператор мутации.* Применяется для случайно выбранной особи, у которой один из случайно выбранных генов меняется на случайное число. Значение этого числа устанавливается методом Гаусса.

4. *Оператор элитного отбора.* После одного цикла итерации идет отбор элитных особей. Подсчетом элиты определяется число лучших особей, которые гарантированно переходят в следующее поколение без изменений. Их количество должно быть меньше либо равно количеству особей в популяции. В проведенных экспериментах количество элитных особей составило 4 % от всего количества особей.

Выбранные операторы и значения приведены в табл. 3. Вычисленные значения параметров подробно описаны в справочной системе пакета MATLAB R2020b (URL: <https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm-options.html>).

Таблица 3. Операторы и значения параметров для генетического алгоритма

Table 3. Operators and parameter values for genetic algorithm

Операторы <i>Operators</i>	Значения операторов <i>Values of operators</i>
Population type	50
Creation function	Uniform
Scaling function	Rank
Selection function	Stochastic uniform
Mutation function	Gaussian
Elite count	2
Crossover function	Arithmetic
Crossover fraction	0,8
Use parallel	1
Max Generations	25
Upper bounds	5·[1 1 1 1]
Lower bounds	-5·[1 1 1 0]

Было проведено около 80 экспериментов, и только в пяти из них (табл. 4) выполнялись условия, заданные с помощью дополнительной библиотеки пакета MATLAB R2020b (табл. 3). Среднее значение времени прохождения робота по кривой эллипса сократилось до 56 мс, причем найденные значения коэффициентов ПИД-регулятора позволяют роботу двигаться как по эллипсу, так и по окружности.

Таблица 4. Значения коэффициентов ПИД-регулятора, которые прошли отбор и удовлетворяют всем критериям пригодности

Table 4. The values of the PID controller coefficients that have passed the selection and meet all fitness criteria

P	I	D	N	Значение минимальной функции пригодности <i>The value of the minimum fitness function</i>	Пройденное время, мс <i>Elapsed time, ms</i>
-3,494	-0,016	1,678	0,436	1,820	61
-2,903	-0,368	-0,716	-0,461	0,001	52
2,001	-0,965	-3,932	3,920	0,003	54
-4,627	0,150	0,301	4,948	0,126	55
-1,000	0,000	-0,062	1,199	0,452	58
<i>Среднее значение</i>					56

За 25 поколений отбора (рис. 8) были найдены значения операторов (см. табл. 3), соответствующие минимуму функции пригодности: $F_{GA} = 1,820$ (лучшее значение). При этом среднее значение функции пригодности для сгенерированной случайным образом начальной популяции решений по всем особям поколения составило 4,523.

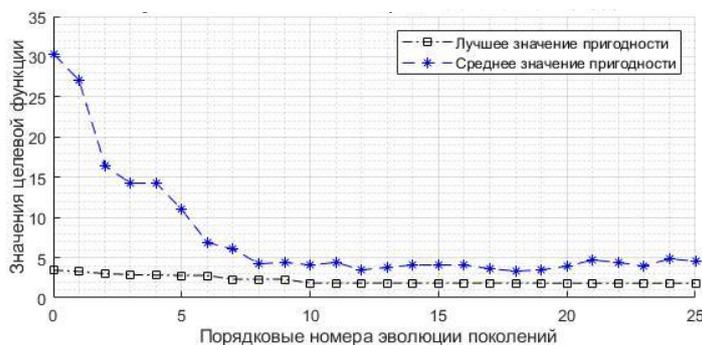


Рис. 8. Процесс оптимизации искоемых коэффициентов с помощью генетического алгоритма

Fig. 8. Optimization of the desired coefficients using a genetic algorithm

Использованные методы настройки для разработанного генетического алгоритма доказали свою эффективность в выборе лучших результатов за счет повышения устойчивости характеристик и показателей производительности.

Пример движения робота по кривой эллипса с параметрами $Ra = 1$ и $Rb = 0,5$ м и полученными значениями коэффициентов ПИД-регулятора приведен на рис. 9, где прерывистой линией обозначено желаемое движение робота относительно угла его положения с линейной скоростью 1 м/с, а непрерывной линией показан график функции изменения радиуса движения имитационной модели. На рис. 9, а видно, что многократный запуск с максимальным количеством особей и итераций в некоторых случаях может привести к ухудшению эффективности работы коэффициентов.

На рис. 10 представлен график накопления ошибки E в процессе движения робота по кривой эллипса со скоростью 1 м/с.

Во время исследований было осуществлено более 80 симуляций, благодаря которым были определены подходящие количество особей в популяции и количество итераций для данного робота. Задание дополнительных параметров для генетического алгоритма требует опыта и знаний, так как их применение сокращает время обучения и улучшает результат.

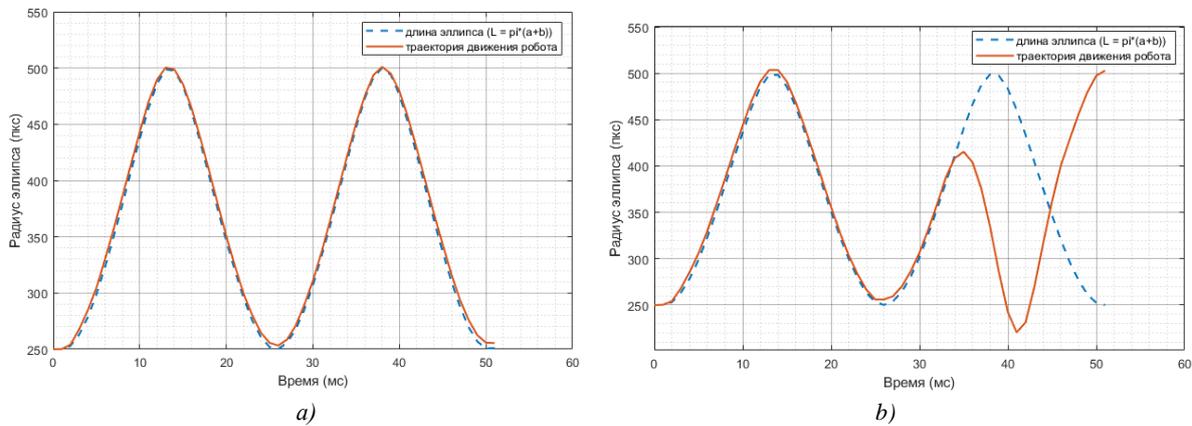


Рис. 9. Результаты запуска генетического алгоритма для управления движением робота по кривой эллипса в течение 52 мс модельного времени: а) итераций 25, особей 50; б) итераций 75, особей 70

Fig. 9. Results of running a genetic algorithm to control the robot's motion along an ellipse curve for 52 ms of model time: a) iterations 25, individuals 50; b) iterations 75, individuals 70

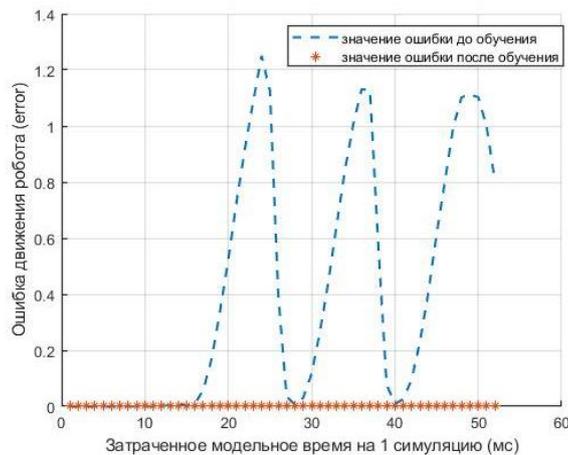


Рис. 10. График ошибки движения робота по кривой эллипса

Fig. 10. Graph of the error of the robot's movement along the ellipse curve

Предложенная функция пригодности, описываемая формулами (3)–(8), и выбранные параметры настройки генетического алгоритма позволили найти значения коэффициентов ПИД-регулятора, обеспечивающего приемлемое управление движением робота по цветоконтрастной линии. Моделирование проводилось с применением метода Rapid Accelerator на шестиядерном процессоре Intel(R) Core (TM) i5-9600KF с 32 ГБ оперативной памяти для хранения популяций решений. Было затрачено 6 ч рабочего времени.

Заключение. В статье описан процесс создания системы управления движением мобильного робота RoboCake Beginner по цветоконтрастной линии. Для этого была разработана и реализована система управления с обратной связью от оптического сенсора положения, которая способна управлять как реальным роботом, так и его имитационной моделью. Имитационная модель робота способна двигаться со скоростью 1 м/с по окружности с радиусом 1 м и эллипсу с радиусами 1 и 0,5 м. На более сложном полигоне в форме эллипса с радиусами 1 и 0,25 м мобильный робот может двигаться со скоростью 0,8 м/с. Полученные коэффициенты

ПИД-регулятора были использованы в системе управления роботом RoboCake Beginner, который двигался со скоростью 0,4 м/с. Низкая скорость движения реального робота обуславливается недостаточно мощными двигателями, которые в нем использовались.

Для повышения качества движения мобильного робота первоначально были применены два метода настройки ПИД-регулятора: ручной и автоматический (с помощью приложения PID Tuner). В процессе усложнения траекторий движения робота был выявлен ряд недостатков, таких как перерегулирование объекта управления, потеря полезного времени для подбора коэффициентов и перезапуск модели, несоответствие точной динамики робота. Это дало основание для применения генетического алгоритма на следующем этапе решения задачи оптимизации коэффициентов ПИД-регулятора.

В работе предложен подход к настройке решателя, позволяющий уменьшить вычислительные затраты непрерывного моделирования в процессе эволюционного поиска с помощью генетического алгоритма. Были подобраны параметры для операторов популяции, селекции, скрещивания и мутации. Для оптимизации коэффициентов ПИД-регулятора разработана функция пригодности. На основе полученных управляющих коэффициентов учебный мобильный робот способен двигаться вдоль нелинейной цветоконтрастной линии, минимизируя расстояние между центром оптического сенсора и краем линии.

Применение генетического алгоритма для учебного робота позволило получить приемлемые результаты благодаря использованию предложенных функций пригодности для каждой карты (замкнутой трассы в виде окружности, эллипса и квадрата) отдельно и выбору подходящих параметров генетических операторов.

В результате анализа большого количества проведенных численных экспериментов было найдено такое количество популяций и итераций, которое позволило минимизировать вычислительные затраты. Была установлена взаимосвязь между количеством запусков популяций и числом итераций, а также факт минимального влияния значений интегрального коэффициента в ПИД-регуляторе. В связи с этим рекомендуется упростить систему управления до ПД-регулятора.

Мобильные роботы находят все больше практического применения в автоматизации производства, сфере обслуживания и других непромышленных направлениях. Опыт, полученный при проведении экспериментов по движению мобильного робота RoboCake Beginner по контрастной линии, может быть использован для построения более сложных роботизированных систем, что значительно снизит риски на начальной стадии их проектирования.

Вклад авторов. Т. Ю. Ким разработала программный комплекс по настройке ПИД-регулятора, провела экспериментальные исследования с ручной и полуавтоматической настройкой ПИД-регулятора, программно реализовала функцию пригодности для генетического алгоритма, а также настроила его параметры. Г. А. Прокопович поставил задачи, определил план и обосновал актуальность работы, предложил формализацию основных компонентов решения поставленной задачи с помощью генетического алгоритма.

Список использованных источников

1. Автоматизированная настройка ПИД-регулятора для объекта управления следящей системы с использованием программного пакета MATLAB Simulink / А. В. Филиппов [и др.] // Наука, техника и образование. – 2015. – № 12(18). – С. 53–59.
2. Aström, K. J. The future of PID control / K. J. Aström, T. Hägglund // Control Engineering Practice. – 2001. – Vol. 9, no. 11. – P. 1163–1175. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00062-4)
3. Иващенко, Н. Н. Автоматическое регулирование: теория и элементы систем / Н. Н. Иващенко. – М. : Машиностроение, 1978. – 737 с.
4. Martins, F. G. Tuning PID controllers using the ITAE criterion / F. G. Martins // Intern. J. of Engineering Education. – 2005. – Vol. 21, no. 5. – P. 867–873.
5. Kose, O. PID controlled line follower robot design on indoor 3D networks / O. Kose, I. R. Karas // IAES Intern. Conf. on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI-2014). – Yogyakarta, Indonesia, 2014. – P. 20–21.

6. Варламов, И. PID-EXPERT – автоматизация автоматизации / И. Варламов, П. Зубов // *Control Engineering*. – 2017. – № 2(68). – С. 98–101.
7. Vladu, E. E. Controller tuning using genetic algorithms [Electronic resource] / E. E. Vladu, T. L. Dragomir // 1st Romanian-Hungarian Joint Symp. on Applied Computational Intelligence (SACI 2004). – Springer, 2004. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/228954545_Controller_Tuning_Using_Genetic_Algorithms. – Date of access: 12.05.2021.
8. Genetic algorithm / M. Ünal [et al.] // *Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms*. – Berlin : Springer, 2013. – 449 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32900-5_3
9. Саймон, Д. Алгоритмы эволюционной оптимизации. Биологически обусловленные и популяционно-ориентированные подходы к компьютерному интеллекту / Д. Саймон ; пер. с англ. А. В. Логунова. – М. : ДМК Пресс, 2020. – 1002 с.
10. Разработка генетического алгоритма с адаптивными мутациями для определения глобального экстремума функции n -переменных [Электронный ресурс] / А. Н. Кошев [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – № 8(6). – С. 1–13. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN616.pdf>. – Дата доступа: 12.05.2021.
11. Подлазова, А. В. Генетические алгоритмы на примерах решения задач раскроя / А. В. Подлазова // *Проблемы управления*. – 2008. – № 2. – С. 57–63.
12. Koo, Y. C. Motor speed controller for differential wheeled mobile robot / Y. C. Koo, E. A. Bakar // *ARPN J. of Engineering and Applied Sciences*. – 2015. – Vol. 10, no. 22. – P. 10698–10702.
13. PID Control / ed. W. S. Levine // *The Control Handbook*. – Piscataway, NJ : IEEE Press, 1996. – P. 198–209.
14. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / A. O'Dwyer. – London : Imperial College Press, 2003. – 564 p.
15. Mirzal, A. PID parameters optimization by using genetic algorithm / A. Mirzal, Sh. Yoshii, M. Furukawa // *ISTECS J.* – 2006. – Vol. 8, no. 11. – P. 34–43.

References

1. Filippov A. V., Kosolapov M. A., Maslov I. A. *Automated tuning of the PID controller for the control object of the servo system using the MATLAB Simulink software package*. Nauka, tehnika i obrazovanie [Science, Technology and Education], 2015, no. 12(18), pp. 53–59 (In Russ.).
2. Aström K. J., Hägglund T. The future of PID control. *Control Engineering Practice*, 2001, vol. 9, no. 11, pp. 1163–1175. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00062-4)
3. Ivaschenko N. N. Avtomaticheskoe regulirovanie: teoriya i elementi system. *Automatic Regulation: Theory and Elements of Systems*. Moscow, Mashinostroenie, 1978, 737 p. (In Russ.).
4. Martins F. G. Tuning PID controllers using the ITAE criterion. *International Journal of Engineering Education*, 2005, vol. 21, no. 5, pp. 867–873.
5. Kose O., Karas I. R. PID controlled line follower robot design on indoor 3D networks. *IAES International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI-2014)*. Yogyakarta, Indonesia, 2014, pp. 20–21.
6. Varlamov I., Zubov P. PID-EXPERT – automation automation's. *Control Engineering*, 2017, no. 2(68), pp. 98–101 (In Russ.).
7. Vladu E. E., Dragomir T. L. Controller tuning using genetic algorithms. *1st Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence (SACI 2004)*. Springer, 2004. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228954545_Controller_Tuning_Using_Genetic_Algorithms (accessed 12.05.2021).
8. Ünal M., Ak A., Topuz V., Erdal H. Genetic algorithm. *Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms*. Berlin, Springer, 2013, 449 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32900-5_3
9. Simon D. *Evolutionary Optimization Algorithms*. John Wiley & Sons, 2013, 784 p.
10. Koshev A. N., Salmin V. V., Generalova A. A., Bichkov D. S. *The development of genetic algorithm with adaptive mutations to determine the global extremum function of n-variables*. Internet-jurnal "Naukovedenie" [Online Magazine "Science"], 2016, vol. 8, no. 6, pp. 1–13. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN616.pdf> (accessed 12.05.2021).
11. Podlazov A. V. *Genetic algorithms based on examples of solving cutting problems*. Problemi upravleniya [Management Problems], 2008, vol. 2, pp. 57–63 (In Russ.).
12. Koo Y. C., Bakar E. A. Motor speed controller for differential wheeled mobile robot. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, vol. 10, no. 22, pp. 10698–10702.

13. PID control. In W. S. Levine (ed.). *The Control Handbook*. Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 1996, pp. 198–209.
14. O'Dwyer A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. London, Imperial College Press, 2003, 564 p.
15. Mirzal A., Yoshii Sh., Furukawa M. PID parameters optimization by using genetic algorithm. *ISTECS Journal*, 2006, vol. 8, no. 11, p. 34–43.

Информация об авторах

Ким Татьяна Юрьевна, аспирант, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

E-mail: tatyana_kim92@mail.ru

Прокопович Григорий Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией робототехнических систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

E-mail: rprakapovich@robotics.by

Information about the authors

Tatyana Yu. Kim, Postgraduate Student, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

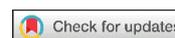
E-mail: tatyana_kim92@mail.ru

Ryhor A. Prakapovich, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Robotic Systems Laboratory, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

E-mail: rprakapovich@robotics.by

КОСМИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ГЕОИНФОРМАТИКА

SPACE INFORMATION TECHNOLOGIES AND GEOINFORMATICS



УДК 528.85; 528.87; 528.88; 528.94
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-69-78>

Оригинальная статья
Original Paper

Опыт совершенствования программных комплексов дистанционного зондирования Земли для обнаружения тепловых аномалий

С. А. Золотой, И. Б. Страшко, Д. С. Котов[✉], И. М. Нестерович,
В. В. Рубо, Д. В. Волохович

УП «Геоинформационные системы»,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
[✉]E-mail: dkotau@gis.by

Аннотация

Цели. Решалась задача совершенствования программного комплекса обнаружения тепловых аномалий (ПК ОТА) по данным метеорологических спутников, разработанного в УП «Геоинформационные системы».

Методы. В период с 2015 г. по настоящее время выполнялись работы по практической апробации и совершенствованию ПК ОТА. Для этого использовались спутниковые снимки территории Республики Беларусь, полученные с космических аппаратов серии NOAA. Особое внимание уделялось проблеме повышения точности определения координат пожаров и сокращения времени, необходимого для обработки исходных данных.

Результаты. Сделан ретроспективный анализ основных этапов совершенствования ПК ОТА и обобщены результаты, полученные в ходе практических испытаний. Описан веб-сервис, разработанный на основе ПК ОТА.

Заключение. Приведенные в статье сведения могут быть полезны для специалистов и исследователей, которые занимаются вопросами обнаружения тепловых аномалий (пожаров) с использованием данных дистанционного зондирования Земли, полученных с метеорологических спутников.

Ключевые слова: тепловая аномалия, метеорологический космический аппарат, оперативное обнаружение пожаров, анализ пожароопасной ситуации, автоматизированная тематическая обработка, температурная яркость, техногенные источники тепла, обновление данных о пожарах

Для цитирования. Опыт совершенствования программных комплексов дистанционного зондирования Земли для обнаружения тепловых аномалий / С. А. Золотой [и др.] // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 69–78. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-69-78>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 12.08.2021

Подписана в печать | Accepted 13.09.2021

Опубликована | Published 26.12.2021

Updating the Earth remote sensing software for the detection of thermal anomalies

Sergey A. Zolotoy, Igor B. Strashko, Dzmitry S. Kotau[✉], Iryna M. Nestsiarovich, Vitali V. Rouba, Dzianis V. Valakhovich

UE "Geoinformation Systems",
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus
[✉]E-mail: dkotau@gis.by

Abstract

Objectives. The task of improving the software package for detecting thermal anomalies based on meteorological satellite data developed by the unitary enterprise "Geoinformation Systems" was solved.

Methods. In the period from 2015 to the present, the work on practical testing and improvement of the software for natural fires detection has been carried out. For this purpose, satellite images of the territory of Belarus obtained from NOAA series spacecraft were used. Special attention was paid to the problem of improving the accuracy of determining the coordinates of fires and reducing the time required for initial data processing.

Results. A retrospective analysis of the main stages of improving the software for natural fires detection and obtained during practical tests generalized results are provided. The description of the web service developed on the basis of the software for detecting natural fires is presented.

Conclusion. The information can be useful for the specialists and researchers who are engaged in the detection of thermal anomalies (fires) using remote sensing data from meteorological satellites.

Keywords: hotspot, meteorological satellite, operational fire detection, fire hazard analysis, automated thematic processing, temperature brightness, man-made heat sources, fire data update

For citation. Zolotoy S. A., Strashko I. B., Kotau D. S., Nestsiarovich I. M., Rouba V. V., Valakhovich D. V. *Updating the Earth remote sensing software for the detection of thermal anomalies*. *Informatika [Informatics]*, 2021, vol. 18, no. 4, pp. 69–78 (In Russ.).

<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-69-78>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Создание технических средств обнаружения природных пожаров в Республике Беларусь имеет длительную историю. Особое место в этой истории занимает развитие программных комплексов обнаружения природных пожаров по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием различных спутников.

В статье обращается внимание на причины возникновения и последствия природных пожаров, приведен ретроспективный анализ совершенствования программных комплексов обнаружения природных пожаров по данным ДЗЗ в Республике Беларусь.

Природный пожар – это любой стихийный или неконтролируемый пожар, который вне зависимости от источника возгорания может потребовать мер по тушению [1]. Основные причины возникновения природных пожаров обусловлены деятельностью человека (~79 %), при этом главным виновником пожаров (~70 %) является само население. От сельхоззапалов, сжигания порубочных остатков, по вине лесозаготовителей, экспедиций, а также транспортных систем возникает ~9,1 % природных пожаров, от природных факторов (молний) – чуть более 13 %. Остальная часть пожаров возникает по невыясненным причинам [2].

Следствиями пожаров являются снижение качественного и породного состава лесного фонда, экологических функций лесов; трансформация территорий, покрытых лесом, а также частичная или полная гибель насаждений. При поджоге травы погибает вся полезная микрофлора почвы, многие насекомые и мелкие животные, истребляющие различных вредителей и участвующие в процессе образования почвы; уничтожаются кладки и места гнездований птиц, а также происходит значительный выброс углекислого газа в атмосферу. После палов почва закисляется и снижается ее плодородие, а выживают и первыми отрастают неприхотливые сорняки [3]. Суммарный ущерб от лесных пожаров охватывает многие показатели [4] и включает:

- стоимость потерь древесины на корню в средневозрастных, припевающих, спелых и перестойных насаждениях;
- ущерб от повреждения молодняков естественного и искусственного происхождения;
- ущерб от повреждения ресурсов побочного лесопользования;
- снижение стоимости объектов и готовой продукции, поврежденных пожаром;
- расходы на расчистку горельников и дополнительные санитарные рубки в насаждениях, поврежденных лесными пожарами;
- ущерб от снижения почвозащитных, санитарно-гигиенических, водоохраных и других средообразующих функций леса;
- ущерб от загрязнения воздушной среды продуктами горения;
- ущерб от гибели животных и растений, включая занесенных в Красную книгу Республики Беларусь, и другие потери.

Создание программного комплекса обнаружения тепловых аномалий, ориентированного на спутники серии NOAA. Первые эксперименты по использованию данных ДЗЗ для обнаружения пожаров, полученных со спутников низкого разрешения, были проведены в сентябре 1998 г. Тогда в республике действовали две станции ДЗЗ в Научно-инженерном республиканском предприятии «Геоинформационные системы» НАН Беларуси. Результаты экспериментов показали принципиальную возможность обнаружения природных пожаров с помощью информации, поступающей со спутников серии NOAA на станцию дистанционного зондирования и обрабатываемой аппаратно-программным комплексом, разработанным в УП «Геоинформационные системы» НАН Беларуси. Тем не менее целесообразность использования космического мониторинга за пожарами в лесах Республики Беларусь на момент начала исследования ставилась под сомнение.

В 1999 г. силами УП «Геоинформационные системы», Научно-исследовательского института пожарной безопасности Главного управления военизированной пожарной службы Министерства внутренних дел Республики Беларусь с привлечением ряда областных управлений военизированной пожарной службы в два этапа проводилось апробирование метода ДЗЗ для обнаружения природных пожаров на территории Республики Беларусь. На первом этапе в период с 3 мая по 22 июня 1999 г. данные о природных пожарах от соответствующих наземных служб на территории Брестской области сравнивались с результатами дистанционного зондирования с помощью спутников серии NOAA.

Результаты проведенных исследований показали, что количество пожаров на территории области по данным ДЗЗ низкого разрешения, не подтвержденных наземными службами, превышает количество подтвержденных пожаров. Это позволило сделать вывод, что для дистанционного зондирования, как и для других технических средств обнаружения природных пожаров, существует проблема ложного срабатывания.

На втором этапе в период с 29 июля по 30 августа 1999 г. результаты о наиболее крупных пожарах по данным дистанционного зондирования с помощью спутников серии NOAA сравнивались с данными Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (МЧС). Результаты экспериментов по обнаружению природных пожаров на территории республики с помощью станции ДЗЗ УП «Геоинформационные системы» показали, что минимальная обнаруживаемая площадь возгорания составляет 0,01 га. Это соответствовало данным, полученным учеными других стран. В то же время точность обнаружения природных пожаров с помощью программного обеспечения УП «Геоинформационные системы» в проведенных экспериментах была на один-два порядка хуже, чем в экспериментах ученых других стран. Такая точность определения природных пожаров не устраивала МЧС. Была поставлена задача повышения точности определения природных пожаров путем усовершенствования программного обеспечения и снижения числа ложных сообщений.

Задача повышения точности определения координат пожаров решалась в рамках выполнения задания «Разработать программное обеспечение повышения точности определения координат и достоверности обнаружения пожаров для автоматизированной системы космического мониторинга пожароопасных ситуаций на территории Республики Беларусь» государственной научно-технической программы «Чрезвычайные ситуации».

Параллельно с повышением точности определения координат пожаров решалась задача сокращения времени обработки данных, полученных с помощью ДЗЗ низкого разрешения, и нанесения оперативной информации на карту. Все это делалось для достижения главной цели – повышения оперативности обнаружения пожаров, а также для получения независимой информации о числе природных пожаров.

В ходе исследования материалы дистанционной съемки были получены со спутников NOAA-12, NOAA-14 и NOAA-15. Среднее время обработки материалов дистанционной съемки и определения координат пожаров на всей территории Республики Беларусь на этом этапе составляло 40 мин.

Результаты экспериментов, проведенных с 10 апреля по 3 августа 2000 г. на территории Минской области, показали, что минимальная площадь обнаружения природных пожаров при благоприятных условиях космической съемки со спутников типа NOAA составляет 0,01 га. Определение таких небольших по площади природных пожаров возможно при соблюдении целого ряда условий: угла пролета спутника над территорией, температуры в очаге пожара, четкого выделения сигнала на фоне шумов при наименьшей вероятности ложных сообщений о температурных аномалиях.

На основе экспериментальных данных было определено, что при использовании космической съемки территории Республики Беларусь, полученной с космических аппаратов низкого разрешения (типа NOAA), оптимальная наименьшая площадь обнаружения природных пожаров составляет 0,09 га, а максимальное отклонение при расчете координат пожара – более 2 мин (или более 4 км).

В 2001 г. эксперименты по выявлению пожаров с использованием данных ДЗЗ спутников серии NOAA проводились с 17 мая по 4 июня на территории Рогачевского, Жлобинского и Гомельского районов Гомельской области. Они показали, что очаги природных пожаров площадью менее 0,03 га не фиксируются. Были замечены очаги пожаров, информация о которых у наземных служб отсутствовала; тепловые аномалии, не связанные с пожарами, и пожар телятника размером 10×50 м. При этом максимальное отклонение координат тепловых аномалий и природных пожаров составило 592 м.

С 20 по 22 ноября 2002 г. проверка осуществлялась в Гомельской, Минской и Могилевской областях. На основе статистической обработки результатов сравнения данных о температурных аномалиях, полученных в результате обработки космических снимков, и натурных проверок были сделаны выводы, что вероятность обнаружения природного пожара составляет 0,73, обнаружения природного пожара – 0,07, вероятность ложного срабатывания – 0,17, вероятность ошибки оператора – 0,03.

Точность определения координат (среднеквадратическое отклонение) по широте составило 0,39 мин (или 727 м), по долготе – 0,55 мин (или 632 м), максимальное отклонение в определении координат пожаров по широте – 3° (5550 м), по долготе – 3° (3390 м).

Достоверность обнаружения природных пожаров по данным ДЗЗ со спутников типа NOAA с 11 по 13 сентября 2002 г. в Минской области составила 0,44; с 20 по 22 ноября 2002 г. в Гомельской, Минской и Могилевской областях – 0,735; с 26 по 28 июня 2003 г. в Брестской области – 0,333 и с 25 по 27 августа 2003 г. в Гродненской области – 0,45. Среднее значение достоверности обнаружения природных пожаров за весь период натурных проверок в 2002–2003 гг. составило 48,9 %.

Испытания ПК ОТА, ориентированного на спутники серии NOAA, проводились и в 2004–2005 гг. По результатам испытаний в 2005–2006 гг. была выполнена доработка аппаратно-программного комплекса, и в 2007 г. продолжена его апробация. В итоге вероятность обнаружения природных пожаров составила 66,7 %. Результаты проведенной апробации работоспособности доработанного автоматизированного аппаратно-программного комплекса дистанционного обнаружения природных пожаров по данным спутников серии NOAA показали, что минимальная обнаруживаемая площадь очага природного пожара составляет 0,01 га. На основе статистической обработки результатов сравнения данных о температурных аномалиях, полученных при обработке космических снимков, и результатов натурных проверок установлено, что вероятность обнаружения природных пожаров – 0,4–0,8, вероятность ложной тревоги – 0,05–0,2, вероятность необнаружения природного пожара – 0,05–0,15. При ориентации на вы-

явление мелких природных пожаров растет число температурных аномалий, не являющихся природными пожарами. Максимальная вероятность обнаружения природных пожаров достигается при настройке автоматизированной системы дистанционного обнаружения природных пожаров по данным ДЗЗ низкого разрешения с использованием данных от наземных служб. Таким образом, максимальной эффективности функционирования автоматизированной системы дистанционного обнаружения природных пожаров по данным из космоса можно достичь в составе комплексной системы обнаружения природных пожаров, учитывающей данные авиационного и наземного мониторинга.

Совершенствование программного комплекса обнаружения тепловых аномалий во взаимодействии с программным комплексом распространения оперативной космической информации. Опытно-конструкторская работа «Создание распределенной системы приема, обработки и распространения оперативной космической информации с космических аппаратов (AQUA, SUOMI NPP, NOAA 20, MetOp, Feng-Yun 3D)» выполнена в рамках государственной программы «Научные технологии и техника» на 2016–2020 гг. Результатом этой работы стало создание программного комплекса распространения оперативной космической информации и ПК ОТА.

Упрощенная схема информационного взаимодействия ПК ОТА с пользователями и другими компонентами распределенной системы приема, обработки и распространения оперативной космической информации показана на рис. 1.

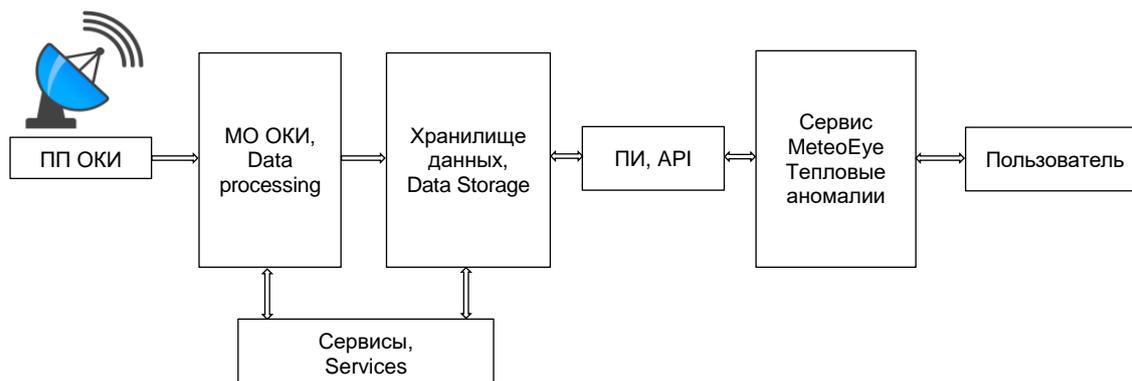


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов программного комплекса обнаружения тепловых аномалий

Fig. 1. Simplified scheme of interaction of software package for detecting thermal anomalies components

ПК ОТА и подсистема приема оперативной космической информации (ПП ОКИ) являются частью распределенной системы приема, обработки и распространения оперативной космической информации. В состав ПК ОТА входят следующие компоненты:

Модуль обработки оперативной космической информации (МО ОКИ, Data processing), предназначенный для автоматизации процессов первичной обработки принятой оперативной космической информации с целью формирования информационных ресурсов, соответствующих различным требованиям.

Программные средства МО ОКИ обеспечивают:

- контроль поступления данных от ПП ОКИ;
- сбор вспомогательных данных для обработки (начальные баллистические условия, калибровочные коэффициенты, прогностическая информация и др.);
- обработку получаемых данных и формирование базовых информационных ресурсов, реализующих информационную совместимость с составными частями модуля;
- формирование описательных данных, обзорных изображений к базовым информационным ресурсам, доступным пользователю через приложение просмотра и поиска оперативной космической информации;
- формирование информационных ресурсов для работы ПК ОТА.

Информационные ресурсы, получаемые с помощью МО ОКИ, совместимы с программными пакетами обработки метеорологических данных Direct Readout Laboratory (URL: <https://directreadout.sci.gsfc.nasa.gov/>), Community Satellite Processing Package (URL: <https://cimss.ssec.wisc.edu/cspp/>) и AAPP (URL: <https://www.nwpsaf.eu/site/software/aapp/>).

Сервисы для поддержки работы системы (Сервисы, Services), обеспечивающие движение оперативной космической информации по компонентам системы, управление временем жизни базовых информационных ресурсов, организацию информационных рассылок посредством протокола SMTP и ведение журнала основных операций.

Программный интерфейс (ПИ, API) для обеспечения взаимодействия с внешними программными комплексами, реализованный на основе технологии Representational State Transfer (REST). Формат структур входных и выходных данных – XML или JSON. Описание используемых методов можно посмотреть на сайте <https://meteoeye.gis.by/api/index.html>.

Сервис MeteoEye Тепловые аномалии (MeteoEye Hotspots) – веб-приложение для визуализации результатов ПК ОТА (URL: <https://meteoeye.gis.by/hotspots/>). Сервис предоставляет данные без аутентификации, имеет интерфейс на русском и английском языках, а адаптивная верстка позволяет использовать его как на персональных компьютерах (рис. 2, а), так и на мобильных устройствах (рис. 2, б). В качестве геоинформационной основы можно выбрать слой с картографическими или спутниковыми данными открытого использования.

На стартовой странице сервиса MeteoEye Hotspots отображается информация о выявленных тепловых аномалиях за текущие сутки. С помощью встроенного календаря можно просмотреть пожарную ситуацию за две недели.

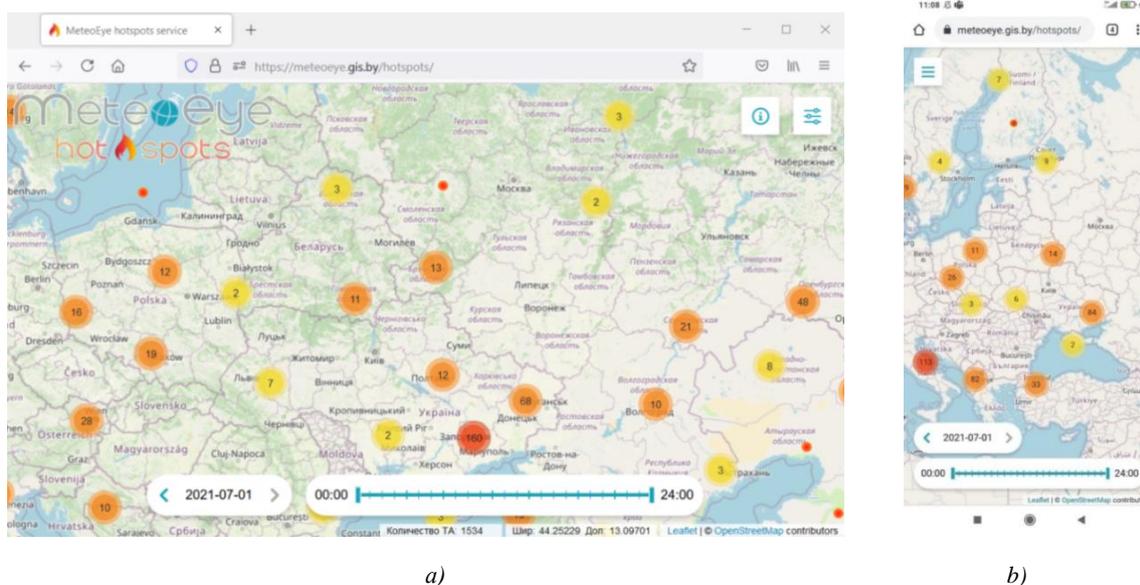


Рис. 2. Версия сервиса MeteoEye Hotspots для персональных компьютеров (а) и мобильных устройств (б)

Fig. 2. MeteoEye Hotspots service personal computers version (a) and mobile version (b)

Для более удобного восприятия общей обстановки на удаленных масштабах используется система группирования, когда соседние тепловые аномалии объединяются в кластеры, которые окрашиваются в зависимости от количества входящих в них объектов. При нажатии на кластер осуществляется приближение масштаба и он «распадается» на отдельные тепловые аномалии. При нажатии на конкретную тепловую аномалию появляется окно с информацией о ее характеристиках (рис. 3).

Основным преимуществом сервиса MeteoEye Hotspots является автоматическое обновление информации о тепловых аномалиях после пролета спутника на текущую дату в зависимости от установленного временного фильтра. Главная цель MeteoEye Hotspots – это оперативное предо-

ставление результатов выявления тепловых аномалий (пожаров) всем заинтересованным потребителям: как специалистам, например, подразделений МЧС, так и обычным интернет-пользователям.

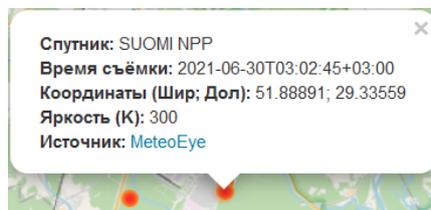


Рис. 3. Характеристики тепловой аномалии

Fig. 3. Characteristics of hotspots

Технология обнаружения тепловых аномалий основана на автоматизированной тематической обработке снимков, полученных с метеорологических космических аппаратов AQUA, TERRA, Suomi NPP, Feng-Yun 3D, а также спутников серии MetOp и NOAA. За сутки в среднем происходит прием и обработка около 15–20 сеансов съемки. Территориальный охват определяется зоной радиовидимости приемной антенны, расположенной в Минске, и включает большую часть европейской территории.

Значительное влияние на качество съемки оказывает облачная обстановка, т. е. в условиях сплошной облачности обнаружение тепловых аномалий невозможно либо малоэффективно. Необходимо отметить, что пространственное разрешение съемочной аппаратуры метеоспутников довольно низкое – в среднем около 1 км (наиболее высокое разрешение – 375 м – имеет сенсор VIIRS, установленный на Suomi NPP). Эти важные характеристики необходимо учитывать при оценке возможностей сервиса по обнаружению мелких пожаров и точности их привязки.

В процессе автоматизированной обработки применяется контекстно-пороговый анализ температурных яркостей соседних пикселей земной поверхности в инфракрасном диапазоне, который позволяет выявлять участки с высокой температурой, а данные с других спектральных каналов помогают маскировать облачные участки и фильтровать ложные срабатывания, например блики или отсветы. Результаты обработки в виде конечного продукта доступны пользователю не позднее чем через 30 мин после окончания сеанса приема. Конечно, для получения более точного и полного результата необходимо использовать инструменты верификации, основанные на дополнительных источниках: информации от местного населения, изображениях с видеокамер, обработке данных со спутников высокого разрешения и др.

Примеры получения оперативных сведений о пожарах. В качестве примеров приведем сведения о пожарах на территории Турции 29.07.2021 г.¹ (рис. 4), на территории Греции 06.08.2021 г.² (рис. 5) и торфяном пожаре в Петриковском районе Гомельской области Беларуси 29.07.2021 г.³ (рис. 6).

Главным потребителем информации ПК ОТА, полученной при обработке космических снимков, является МЧС Республики Беларусь. По данным метеорологических спутников ведется регулярный мониторинг состояния объектов земной поверхности Беларуси на предмет обнаружения тепловых аномалий – индикаторов возникновения пожаров [5]. В зависимости от решаемой задачи в МЧС Республики Беларусь передается либо информация о выявленных тепловых аномалиях, либо космические снимки земной поверхности. Использование данных

¹Лесные пожары в Турции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ria.ru/20210729/pozhar-1743510730.html>. – Дата доступа: 07.07.2021.

²Лесные пожары в Греции: эвакуированы пригороды Афин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bbc.com/russian/news-58108883>. – Дата доступа: 07.07.2021.

³Более 130 человек тушат торфяной пожар в Петриковском районе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belta.by/incident/view/bolee-130-chelovek-tushat-torfjanoy-pozhar-v-petrikovskom-rajone-452419-2021/>. – Дата доступа: 07.07.2021.

космической съемки позволяет обеспечить регулярный мониторинг земной поверхности, в том числе и в труднодоступных районах [5]. Сведения о тепловых аномалиях доступны органам и подразделениям по чрезвычайным ситуациям в режиме реального времени после обработки снимков Национальным оператором Белорусской космической системы ДЗЗ – УП «Геоинформационные системы». Среднее время получения подразделениями МЧС информации о температурной аномалии не превышает 15 мин с момента завершения приема данных со спутника ДЗЗ.

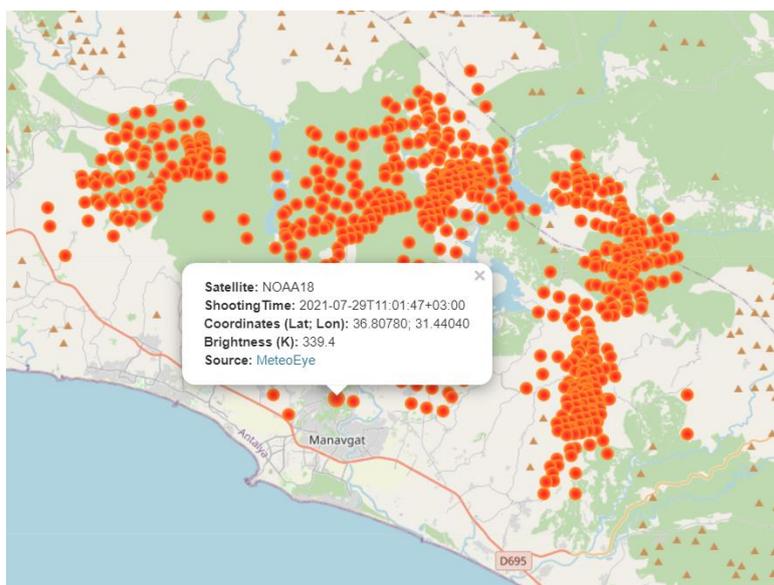


Рис. 4. Сведения о пожарах на территории Турции
Fig. 4. Information about a fire in the territory of Turkey

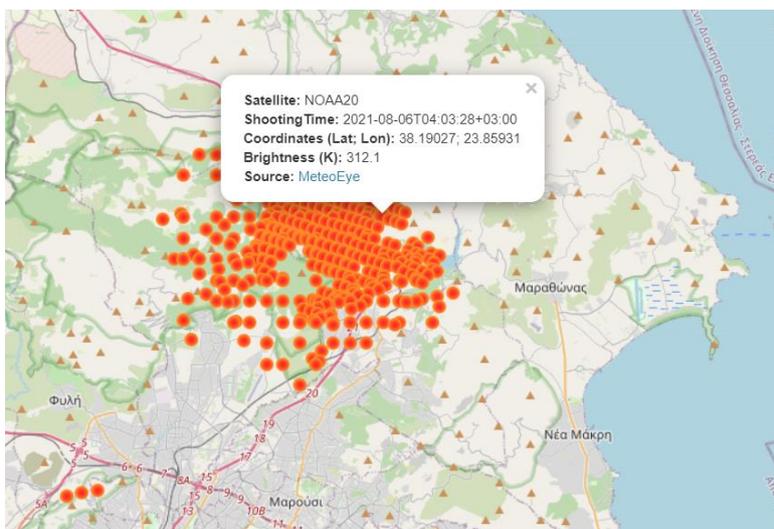


Рис. 5. Сведения о пожарах на территории Греции
Fig. 5. Information about a fire in the territory of Greece

С помощью данных космической съемки были выявлены природные пожары на ранней стадии развития в экосистемах на территории Республики Беларусь и трансграничные природные пожары в экосистемах на территориях России и Украины вблизи границы с Республикой Беларусь.

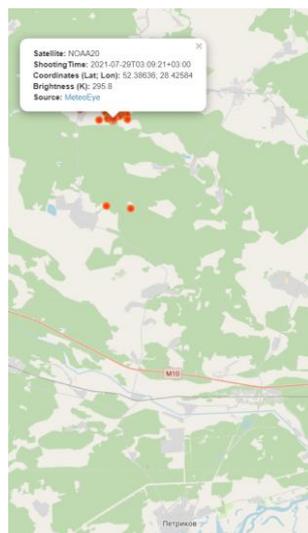


Рис. 6. Сведения о пожаре на территории Беларуси
Fig. 6. Information about a fire in the territory of Belarus

Заключение. В работе проведен ретроспективный анализ основных этапов совершенствования ПК ОТА по данным ДЗЗ в Республике Беларусь и обобщены результаты, полученные во время практических испытаний. Описан веб-сервис, разработанный в ходе опытно-конструкторской работы «Создание распределенной системы приема, обработки и распространения оперативной космической информации с космических аппаратов (AQUA, SUOMI NPP, NOAA 20, MetOp, Feng-Yun 3D)» в рамках государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2016–2020 гг.

Веб-сервис MeteoEye Hotspots уже сегодня применяется для решения научных и прикладных задач в различных областях знаний и позволяет:

- оперативно получать сведения об обнаруженных с помощью космических данных тепловых аномалиях (пожарах) на большей части европейской территории;
- осуществлять общий мониторинг пожароопасной ситуации и своевременно реагировать на возникновение чрезвычайных ситуаций, связанных с крупными возгораниями;
- на основе пространственного анализа делать предположения о характере тепловой аномалии (лесной пожар, пожар на торфянике, техногенный тепловой источник и т. д.);
- оценивать угрозу ближайшим населенным пунктам, объектам инфраструктуры, ценным природным территориям;
- следить за динамикой распространения пожаров и давать прогнозы развития ситуации на основании внешних метеорологических данных.

Вклад авторов. С. А. Золотой – обоснование концепции и актуальности статьи; И. Б. Страшко – консультирование по вопросам создания программного комплекса распространения оперативной космической информации; Д. С. Котов – обзор и аналитический анализ статьи, формулирование выводов; И. М. Нестерович – сбор, анализ и обобщение данных; В. В. Рубо – сбор и систематизация данных; Д. В. Волохович – сбор и систематизация данных, интерпретация результатов применения данных.

Список использованных источников

1. Моргера, Э. Лесные пожары и законодательство / Э. Моргера, М. Т. Чирелли ; Прод. и сельскохоз. организация Объед. Наций. – Рим, 2012. – 181 с.
2. Бондур, В. Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары / В. Г. Бондур // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 3. – С. 3–13.
3. Строк, К. М. Лесные пожары: причины возникновения и меры противопожарной безопасности / К. М. Строк, Т. М. Германович // Проблемы экологии и экологической безопасности. Создание новых

полимерных материалов : сб. материалов VII Междунар. заоч. науч.-практ. конф. – Минск : УГЗ МЧС РБ, 2020. – С. 339–342.

4. Методика исчисления ущерба от низовых пожаров разной интенсивности / Г. Я. Климчик [и др.] // Природные ресурсы Национального парка «Припятский» и других особо охраняемых природных территорий Беларуси: изучение, сохранение, устойчивое использование : сб. науч. тр. / Нац. парк «Припятский». – Минск, 2020. – С. 415–418.

5. Абламейко, С. В. Белорусская космическая система дистанционного зондирования: состояние и перспективы развития / С. В. Абламейко, С. А. Золотой // Материалы Междунар. науч. конф. «Современные проблемы математики, информатики и управления», Алматы, 2–3 окт. 2008 г. – Алматы, 2008. – С. 89–93.

References

1. Morgera E., Cirelli M. T. *Forest Fires and the Law: a Guide for National Drafters Based on the Fire Management Voluntary Guidelines*. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, 2009, 175 p.

2. Bondur V. G *Space monitoring of natural fires in Russia in conditions of abnormal heat*. Issledovanie Zemli iz kosmosa [*Exploration of the Earth from Space*], 2011, no. 3, pp. 3–13 (In Russ.).

3. Strok K. M., Germanovich T. M. *Forest fires: causes and measures of fire safety*. Problemy jekologii i jekologicheskoy bezopasnosti. Sozdanie novyh polimernyh materialov : sbornik materialov VII Mezhdunarodnoj zaочноj nauchno-prakticheskoy konferencii [*Problems of Ecology and Ecological Safety. Creation of New Polymeric Materials: Collection of Articles. Materials of the VII International Correspondence Scientific Conference*], Minsk, Universitet grazhdanskoj zashhity Ministerstva po chrezvychajnym situacijam Respubliki Belarus', 2020, pp. 339–342 (In Russ.).

4. Klimchik G. Ya., Rihter I. Je., Bahur O. V., Shalima P. V. *Methodology for calculating damage from ground fires of varying intensity*. Prirodnye resursy Nacional'nogo parka «Pripjatskij» i drugih osobo ohranjaemyh prirodnyh territorij Belarusi: izuchenie, sohranenie, ustojchivoe ispol'zovanie : sbornik nauchnyh trudov. Nacional'nyj park «Pripjatskij» [*Natural Resources of the National Park "Pripyatsky" and Other Specially Protected Natural Areas of Belarus: Study, Conservation, Sustainable Use: Collection of Scientific Papers. The National Park "Pripyatsky"*], Minsk, 2020, pp. 415–418 (In Russ.).

5. Ablamejko S. V., Zolotoy S. A. *Belarusian space remote sensing system: state and development prospects*. Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sovremennye problemy matematiki, informatiki i upravlenija», Almaty, 2–3 oktjabrja 2008 g. [*Proceedings of the International Scientific Conference "Modern Problems of Mathematics, Informatics and Management", Almaty, 2–3 October 2008*], Almaty, 2008, pp. 89–93 (In Russ.).

Информация об авторах

Золотой Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, директор, УП «Геоинформационные системы». E-mail: gis@gis.by

Страшко Игорь Болеславович, заместитель директора по производству, УП «Геоинформационные системы». E-mail: IStrashko@gis.by

Котов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, ученый секретарь, УП «Геоинформационные системы». E-mail: dkotau@gis.by

Нестерович Ирина Максимовна, младший научный сотрудник отдела инновационных технологий, УП «Геоинформационные системы». E-mail: nesterovichirina20@gmail.com

Роубо Виталий Вильгельмович, начальник отдела инновационных технологий, УП «Геоинформационные системы». E-mail: vroubo@gis.by

Волохович Денис Валерьевич, ведущий инженер отдела обработки данных ДЗЗ, УП «Геоинформационные системы». E-mail: dvolohovich@gis.by

Information about the authors

Sergey A. Zolotoy, Cand. Sci. (Eng.), Director, UE "Geoinformation Systems". E-mail: gis@gis.by

Igor B. Strashko, Deputy Director for Production Affairs, UE "Geoinformation Systems". E-mail: IStrashko@gis.by

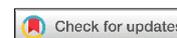
Dzmitry S. Kotau, Cand. Sci. (Eng.), Scientific Secretary, UE "Geoinformation Systems". E-mail: dkotau@gis.by

Iryna M. Nestsiarovich, Junior Research Scientist of the Department of Innovative Technologies, UE "Geoinformation Systems". E-mail: nesterovichirina20@gmail.com

Vitali V. Rouba, Head of the Department of Innovative Technologies, UE "Geoinformation Systems". E-mail: vroubo@gis.by

Dzianis V. Valakhovich, Leading Engineer of the Department of Remote Sensing Data Processing Department, UE "Geoinformation Systems". E-mail: dvolohovich@gis.by

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MATHEMATICAL MODELING



УДК 519.8; 621.3:007; 621.3:001.891.57
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-79-95>

Оригинальная статья
Original Paper

Подход к оптимизации зарядной инфраструктуры автономных троллейбусов для городских маршрутов

М. Я. Ковалев, Б. М. Розин[✉], И. А. Шатерник

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
✉E-mail: rozin@newman.bas-net.by*

Аннотация

Цели. При проектировании системы городского электротранспорта, заряжающегося во время движения, в том числе автономных троллейбусов с батареями увеличенной емкости, актуальной является оптимизация зарядной инфраструктуры для парка такого транспорта. Зарядная инфраструктура выделенных маршрутов состоит из секций контактной сети вдоль маршрутов и стационарных зарядных станций заданного типа на конечных остановках маршрутов. Она предназначена для обеспечения движения троллейбусов и восстановления заряда их батарей, израсходованного на участках автономного хода.

Цель исследования заключается в создании моделей и методов выработки экономически эффективных решений по зарядной инфраструктуре, обеспечивающих функционирование парка автономных троллейбусов с учетом ряда специфических условий. Условия включают обеспечение заданного диапазона автономного хода троллейбусов при заданной скорости расхода энергии на маршрутах и гарантийного срока эксплуатации их батарей, а также предотвращение разряда батарей ниже критического уровня при различных режимах эксплуатации в течение срока их службы.

Методы. Используются методы теории множеств, теории графов и линейной аппроксимации.

Результаты. Разработана математическая модель задачи оптимизации зарядной инфраструктуры парка автономных троллейбусов. В качестве целевой функции выбраны суммарные приведенные годовые затраты на зарядную инфраструктуру. Модель сформулирована в виде задачи математического программирования с квадратичной целевой функцией и линейными ограничениями.

Заключение. Для решения сформулированной задачи математического программирования могут использоваться стандартные решатели типа IBM ILOG CPLEX, а также, с учетом ее вычислительной сложности, эвристический метод «роя частиц». Решение задачи заключается в выборе конфигурации расположения секций контактной сети на маршрутах и длительностей зарядки троллейбусов на конечных остановках, определяющих соответствующие количества стационарных зарядных станций на этих остановках.

Ключевые слова: автономный троллейбус, аккумуляторная батарея, контактная сеть, станция зарядки, математическое программирование

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ в рамках проекта № Ф21ЭТ-003.

Для цитирования. Ковалев, М. Я. Подход к оптимизации зарядной инфраструктуры автономных троллейбусов для городских маршрутов / М. Я. Ковалев, Б. М. Розин, И. А. Шатерник // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 79–95. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-79-95>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 01.10.2021
Подписана в печать | Accepted 25.10.2021
Опубликована | Published 29.12.2021

Approach to optimizing charging infrastructure of autonomous trolleybuses for urban routes

Mikhail Ya. Kovalyov, Boris M. Rozin[✉], Ilya A. Shaternik

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus*
[✉]E-mail: rozin@newman.bas-net.by

Abstract

Purposes. When designing a system of urban electric transport that charges while driving, including autonomous trolleybuses with batteries of increased capacity, it is important to optimize the charging infrastructure for a fleet of such vehicles. The charging infrastructure of the dedicated routes consists of overhead wire sections along the routes and stationary charging stations of a given type at the terminal stops of the routes. It is designed to ensure the movement of trolleybuses and restore the charge of their batteries, consumed in the sections of autonomous running.

The aim of the study is to create models and methods for developing cost-effective solutions for charging infrastructure, ensuring the functioning of the autonomous trolleybus fleet, respecting a number of specific conditions. Conditions include ensuring a specified range of autonomous trolleybus running at a given rate of energy consumption on routes, a guaranteed service life of their batteries, as well as preventing the discharge of batteries below a critical level under various operating modes during their service life.

Methods. Methods of set theory, graph theory and linear approximation are used.

Results. A mathematical model has been developed for the optimization problem of the charging infrastructure of the autonomous trolleybus fleet. The total reduced annual costs for the charging infrastructure are selected as the objective function. The model is formulated as a mathematical programming problem with a quadratic objective function and linear constraints.

Conclusion. To solve the formulated problem of mathematical programming, standard solvers such as IBM ILOG CPLEX can be used, as well as, taking into account its computational complexity, the heuristic method of "swarm of particles". The solution to the problem is to select the configuration of the location of the overhead wire sections on the routes and the durations of charging the trolleybuses at the terminal stops, which determine the corresponding number of stationary charging stations at these stops.

Keywords: autonomous trolleybus, battery, overhead wire, charging station, mathematical programming

Acknowledgements. The study was carried out with the financial support of the BRFFR within the framework of the project no. Ф21ЭТ-003.

For citation. Kovalyov M. Ya., Rozin B. M., Shaternik I. A. *Approach to optimizing charging infrastructure of autonomous trolleybuses for urban routes*. Informatika [Informatics], 2021, vol. 18, no. 4, pp. 79–95 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-79-95>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. В последние годы значительное внимание в литературе уделяется различным аспектам планирования зарядной инфраструктуры для подзарядки электротранспорта во время движения [1–8]. В настоящей работе рассматривается задача оптимизации конфигурации зарядной инфраструктуры автономных троллейбусов (АТ), оборудованных аккумуляторными батареями (далее *батарея*) повышенной емкости. Под конфигурацией зарядной инфраструктуры подразумевается размещение секций контактной сети (КС) и стационарных зарядных станций (СЗС) на маршрутах, обслуживаемых парком АТ.

Рассматривается набор R замкнутых круговых маршрутов, вообще говоря, пересекающихся между собой и обслуживаемых парком АТ нескольких типов. АТ выполняют перевозку пассажиров по маршрутам из R согласно заданному расписанию для каждого из маршрутов в различные сезоны года. АТ одного типа оборудуются одинаковыми батареями, позволяющими им проходить в режиме автономного хода значительное расстояние (десятки километров) [4].

В режиме автономного хода АТ заряд его батареи расходуется, поэтому для восстановления потраченной энергии требуется зарядная инфраструктура, состоящая из КС на маршрутах и СЗС на некоторых конечных остановках. КС является источником энергии для двигательной установки АТ и подзарядки частично разряженной батареи. Для этой же цели на конечных остановках маршрутов, где АТ задерживаются на значительное по сравнению с промежуточными остановками время, могут устанавливаться СЗС. Подача электроэнергии для КС осуществляется от тяговых подстанций. С учетом предельно допустимого падения напряжения с увеличением длины проводов КС разбивается на изолированные секции ограниченной длины, каждая из которых подключается к своей тяговой подстанции посредством силовых кабелей.

Парк АТ включает АТ нескольких типов, каждый из которых характеризуется пассажироместимостью, емкостью батареи и диапазоном автономного хода АТ. Каждый маршрут из R обслуживается АТ одного типа. Для различных маршрутов могут использоваться АТ разных типов. Как правило, для АТ одного типа подбираются маршруты с близкими значениями средних затрат энергии на 1 км пути, поскольку наряду с емкостью батареи и мощностью электроэнергии, получаемой от КС, они определяют предельную величину автономного хода АТ.

Для транспортных организаций, имеющих возможность формирования парка АТ с требуемыми характеристиками, важным условием эксплуатации АТ является гарантийный период эксплуатации батареи каждого АТ, совпадающий, как правило, с гарантийным периодом эксплуатации самого АТ. Для обеспечения выполнения этого условия требуется учитывать износ батареи АТ в процессе обслуживания маршрута для различных периодов дня и сезонов года. Основными факторами, влияющими на износ батареи, являются скорость зарядки (разрядки), уровень заряда (УЗ), при котором осуществляется зарядка (разрядка), и температура батареи [9, 10]. Как правило, задается диапазон значений УЗ, при котором скорость износа батареи позволяет использовать ее достаточно продолжительное время. Предполагается, что множество режимов эксплуатации АТ в течение года включает два режима, отличающихся по величине потребляемой электроэнергии каждым типом АТ: режим часов пик и непиковый режим. Величины среднего расхода электроэнергии для каждого типа АТ и каждого режима предполагаются известными, как и средняя скорость движения АТ по маршрутам. Номинальная мощность и другие параметры поставляемой КС и СЗС электроэнергии предполагаются постоянными в течение всего периода эксплуатации.

Требуется выбрать конфигурацию зарядной инфраструктуры минимальной приведенной годовой стоимости, обеспечивающую обслуживание заданным парком АТ городских маршрутов согласно заданным расписаниям в течение запланированного срока эксплуатации.

1. Предположения. Приведем основные предположения, принятые при формировании модели функционирования парка АТ и его зарядной инфраструктуры:

1. Парк АТ включает АТ нескольких типов. Каждый маршрут из заданного набора обслуживают АТ одного типа. Для различных маршрутов могут использоваться АТ разных типов.

2. Каждый маршрут содержит одну или две конечные остановки, называемые базовыми, которые предназначены для подзарядки батарей АТ, обслуживающих маршрут.

3. Для каждого типа АТ задан минимальный требуемый запас их автономного хода.

4. Тип ячеек, составляющих батарею АТ, и ее номинальное напряжение заданы. Емкость батареи для каждого типа АТ определяется исходя из требований технического задания на АТ с учетом расхода энергии на маршрутах, для которых он используется.

5. Для каждого типа АТ, оборудованных батареями расчетной емкости, заданы величины среднего расхода энергии на обслуживаемом маршруте для двух классов режимов функционирования: часы пик (в том числе зимой при полной нагрузке всех электроприборов) и непиковые часы.

6. Дневное расписание прихода (ухода) АТ (интервал между АТ) на каждую конечную остановку для часов пик и для непиковых часов задано для каждого маршрута.

7. Заданы зависимости достижимого числа циклов $ACC_e(DoD)$ (*Attainable Cycle Count*) от глубины разряда DoD (*Depth of Discharge*) батареи АТ типа e ее зарядки (разрядки) за период эксплуатации.

8. Период эксплуатации батареи любого АТ до исчерпания ее ресурса должен быть не менее заданного гарантийного срока.

9. Задан вариант СЗС для установки во всех базовых узлах сети маршрутов.

10. Заданы варианты используемых тяговых подстанций и их размещение для питания секций КС системы маршрутов.

11. Заданы максимальное и минимальное значения длины секции КС.

12. Мощность электроэнергии, получаемой АТ от КС, предполагается неизменной (не зависящей от времени).

13. Каждый АТ, обслуживающий назначенный ему маршрут, использует для подзарядки все секции КС на маршруте и стационарные зарядные станции в базовых узлах этого маршрута. Базовый узел для одного маршрута может не быть таковым для другого маршрута, проходящего через этот узел.

14. При обслуживании маршрута его зарядная инфраструктура (КС и СЗС) должна обеспечивать невыход УЗ батареи АТ за границы заданного диапазона. При завершении дневного цикла обслуживания АТ направляется в депо, связанное посредством КС с любой конечной остановкой каждого маршрута. В депо батарея АТ заряжается до верхней границы допустимого диапазона до его выхода на маршрут на следующий день.

15. В допустимом диапазоне изменения УЗ батареи АТ возрастает линейно в зависимости от времени зарядки при постоянной мощности зарядки.

Заметим, что с учетом предположений 5 и 12 зависимость УЗ от пройденного АТ по маршруту расстояния является линейно убывающей при движении в автономном режиме и неубывающей кусочно-линейной при движении в режиме подключения к КС функцией. При этом для непользованной батареи функция возрастает и постоянна для полностью заряженной батареи. Таким образом, на каждом цикле обслуживания маршрута график зависимости функции УЗ от времени представляет собой непрерывную кусочно-линейную ломаную (рис. 1).

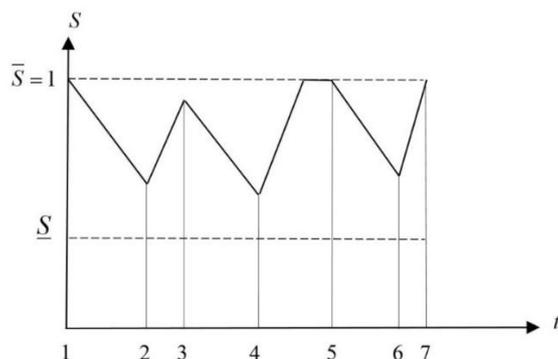


Рис. 1. Пример ломаной линии уровня заряда АТ (интервалы [2, 3], [4, 5] и [6, 7] соответствуют зарядке)

Fig. 1. An example of a polygonal line of the АТ charge level (intervals [2, 3], [4, 5] and [6, 7] correspond to charging)

Для каждого АТ предусмотрены два режима функционирования в движении: с подключением к КС и автономный ход (без подключения к КС). При движении с подключением к КС энергия, получаемая от КС, расходуется на привод двигателя и на подзарядку батареи (если она заряжена не полностью). При движении в автономном режиме привод АТ и его вспомогательные функции обеспечиваются за счет накопленной в батарее энергии. Батарея АТ также может подзарядиться на одной из доступных идентичных СЗС в состоянии покоя на конечных остановках обслуживаемого маршрута.

Секции КС могут размещаться на участках системы маршрутов с учетом ограничений на длину каждой секции и предельного числа секций, обеспеченных мощностью соответствующей тяговой подстанции. Размещение секций КС на маршруте и СЗС на конечных остановках, рас-

писание и скорость движения АТ определяют траекторию изменения УЗ батареи и влияют на ее износ на каждом цикле обслуживания маршрута соответствующего типа. При износе батареи снижается ее доступная емкость, при снижении емкости на 20 % ресурс батареи считается исчерпанным и она подлежит списанию.

В ряде работ стоимость износа батарей парка электротранспортных средств учитывалась при оптимизации функционирования парка и его зарядной инфраструктуры [10–13]. В некоторых работах (например, [13]) стоимость износа батарей парка АТ включается в целевую функцию наряду с инвестиционными и операционными затратами на зарядную инфраструктуру. При этом допускается полный износ батарей ранее гарантийного срока службы АТ, что влечет необходимость замены изношенных батарей до истечения гарантийного срока эксплуатации АТ и, соответственно, увеличение доли затрат на батареи в целевой функции. Предлагаемый в настоящей работе подход к выбору варианта зарядной инфраструктуры отличается тем, что замена батареи до истечения гарантийного срока ее эксплуатации не предусматривается. Это накладывает ограничение на выбор зарядной инфраструктуры. Данный подход применяется некоторыми городскими транспортными организациями, например ГП «Минсктранс», совместно с производителями электротранспорта, в частности ОАО Белкоммунмаш (Минск), для оптимизации парка АТ и городской зарядной инфраструктуры.

При фиксированной конфигурации зарядной инфраструктуры маршрута, заданного расписания движения АТ в течение года, среднего годового пробега, соотношения пиковых и непиковых циклов для дней различных категорий и гарантийного срока эксплуатации батареи может быть определен общий износ батареи в виде числа потраченных циклов зарядки (разрядки). Для допустимой зарядной инфраструктуры этот износ не должен превышать заданного предельного достижимого числа циклов зарядки (разрядки).

Далее будет показано, что износ батареи АТ на любом отрезке траектории ее УЗ может быть определен на основе функции плотности износа батареи как числа потерянных циклов зарядки (разрядки) при пропускании через батарею 1 кВт·ч электроэнергии в зависимости от значения УЗ, скорости зарядки (разрядки) и температуры окружающей среды. Функция плотности износа батареи однозначно определяется по предоставляемой производителем батарей табличной зависимости $ACC_e(DoD)$ достижимого числа циклов ее зарядки (разрядки) от глубины разряда за период эксплуатации (далее *достижимое число циклов*). Температура обычно предполагается равной 25 °С (при низкой температуре окружающей среды температура батареи поддерживается за счет обогрева), скорости зарядки (разрядки) батареи АТ предполагаются соответствующими заданной табличной зависимости $ACC_e(DoD)$.

2. Постановка задачи

2.1. Транспортная сеть. Транспортная сеть маршрутов $r \in R$ представляется взвешенным ориентированным графом $G = (N, U)$, где N – множество узлов (вершин), U – множество ориентированных звеньев (дуг). Дуги $(\alpha, \beta) \in U$, где $\alpha, \beta \in N$ соединяют предшествующий α и последующий β узлы одного либо нескольких маршрутов $r \in R$. Пример ориентированного графа G для трех городских маршрутов показан на рис. 2. Узлы $N01$, $N02$ и $N09$ являются базовыми для множеств маршрутов $\{21, 45\}$, $\{52\}$ и $\{52\}$ соответственно. Остальные узлы представляют точки слияния (разветвления) маршрутов. Каждой дуге ориентированного графа приписано расстояние (в метрах) между инцидентными узлами и множество проходящих по ней маршрутов.

Множество N включает базовые узлы, соответствующие конечным остановкам маршрутов и предназначенные для зарядки АТ, и точки соединения (разветвления) нескольких маршрутов, проходящих по общим для них звеньям транспортной сети. Подмножество узлов, принадлежащих маршруту $r \in R$, обозначается $N_r \subset N$.

Для каждого маршрута $r \in R$ заданы тип $e(r)$ обслуживающих его АТ и множество $NB_r \subset N_r$ базовых узлов, в которых размещаются СЗС для подзарядки АТ, обслуживающих соответствующий маршрут. Любому маршруту $r \in R$ сопоставляется последовательность $TR_r = (\alpha_{r1}, \alpha_{r2}, \dots, \alpha_{rk_r}, \alpha_{rk_{r+1}})$ соседних узлов маршрута r : $\alpha_{rl} \in N_r$, $l = 1, \dots, k_r$, где $\alpha_{rk_{r+1}} = \alpha_{r1} \in NB_r$. Обозначим $RM_v = \{r \in R \mid v \in NB_r\}$

множество маршрутов, АТ которых используют для подзарядки базовый узел v , и $NB = \bigcup_{r \in R} NB_r$ – множество всех базовых узлов транспортной системы. Каждому звену $(\alpha, \beta) \in U$ сопоставляется его длина $l(\alpha, \beta)$ и набор $\{r_{\alpha 1}, \dots, r_{\alpha m_\alpha}\}$ маршрутов $r_{\alpha i} \in R$, проходящих по этому звену в направлении его ориентации, $i = 1, \dots, m_\alpha$.

Каждому базовому узлу $v \in NB$ сопоставляется набор $\{r_{v1}, \dots, r_{v\rho_v}\}$ маршрутов $r_{vi} \in R$, использующих v в качестве базового (для зарядки АТ), $i = 1, \dots, \rho_v$.

Обозначим $U_r = \{(\alpha_{ri}, \alpha_{r,i+1}) \mid i = 1, \dots, k_r\}$ множество звеньев маршрута $r \in R$, $U_r \subset U$.

Каждый маршрут $r \in R$ обслуживают АТ одного заданного типа $e = e(r)$, где $e \in TT$ – множество типов АТ.

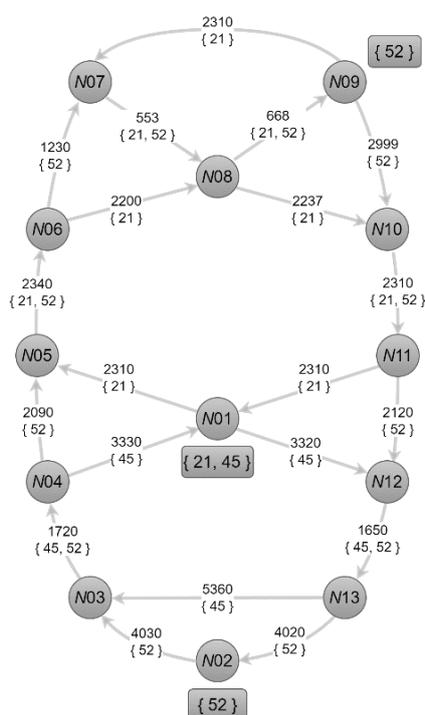


Рис. 2. Пример ориентированного графа системы трех маршрутов: 21, 45 и 52
Fig. 2. An example of a directed graph of a system of three routes: 21, 45 and 52

2.2. Автономные троллейбусы и их характеристики. АТ типа $e(r)$, обслуживающий маршрут $r \in R$, характеризуется:

– количествами $\theta_{rpk}, \theta_{rok}$ выполняемых пиковых и непиковых циклов обслуживания маршрута в течение дня категории k , $k = 1, \dots, \bar{k}$, где \bar{k} – количество различных категорий (такими категориями могут быть, например, рабочие и выходные дни, значительно различающиеся как по напряженности расписания, так и по среднему удельному расходу заряда);

– количеством ΘY_k дней в году категории k , $k = 1, \dots, \bar{k}$;
– средней скоростью V_r движения по маршруту;
– интервалом η_r времени в часы пик между соседними АТ;
– максимальным удельным (на 1 км) расходом sl_r^p заряда (энергии) на маршруте для часов пик (кВт·ч/км);

– удельным (на 1 км) расходом sl_r^o заряда (энергии) на маршруте для непиковых часов (кВт·ч/км), $sl_r^o < sl_r^p$;

- диапазоном $[\underline{S}, \bar{S}]$ допустимых относительных значений УЗ S , $0 < \underline{S} \leq S \leq \bar{S} \leq 1$;
- расчетной длиной $Lar_{e(r)}$ автономного хода;
- аккумуляторной батареей номинальной энергетической емкости $E_{e(r)}$ (однозначно определяется номинальным напряжением батареи, зарядной емкостью ячейки, диапазоном $[\underline{S}, \bar{S}]$ допустимых значений УЗ, расчетной длиной $Lar_{e(r)}$ автономного хода и максимальным удельным расходом sl_r^p заряда);
- гарантийным сроком службы $TG_{e(r)}$ батареи;
- табличной зависимостью $ACC_{e(r)}(D_d)$ достижимого числа циклов зарядки (разрядки) батареи за период эксплуатации от глубины разряда, где $D_d = DoD$, $d = 1, \dots, d^0$, d^0 – число строк таблицы;
- максимально возможным числом $NM_{e(r)}$ циклов зарядки (разрядки) батареи за период эксплуатации;
- числом $ACC_{e(r)}(1)$ циклов зарядки (разрядки) батареи за период эксплуатации при ее полной (100%-й) разрядке.

Отметим, что при УЗ, равном S , глубина D разряда батареи удовлетворяет равенству $D = 1 - S$.

2.3. Контактная сеть и ее характеристики. При проектировании транспортной системы АТ покрытие КС маршрутов из R изначально может отсутствовать. Что касается уже существующих маршрутов, обслуживаемых традиционными троллейбусами, то КС обычно полностью покрывает эти маршруты. В первом случае требуется выбрать наиболее экономически эффективную конфигурацию КС, во втором случае такая конфигурация КС позволяет определить избыточные участки КС.

КС, формируемая для маршрутов $r \in R$, характеризуется следующими входными данными:

- номинальным выходным напряжением $Y^{(ct)}$;
 - максимальной силой тока $I_e^{(ct)}$;
 - мощностью $P_e^{(ct)} = Y^{(ct)} \cdot I_e^{(ct)}$ зарядки АТ типа e ;
 - инвестиционной удельной стоимостью $cst_ct^{(cap)}$ контактной линии (на 1 км);
 - расчетным периодом $T^{(ct)}$ эксплуатации;
 - удельными операционными годовыми затратами $cst_ct^{(ope)}$ (на 1 км);
 - минимальным $\underline{L}^{(ct)}$ и максимальным $\bar{L}^{(ct)}$ значениями длины секции КС;
 - минимальным $\underline{L}^{(cf)}$ значением длины отрезка без КС;
 - максимально возможным числом $M(\alpha, \beta)$ секций КС на звене $(\alpha, \beta) \in U$ сети маршрутов.
- Секция КС с порядковым номером n на звене $(\alpha, \beta) \in U$ характеризуется:
- расстоянием $\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n)$ стартовой точки от начала звена;
 - расстоянием $\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n)$ конечной точки от начала звена;
 - длинами $lpc_{(\alpha, \beta)}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n))$, $lpc_{(\alpha, \beta)}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n))$ силовых кабелей для подключения концов секции к тяговой подстанции;
 - инвестиционной удельной стоимостью cst_pc силового кабеля (на 1 км);
 - расчетным периодом $T^{(pc)}$ эксплуатации силового кабеля.

2.4. Стационарные зарядные станции и их характеристики. Стационарные зарядные станции, устанавливаемые в базовых узлах системы маршрутов, определяются:

- единственным контактом для одновременной зарядки одного АТ;

- номинальным выходным напряжением $Y^{(cs)}$;
- максимальной силой тока $I_e^{(cs)}$ АТ типа e ;
- мощностью $P_e^{(cs)} = Y^{(cs)} \cdot I_e^{(cs)}$ зарядки АТ типа e ;
- инвестиционной стоимостью $cst_cs^{(cap)}$ зарядной станции;
- расчетным периодом $T^{(cs)}$ эксплуатации;
- операционными годовыми затратами $cst_cs^{(ope)}$.

3. Расчет износа батарей. Величина исходного ресурса батареи, расходуемого при ее зарядке (разрядке) в процессе функционирования АТ до выхода батареи из строя, может быть обозначена любым положительным числом. Для обозначения исходного ресурса выбрано максимально возможное число $NM_e - ACC_e(1)$ потраченных циклов зарядки (разрядки) батареи АТ типа e за период ее эксплуатации. Если построить функцию плотности расхода этого ресурса при пропускании через батарею (зарядке (разрядке)) единицы электроэнергии (1 кВт·ч) в каждой точке траектории УЗ, то можно определить расход ресурса на любом отрезке такой траектории.

Определим функции $\tilde{C}_e(S)$ кумулятивного расхода ресурса батареи АТ типа e (расхода числа циклов зарядки (разрядки) батареи) при изменении УЗ от 0 до S , заданные на отрезке $[0,1]$. Определение функции $\tilde{C}_e(S)$ основано на кусочно-постоянной функции $W_e(S)$ плотности расхода этого ресурса при пропускании через батарею (зарядке (разрядке)) единицы электроэнергии (1 кВт·ч).

Обозначим имеющиеся табличные значения DoD , для которых определены $ACC_e(DoD)$, через D_d и соответствующие значения относительного уровня S заряда батареи через $S_d = 1 - D_d$, $d = 1, \dots, d^0$, где d^0 – число равных подынтервалов отрезка $[0,1]$, $1 \geq D_1 \geq D_2 \geq \dots \geq D_{d^0} \geq 0$. Обозначим $\Delta_d^S = S_{d+1} - S_d = D_d - D_{d+1}$, $d = 1, \dots, d^0 - 1$.

Для расчета значений $W_e(S_d)$, $d = 1, \dots, d^0$, функции плотности $W_e(S)$ используется следующая система линейных уравнений:

$$2 \cdot ACC_e(D_d) \sum_{v=d}^{d^0} W_e(S_v) \Delta_v^S = NM_e - ACC_e(1), \quad d = 1, \dots, d^0.$$

По определению $\tilde{C}_e(S) = \int_0^S W_e(\xi) d\xi$. Напомним, что $0 \leq S \leq S_{d^0}$.

С учетом кусочно-постоянной на $[0, S_{d^0}]$ функции $W_e(S)$ ее кумулятивный аналог $\tilde{C}_e(S)$ будет кусочно-линейной функцией по S : $\tilde{C}_e(S) = W_e(0)(S - 0)$ для $S \in [0, S_1]$, $\tilde{C}_e(S) = W_e(0)(S_1 - 0) + W_e(S_1)(S - S_1)$ и т. д.

В таблице приведены зависимости достижимого числа циклов $ACC_e(DoD)$ за период службы литиевых батарей типов LTO и LFP от глубины разряда DoD в процессе их функционирования [9, 11], а также значения $W_d = W_e(S_d)$ функций $W_e(S)$ и значения $C_d = \tilde{C}_e(S_d)$ функций $\tilde{C}_e(S)$. На рис. 3 и 4 изображены графики функций $ACC_e(DoD)$ и $\tilde{C}_e(S)$ для батарей типов LTO и LFP. Следует заметить, что функции $ACC_e(DoD)$ являются выпуклыми убывающими, а функции $\tilde{C}_e(S)$ – вогнутыми возрастающими на областях их определения.

Зависимости достижимого числа циклов разрядки (зарядки) от глубины разряда и зависимости плотности расхода ресурса и кумулятивного расхода ресурса батареи от уровня заряда для батарей типов LTO и LFP
Dependencies of an attainable number of discharge (charge) cycles on the depth of discharge, dependencies of life resource consumption density and cumulative life resource consumption on the charge level for LTO and LFP batteries

DoD	УЗ	LTO			LFP				
		D_d	S_d	$ACC_e(D_d)$	W_d	C_d	$ACC_e(D_d)$	W_d	C_d
0	1	–	–	16,440	–	–	–	–	14,1816
0,1	0,9	338 800	4,852	15,955	138 000	4,830	5,973	7,139	13,6985
0,2	0,8	144 500	6,525	15,302	61 700	5,973	7,139	7,139	13,1010
0,3	0,7	89 100	7,074	14,595	37 150	7,139	8,613	8,613	12,3870
0,4	0,6	56 200	10,801	13,515	25 100	8,613	10,890	10,890	11,5250
0,5	0,5	39 800	12,054	12,309	17 800	10,890	13,049	13,049	10,4360
0,6	0,4	30 200	13,131	10,996	13 200	13,049	16,158	16,158	9,1320
0,7	0,3	22 400	18,956	9,101	10 000	16,158	17,186	17,186	7,5164
0,8	0,2	17 400	21,090	6,992	7950	17,186	26,878	26,878	5,7970
0,9	0,1	13 200	30,063	3,985	6020	26,878	31,094	31,094	3,1090
1	0	10 000	39,855	0	4700	31,094	0	0	0

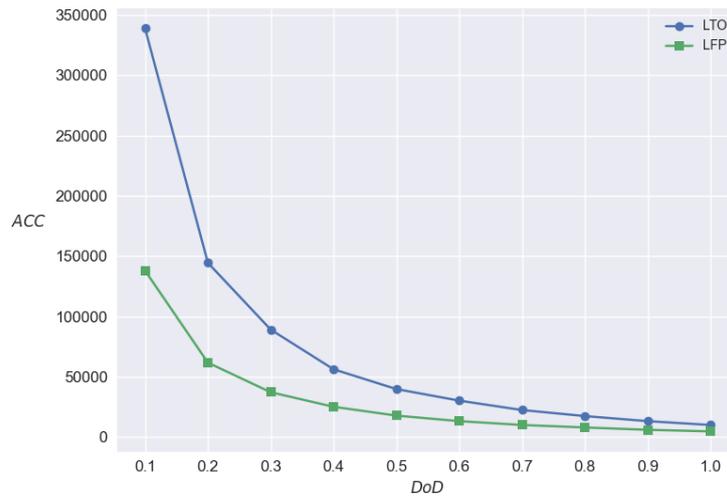


Рис. 3. Зависимости достижимого числа циклов разрядки (зарядки) батарей типов LTO и LFP от глубины разряда (DoD)

Fig. 3. Dependencies of an attainable number of discharge (charge) cycles of LTO, LFP batteries types on the depth of discharge (DoD)

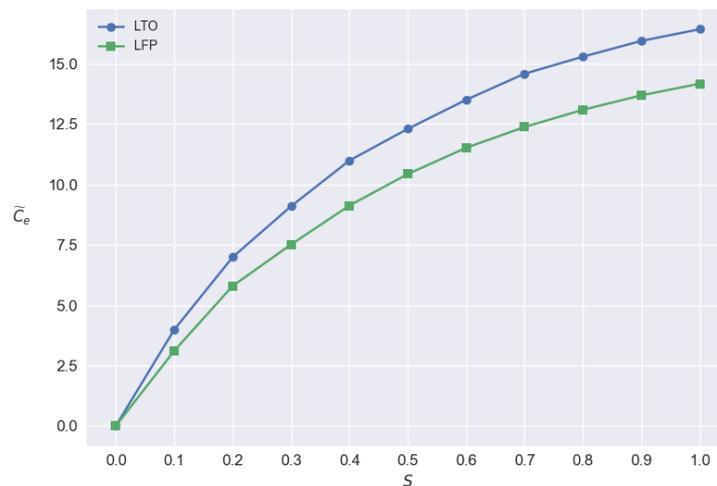


Рис. 4. Зависимости $\tilde{C}_e(S)$ от уровня заряда для батарей типов LTO и LFP

Fig. 4. Dependencies $\tilde{C}_e(S)$ on the charge level for LTO, LFP batteries types

4. Формулировка задачи оптимизации зарядной инфраструктуры

4.1. Контролируемые переменные. Контролируемые переменные задачи оптимизации зарядной инфраструктуры для парка АТ включают переменные, характеризующие расположение секций КС на звеньях графа G ; переменные, характеризующие УЗ батарей АТ в точках обслуживаемых маршрутов, и максимальные длительности зарядки АТ в базовых узлах.

Приведем переменные расположения секций КС на звеньях транспортной сети:

$\underline{x}_{(\alpha,\beta)}(n)$ – расстояние стартовой точки n -й секции КС от начала звена $(\alpha, \beta) \in U$;

$\bar{x}_{(\alpha,\beta)}(n)$ – расстояние конечной точки n -й секции КС от начала звена $(\alpha, \beta) \in U$;

$y_{(\alpha,\beta)}(n)$ – бинарная переменная наличия n -й секции КС звена (α, β) ; $y_{(\alpha,\beta)}(n) = 1$, если $\bar{x}_{(\alpha,\beta)}(n) - \underline{x}_{(\alpha,\beta)}(n) > 0$, и $y_{(\alpha,\beta)}(n) = 0$ в противном случае;

$z_{(\alpha,\beta)}(n)$ – бинарная переменная наличия отрезка без КС после n -й секции КС звена (α, β) ; $z_{(\alpha,\beta)}(n) = 1$, если $\underline{x}_{(\alpha,\beta)}(n+1) - \bar{x}_{(\alpha,\beta)}(n) > 0$, и $z_{(\alpha,\beta)}(n) = 0$ в противном случае.

Переменные уровня заряда включают:

- уровень заряда $Sa_{rq}(\alpha, \beta)$ батареи АТ типа $e(r)$ в начале звена (α, β) в цикле q обслуживания маршрута r ;
- уровень заряда $Sd_{rq}(\alpha, \beta)$ батареи АТ типа $e(r)$ в конце звена (α, β) в цикле q обслуживания маршрута r ;
- уровень заряда $S_{rq}(x)$ батареи АТ типа $e(r)$ в точке x цикла q обслуживания маршрута r .

Введем переменные τ_r верхних границ длительностей зарядки АТ типа $e(r)$ в любом базовом узле $v \in NB_r$ маршрута r , $r \in R$.

Для сокращения обозначений в формулировке задачи примем следующие обозначения:

\mathbf{X} – вектор переменных ($x_{(\alpha, \beta)}(n), \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n) \mid (\alpha, \beta) \in U, n=1, \dots, M(\alpha, \beta)$);

\mathbf{y} – вектор переменных ($y_{(\alpha, \beta)}(n) \mid (\alpha, \beta) \in U, n=1, \dots, M(\alpha, \beta)$);

\mathbf{z} – вектор переменных ($z_{(\alpha, \beta)}(n) \mid (\alpha, \beta) \in U, n=1, \dots, M(\alpha, \beta)$);

$\boldsymbol{\tau}$ – вектор переменных ($\tau_r \mid r \in R$) верхних границ длительностей зарядки на СЗС базовых узлов.

4.2. Функции контролируемых переменных, используемые в модели. Приведем функции контролируемых переменных, используемые для формулировки задачи оптимизации зарядной инфраструктуры:

$\Delta E_r(x, x')$ – энергия, полученная АТ типа $e(r)$ от КС на отрезке $[x, x']$ маршрута r , $\Delta E_r(x, x') = Y^{(ct)} \cdot I_{e(r)}^{(ct)} \cdot (x' - x) / V$;

$sl_r^p(x' - x)$ – средний расход заряда АТ типа $e(r)$ в часы пик на отрезке $[x, x']$;

$sl_r^o(x' - x)$ – средний расход заряда АТ типа $e(r)$ в непиковые часы на отрезке $[x, x']$;

$lpc_{(\alpha, \beta)}(x)$ – заданная кусочно-линейная функция длины силовых кабелей для подключения секции КС в точке x на звене $(\alpha, \beta) \in U$ к тяговой подстанции;

$LPC(\mathbf{X}, \mathbf{y}) = \sum_{(\alpha, \beta) \in U} \sum_{n=1}^{M(\alpha, \beta)} y_{(\alpha, \beta)}(n) [lpc_{(\alpha, \beta)}(x_{(\alpha, \beta)}(n)) + lpc_{(\alpha, \beta)}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n))] -$ суммарная длина силовых кабелей КС;

$nc_v(\boldsymbol{\tau}) = \sum_{r \in RM_v} \left\lceil \frac{\tau_r}{\eta_r} \right\rceil -$ число стационарных зарядных станций для базового узла v , где $\lceil x \rceil -$

наименьшее целое, не меньшее x .

Отметим, что искомая конфигурация зарядной инфраструктуры определяется набором $(\mathbf{X}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\tau})$. Переменные вектора \mathbf{z} являются вспомогательными.

Введем для каждого $r \in R$ классификацию $\Omega = \{1, 2, \dots, \bar{k}\}$ категорий дней года по количествам θ_{rpk} , θ_{rok} пиковых и непиковых циклов соответственно таким образом, что для дней категории $k \in \Omega$ рассматриваемый АТ выполняет в течение каждого такого дня θ_{rpk} пиковых и θ_{rok} непиковых циклов обслуживания маршрута r .

Расчетное число потраченных циклов зарядки (разрядки) батареи АТ типа $e(r)$, обслуживающего маршрут r , за период $TG_{e(r)}$ определяется равенством

$$\Delta NC_r(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau}) = TG_{e(r)} \cdot \sum_{k=1}^{\bar{k}} \Theta Y_k (\Delta NC_{rpk}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau}) + \Delta NC_{rok}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau})), \quad (1)$$

где $\Theta Y_k -$ заданное число дней категории k в году, а числа $\Delta NC_{rpk}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau})$, $\Delta NC_{rok}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau})$ потраченных циклов зарядки (разрядки) для пиковых и непиковых циклов маршрута соответственно в течение одного дня категории k вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} \Delta NC_{rpk}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau}) = & \sum_{q=1}^{\theta_{rpk}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r} \sum_{n=1}^{M(\alpha, \beta)} (\tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n))) - \tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(x_{(\alpha, \beta)}(n)))) + \\ & + \sum_{q=1}^{\theta_{rpk}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r} \sum_{n=1}^{M(\alpha, \beta)-1} (\tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n))) - \tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(x_{(\alpha, \beta)}(n+1)))) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{q=1}^{\theta_{rp_k}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r} (\tilde{C}_{e(r)}(Sa_{rq}(\alpha, \beta)) - \tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(1)))) + \\
 & + \sum_{q=1}^{\theta_{rp_k}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r} (\tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(M(\alpha, \beta)))) - \tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(l(\alpha, \beta)))) + \\
 & + \sum_{q=1}^{\theta_{rp_k}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r, \beta \in NB_r} (\tilde{C}_{e(r)}(\min\{\bar{S}, Sd_{rq}(\alpha, \beta) + P_e^{(cs)} \cdot \tau_{e(r)} / E_{e(r)}\}) - \tilde{C}_{e(r)}(Sd_{rq}(\alpha, \beta))); \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta NC_{rok}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau}) = & \sum_{q=\theta_{rp_k}+1}^{\theta_{rp_k}+\theta_{rok}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r} \sum_{n=1}^{M(\alpha, \beta)} (\tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n))) - \tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n)))) + \\
 & + \sum_{q=\theta_{rp_k}+1}^{\theta_{rp_k}+\theta_{rok}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r} \sum_{n=1}^{M(\alpha, \beta)-1} (\tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n))) - \tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n+1)))) + \\
 & + \sum_{q=\theta_{rp_k}+1}^{\theta_{rp_k}+\theta_{rok}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r} (\tilde{C}_{e(r)}(Sa_{rq}(\alpha, \beta)) - \tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(1)))) + \\
 & + \sum_{q=\theta_{rp_k}+1}^{\theta_{rp_k}+\theta_{rok}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r} (\tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(M(\alpha, \beta)))) - \tilde{C}_{e(r)}(S_{rq}(l(\alpha, \beta)))) + \\
 & + \sum_{q=\theta_{rp_k}+1}^{\theta_{rp_k}+\theta_{rok}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U_r, \beta \in NB_r} (\tilde{C}_{e(r)}(\min\{\bar{S}, Sd_{rq}(\alpha, \beta) + P_e^{(cs)} \cdot \tau_{e(r)} / E_{e(r)}\}) - \tilde{C}_{e(r)}(Sd_{rq}(\alpha, \beta))). \quad (3)
 \end{aligned}$$

4.3. Ограничения задачи. Приведем систему ограничений для контролируемых переменных задачи оптимизации зарядной инфраструктуры, определяющую область их допустимых значений:

$$Sa_{rq}(\beta, \gamma) = Sd_{rq}(\alpha, \beta), (\alpha, \beta), (\beta, \gamma) \in U_r, \beta \notin NB_r, q = 1, \dots, \theta_{rp_k} + \theta_{rok}, k = 1, \dots, \bar{k}, r \in R; \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 E_{e(r)} Sa_{rq}(\beta, \gamma) = \min\{ \bar{S} \cdot E_{e(r)}, E_{e(r)} Sd_{rq}(\alpha, \beta) + P_e^{(cs)} \cdot \tau_{e(r)} \}, (\alpha, \beta), (\beta, \gamma) \in U_r, \beta \in NB_r, q = 1, \dots, \theta_{rp_k} + \theta_{rok}, \\
 k = 1, \dots, \bar{k}, r \in R; \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{e(r)} S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) = \min\{ \bar{S} \cdot E_{e(r)}, E_{e(r)} S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) + \Delta E_r(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n), \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) - \\
 - sl_r^p(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n) - \underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) \}, q = 1, \dots, \theta_{rp_k}, k = 1, \dots, \bar{k}, (\alpha, \beta) \in U_r, n = 1, \dots, M(\alpha, \beta), r \in R; \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{e(r)} S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) = \min\{ \bar{S} \cdot E_{e(r)}, E_{e(r)} S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) + \Delta E_r(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n), \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) - \\
 - sl_r^p(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n) - \underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) \}, q = \theta_{rp_k} + 1, \dots, \theta_{rp_k} + \theta_{rok}, k = 1, \dots, \bar{k}, (\alpha, \beta) \in U_r, n = 1, \dots, M(\alpha, \beta), r \in R; \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$E_{e(r)} S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n+1)) = E_{e(r)} S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) - sl_r^p(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n+1) - \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n)), q = 1, \dots, \theta_{rp_k}; \quad (8)$$

$$k = 1, \dots, \bar{k}, (\alpha, \beta) \in U_r, n = 1, \dots, M(\alpha, \beta) - 1, r \in R, \quad (9)$$

$$E_{e(r)} S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n+1)) = E_{e(r)} S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) - sl_r^o(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n+1) - \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n));$$

$$\begin{aligned}
 q = \theta_{rp_k} + 1, \dots, \theta_{rp_k} + \theta_{rok}, k = 1, \dots, \bar{k}, (\alpha, \beta) \in U_r, n = 1, \dots, M(\alpha, \beta) - 1, r \in R, \\
 \underline{S} \leq S_{rq}(x) \leq \bar{S}, q = 1, \dots, \theta_{rp_k} + \theta_{rok}, k = 1, \dots, \bar{k}, r \in R; \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$E_{e(r)} S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(1)) = E_{e(r)} Sa_{rq}(\alpha, \beta) - sl_r^p(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(1)), q = 1, \dots, \theta_{rp_k}, k = 1, \dots, \bar{k}; \quad (11)$$

$$(\alpha, \beta) \in U_r, r \in R, \quad (12)$$

$$E_{e(r)} S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(1)) = E_{e(r)} Sa_{rq}(\alpha, \beta) - sl_r^o(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(1)), q = \theta_{rp_k} + 1, \dots, \theta_{rp_k} + \theta_{rok}, k = 1, \dots, \bar{k};$$

$$(\alpha, \beta) \in U_r, r \in R,$$

$$E_{e(r)} Sd_{rq}(\alpha, \beta) = E_{e(r)} S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(M(\alpha, \beta))) - sl_r^p (l(\alpha, \beta) - \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(M(\alpha, \beta))), \quad (13)$$

$$q = 1, \dots, \theta_{rp_k}, k = 1, \dots, \bar{k}, (\alpha, \beta) \in U_r, r \in R;$$

$$E_{e(r)} Sd_{rq}(\alpha, \beta) = E_{e(r)} S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(M(\alpha, \beta))) - sl_r^o (l(\alpha, \beta) - \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(M(\alpha, \beta))), \quad (14)$$

$$q = \theta_{rp_k} + 1, \dots, \theta_{rp_k} + \theta_{rok}, k = 1, \dots, \bar{k}, (\alpha, \beta) \in U_r, r \in R;$$

$$\Delta E_r(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n), \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) = Y^{(ct)} I_{e(r)}^{(ct)} (\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n) - \underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) / V_r, (\alpha, \beta) \in U_r, n = 1, \dots, M(\alpha, \beta), r \in R; \quad (15)$$

$$0 \leq \underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n) \leq \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n) \leq \underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n+1) \leq \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n+1) \leq l(\alpha, \beta), (\alpha, \beta) \in U_r, n = 1, \dots, M(\alpha, \beta) - 1, r \in R; \quad (16)$$

$$\min\{\underline{L}^{(ct)}, l(\alpha, \beta)\} y_{(\alpha, \beta)}(n) \leq \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n) - \underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n) \leq \bar{L}^{(ct)} y_{(\alpha, \beta)}(n), (\alpha, \beta) \in U_r, \quad (17)$$

$$n = 1, \dots, M(\alpha, \beta), r \in R;$$

$$\min\{\underline{L}^{(cf)}, l(\alpha, \beta)\} z_{(\alpha, \beta)}(n) \leq \underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n+1) - \bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n) \leq Lar_{e(r)} z_{(\alpha, \beta)}(n), (\alpha, \beta) \in U_r, \quad (18)$$

$$n = 1, \dots, M(\alpha, \beta) - 1, r \in R;$$

$$TG_{e(r)} \cdot \sum_{k=1}^{\bar{k}} \Theta Y_k (\Delta NC_{rp_k}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau}) + \Delta NC_{rok}(\mathbf{X}, \boldsymbol{\tau})) \leq NM_{e(r)} - ACC_{e(r)}(1), r \in R; \quad (19)$$

$$Sa_{r_1}(\alpha_{r_1}, \alpha_{r_2}) = 1, r \in R; \quad (20)$$

$$y_{(\alpha, \beta)}(n), z_{(\alpha, \beta)}(n) \in \{0, 1\}, n = 1, \dots, M(\alpha, \beta), (\alpha, \beta) \in U. \quad (21)$$

Ограничения (4) устанавливают равенство для небазовых узлов сети УЗ (энергии) батареи в конце предшествующего звена и УЗ в начале последующего звена маршрута. Ограничения (5) устанавливают равенство для базовых узлов сети УЗ (энергии) батареи в начале очередного звена маршрута и УЗ в конце предыдущего звена, дополненного энергией, которая получена от стационарной зарядной станции базового узла. Ограничения (6) устанавливают УЗ в конце n -й секции КС звена (α, β) сети для циклов часа пик равным минимуму из максимального УЗ батареи и УЗ в начале секции, дополненной энергией, которая получена от КС на этой секции, за вычетом потраченной энергии. Ограничения (7) устанавливают УЗ в конце n -й секции КС звена (α, β) сети для циклов непиковых часов равным минимуму из максимального УЗ батареи и УЗ в начале секции, дополненной энергией, которая получена от КС на этой секции, за вычетом потраченной энергии. Ограничения (8) устанавливают УЗ в начале $n+1$ -й секции КС звена (α, β) сети для циклов часов пик равным УЗ в конце n -й секции за вычетом энергии, потраченной на отрезке без КС. Ограничения (9) устанавливают УЗ в начале $n+1$ -й секции КС звена (α, β) сети для циклов непиковых часов равным УЗ в конце n -й секции за вычетом энергии, потраченной на отрезке без КС. Ограничения (10) обеспечивают принадлежность УЗ в любой точке x сети заданному диапазону. Ограничения (11) устанавливают УЗ в начале первой секции КС для часов пик равным УЗ в начале звена сети за вычетом энергии, потраченной на отрезке без КС. Ограничения (12) устанавливают УЗ в начале первой секции КС для непиковых часов равным УЗ в начале звена сети за вычетом энергии, потраченной на отрезке без КС. Ограничения (13) устанавливают УЗ в конце звена (α, β) для часов пик равным УЗ в конце последней $M(\alpha, \beta)$ -й секции КС за вычетом энергии, потраченной на отрезке без КС. Ограничения (14) устанавливают УЗ в конце звена (α, β) для непиковых часов равным УЗ в конце последней $M(\alpha, \beta)$ -й секции КС за вычетом энергии, потраченной на отрезке без КС. Условия (15) определяют верхнюю границу величины энергии, которую АТ может получить на n -й секции КС звена (α, β) . Ограничения (16) опреде-

ляют условия взаимного расположения точек начала и конца секций КС на любом звене сети. Ограничения (17) обеспечивают принадлежность длины секции КС заданному диапазону. Ограничения (18) обеспечивают принадлежность длины отрезка без КС заданному диапазону. Ограничения (19) обеспечивают суммарное число потерянных циклов батареи АТ типа $e(r)$ за гарантийный период эксплуатации батареи, не превышающее расчетного числа потерянных циклов. Ограничения (20) устанавливают начальный УЗ для последовательности циклов любого маршрута. Ограничения (21) задают область значений булевых переменных.

4.4. Достаточные условия выполнения ограничений (10). Отметим, что приведенные ниже условия выполнения ограничений (10) не являются необходимыми.

Определение. Последовательность $q=(q_1, q_2, \dots, q_{\theta_{rpk}+\theta_{rok}})$ циклов обслуживания любого маршрута $r \in R$ в течение дня, содержащую циклы двух типов (θ_{rpk} пиковых и θ_{rok} непиковых), назовем *гарантирующей последовательностью* для выполнения ограничений (10), если любое допустимое решение задачи (4)–(21) при зарядной инфраструктуре (X, y, τ) для этой последовательности является допустимым и для любой другой последовательности циклов.

Теорема. Последовательность $\theta_{rpk}+\theta_{rok}$ циклов обслуживания любого маршрута $r \in R$ в течение дня категории k , в которой первые θ_{rpk} циклов – пиковые циклы, а последующие θ_{rok} – непиковые циклы, является гарантирующей последовательностью для выполнения ограничений (10).

Доказательство. Очевидно, что с учетом выражений (5), (6) достаточно рассматривать только левую часть $\underline{S} \leq S_{rq}(x)$ ограничений (10).

Запишем условия, вытекающие из свойств задачи:

а) $sl_r^o < sl_r^p$;

б) доступная мощность $P_{e(r)}^{(ct)}$ КС для АТ типа $e(r)$ постоянна и одинакова для пиковых и непиковых циклов;

в) мощность $P_{e(r)}^{(cs)} = Y^{(cs)} I_{e(r)}^{(cs)}$ зарядки АТ $e(r)$ и максимальная длительность τ_r его зарядки в базовых узлах маршрута r одинаковы для пиковых и непиковых часов.

Из условий а)–в) следует, что величина снижения УЗ на каждом отрезке кусочно-линейных ломаных, соответствующем конкретному сегменту автономного хода маршрута, для непикового цикла меньше, чем для пикового. В то же время величина роста УЗ на каждом отрезке кусочно-линейных ломаных, соответствующем сегменту КС, для непикового цикла не меньше, чем для пикового.

Рассмотрим последовательность, состоящую только из $\theta_{rpk}+\theta_{rok}$ (идентичных) пиковых циклов. Будем строить наихудшую последовательность с точки зрения наименьших значений нижних точек излома кусочно-линейных ломаных УЗ посредством замены в исходной последовательности одного из пиковых циклов непиковым циклом. Выберем произвольный номер v члена последовательности, $1 \leq v \leq \theta_{rpk}+\theta_{rok}$. Из изложенного выше следует, что замена пикового цикла v непиковым циклом может привести только к увеличению значения УЗ каждой точки излома цикла v . Более того, поскольку значение УЗ конечной точки излома цикла v может только возрасти, то и УЗ всех точек излома последующих циклов $v+1, \dots, \theta_{rpk}+\theta_{rok}$ могут только возрасти. Следовательно, наихудшему варианту последовательности соответствует $v = \theta_{rpk} + \theta_{rok}$. Теорема верна для числа $q=1$ непиковых циклов. Следуя методу математической индукции, предположим, что она верна для произвольного $q=s$, $1 \leq s \leq \theta_{rok}-1$, непиковых циклов, т. е. первые $\theta_{rpk}+\theta_{rok}-s$ циклов гарантирующей последовательности являются пиковыми, а последующие s непиковыми. Покажем, что теорема верна и для $q=s+1$ непиковых циклов. Как уже было отмечено, замена любого из первых $\theta_{rpk}+\theta_{rok}-s$ пиковых циклов непиковым может привести лишь к увеличению значения УЗ каждой точки излома этого и последующих циклов. Следовательно, при замене последнего пикового цикла с номером $\theta_{rpk}+\theta_{rok}-s$ непиковым получаем гарантирующую последовательность из $\theta_{rpk}+\theta_{rok}-s-1$ пиковых и последующих $s+1$ непиковых циклов. Теорема доказана.

Следствие. В связи с тем что функции $\tilde{C}_e(S)$ вогнуты, зарядке (разрядке) при более низких УЗ на отрезках ломаной УЗ одинаковой длины соответствует больший износ батареи. По-

скольку гарантирующая последовательность является минорантой функциональных зависимостей $U3$ батареи, то этой последовательности соответствует больший износ батареи по сравнению с другими последовательностями.

4.5. Критерий качества варианта зарядной инфраструктуры. В качестве критерия принята суммарная годовая стоимость секций КС, силовых кабелей, соединяющих их с тяговыми подстанциями, а также СЗС на конечных остановках маршрутов.

Таким образом, целевая функция задачи представляется в виде суммы

$$\begin{aligned} \Phi(\mathbf{X}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\tau}) = & \left(\frac{cst_ct^{(cap)}}{T^{(ct)}} + cst_ct^{(ope)} \right) \sum_{(\alpha, \beta) \in U} \sum_{n=1}^{M(\alpha, \beta)} (\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n) - \underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) + \\ & + \left(\frac{cst_cs^{(cap)}}{T^{(cs)}} + cst_cs^{(ope)} \right) \sum_{v \in NB} nc_v(\boldsymbol{\tau}) + \\ & + \frac{cst_pc}{T^{(pc)}} \sum_{(\alpha, \beta) \in U} \sum_{n=1}^{M(\alpha, \beta)} y_{(\alpha, \beta)}(n) [lpc_{(\alpha, \beta)}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n)) + lpc_{(\alpha, \beta)}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n))], \end{aligned} \quad (22)$$

где первое, второе и третье слагаемые являются годовыми затратами для секций КС, стационарных зарядных станций и силовых кабелей, соединяющих секции КС с тяговыми подстанциями, соответственно.

Рассматриваемая в статье задача оптимизации зарядной инфраструктуры АТ (задача А) может быть сформулирована следующим образом:

$$\min_{\mathbf{X}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\tau}} \Phi(\mathbf{X}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\tau}) \quad (23)$$

при выполнении набором переменных $(\mathbf{X}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\tau})$ ограничений (4)–(21). Задача А является задачей математического программирования.

Поскольку функции $\tilde{C}_{e(r)}(S)$ (см. разд. 3) кумулятивного расхода ресурса батареи являются кусочно-линейными функциями переменных $S_{rq}(\bar{x}_{(\alpha, \beta)}(n))$, $S_{rq}(\underline{x}_{(\alpha, \beta)}(n))$, $Sa_{rq}(\alpha, \beta)$, $Sd_{rq}(\alpha, \beta)$, $(\alpha, \beta) \in U$, $n = 1, \dots, M(\alpha, \beta)$, ограничение (19) может быть заменено эквивалентной системой линейных ограничений относительно этих переменных и дополнительных булевых переменных. Следовательно, вся система ограничений (4)–(21) задачи А может быть заменена эквивалентной системой линейных ограничений.

В целевой функции $\Phi(\mathbf{X}, \mathbf{y}, \boldsymbol{\tau})$ первый член линейно зависит от переменных задачи, второй член в целевой функции может быть выражен произведением годовых затрат на одну СЗС и суммы дополнительных дискретных переменных количеств СЗС для базовых узлов с введением дополнительных линейных неравенств для этих дискретных переменных, третий член является взвешенной суммой произведений булевых переменных и кусочно-линейных функций переменных расположения секций КС.

Таким образом, задача А может быть сведена к задаче математического программирования с квадратичной целевой функцией и линейной системой ограничений. Для решения задачи А могут быть использованы стандартные решатели типа IBM ILOG CPLEX, предназначенные для задач линейного, квадратичного и целочисленного программирования, либо зачастую используемые для такого типа задач эвристики и метаэвристики [14]. Среди метаэвристик перспективным представляется метод «роя частиц» (Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO). Достоинством эвристического метода численной оптимизации PSO является то, что он не требует специальных свойств оптимизируемой функции. Этот метод нашел применение во многих областях [15–17]. PSO оптимизирует функцию, поддерживая популяцию возможных решений, называемых частицами, и перемещая эти частицы в области поиска решений согласно итера-

тивно вычисляемой простой формуле. Перемещения частиц учитывают наилучшее найденное в этой области положение, которое изменяется от итерации к итерации при нахождении частицами более выгодных положений.

Заключение. Разработана математическая модель задачи оптимизации зарядной инфраструктуры парка АТ. Особенности предложенной математической модели являются учет износа батареи каждого АТ в течение гарантийного срока ее эксплуатации и обеспечение зарядной инфраструктурой условия сохранения ресурса батареи при функционировании АТ в течение этого срока. Функционирование АТ осуществляется в соответствии с заданными расписаниями с учетом выделенных типов режимов его работы в рамках различных категорий дней в течение года. Модель сформулирована в виде задачи математического программирования с квадратичной целевой функцией и линейными ограничениями. Для решения задачи предполагается использовать стандартное программное обеспечение типа IBM ILOG CPLEX, а также эвристический метод «роя частиц».

Полученные результаты могут быть использованы, в частности, для создания систем поддержки принятия решений при проектировании зарядной инфраструктуры парков АТ различных типов.

Вклад авторов. Б. М. Розин предложил структуру и состав компонент математической модели оптимизации зарядной инфраструктуры парка АТ. М. Я. Ковалев скорректировал, обобщил и проанализировал результаты. И. А. Шатерник принял участие в обсуждении и верификации компонент модели, а также в подготовке иллюстративного материала.

Список использованных источников

1. Analysis of limiting factors of battery assisted trolleybuses / D. Grygar [et al.] // *Transportation Research Procedia*. – 2019. – Vol. 40. – P. 229–235.
2. System optimization for dynamic wireless charging electric vehicles operating in a multiple-route environment / I. Hwang [et al.] // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2017. – Vol. 19, iss. 6. – P. 1709–1726. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2731787>
3. Ensuring sustainable development of urban public transport: A case study of the trolleybus system in Gdynia and Sopot (Poland) / M. Wołek [et al.] // *J. of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 279. <https://123807.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123>
4. Bartłomiejczyk, M. Practical application of in motion charging: Trolleybuses service on bus lines / M. Bartłomiejczyk // 18th Intern. Scientific Conf. on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 17–19 May 2017. – Kouty nad Desnou, 2017. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/epe.2017.7967239>
5. Jang, Y. J. Survey of the operation and system study on wireless charging electric vehicle systems / Y. J. Jang // *Transportation Research Part C*. – 2018. – Vol. 95. – P. 844–866.
6. Chen, Z. Deployment of stationary and dynamic charging infrastructure for electric vehicles along traffic corridors / Z. Chen, W. Liu, Y. Yin // *Transportation Research Part C*. – 2017. – Vol. 77. – P. 185–206.
7. Sevcik, J. A Vehicle device tailored for hybrid trolleybuses and overhead wires implementation in SUMO / J. Sevcik, J. Prikryl // *SUMO User Conf. 2019, EPiC Series in Computing, Berlin, Germany, 13–15 May 2019*. – Berlin, 2019. – Vol. 62. – P. 145–157.
8. Ko, Y. D. The optimal system design of the online electric vehicle utilizing wireless power transmission technology / Y. D. Ko, Y. J. Jang // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2013. – Vol. 14(3). – P. 1255–1265.
9. Goehlich, D. Conceptual design of urban e-bus systems with special focus on battery technology / D. Goehlich, T.-A. Fay, S. Park // *Proc. of the 22nd Intern. Conf. on Engineering Design (ICED19), Delft, The Netherlands, 5–8 Aug. 2019*. – Delft, 2019. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.289>
10. Han, S. K. A practical battery wear model for electric vehicles charging applications / S. K. Han // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 113. – P. 1100–1108.
11. Millner, A. Modeling lithium ion battery degradation in electric vehicles / A. Millner // *2010 IEEE Conf. on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, Waltham, MA, 27–28 Sept. 2010*. – Waltham, 2010. – P. 349–356.
12. Pelletier, S. Charge scheduling for electric freight vehicles / S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte // *Transportation Research Part B*. – 2018. – Vol. 115. – P. 246–269.

13. Guschinsky, N. N. Optimization of slow-charging infrastructure for electric buses of one depot / N. N. Guschinsky, M. Y. Kovalyov, B. M. Rozin // Танаевские чтения : докл. Девятой Междунар. науч. конф., Минск, 30 марта 2021 г. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2021. – С. 153–157.
14. Скобцов, Ю. А. Метаэвристики / Ю. А. Скобцов, Е. Е. Федоров. – Донецк : Ноулидж, 2013. – 426 с.
15. Poli, R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation / R. Poli // J. of Artificial Evolution and Applications. – 2008. – Vol. 2008. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2008/685175>
16. Гущинский, Н. Н. Оптимизация размещения детали на многопозиционном поворотном столе агрегатного станка / Н. Н. Гущинский, В. Е. Зданович, Б. М. Розин // Информатика. – № 4(48). – 2015. – С. 57–72.
17. Fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus service / N. Guschinsky [et al.] // Computers and Operations Research. – 2021. – Vol. 135. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105449>

References

1. Grygar D., Koháni M., Štefún R., Drgoňa P. Analysis of limiting factors of battery assisted trolleybuses. *Transportation Research Procedia*, 2019, vol. 40, pp. 229–235.
2. Hwang I., Jang Y. J., Ko Y. D., Lee M. S. System optimization for dynamic wireless charging electric vehicles operating in a multiple-route environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, iss. 6, pp. 1709–1726. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2731787>
3. Ensuring sustainable development of urban public transport: A case study of the trolleybus system in Gdynia and Sopot (Poland) / M. Wołek [et al.] // *J. of Cleaner Production*, 2021, vol. 279. <https://123807.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123>
4. Bartłomiejczyk M. Practical application of in motion charging: Trolleybuses service on bus lines. *18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 17–19 May 2017*. Kouty nad Desnou, 2017, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/epe.2017.7967239>
5. Jang Y. J. Survey of the operation and system study on wireless charging electric vehicle systems. *Transportation Research Part C*, 2018, vol. 95, pp. 844–866.
6. Chen Z., Liu W., Yin Y. Deployment of stationary and dynamic charging infrastructure for electric vehicles along traffic corridors. *Transportation Research Part C*, 2017, vol. 77, pp. 185–206.
7. Sevcik, J., Prikryl J. A Vehicle device tailored for hybrid trolleybuses and overhead wires implementation in SUMO. *SUMO User Conference 2019, EPiC Series in Computing, Berlin, Germany, 13–15 May 2019*. Berlin, 2019, vol. 62, pp. 145–157.
8. Ko Y. D., Jang Y. J. The optimal system design of the online electric vehicle utilizing wireless power transmission technology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, vol. 14(3), pp. 1255–1265.
9. Goehlich D., Fay T.-A., Park S. Conceptual design of urban e-bus systems with special focus on battery technology. *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), Delft, The Netherlands, 5–8 August 2019*. Delft, 2019. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.289>
10. Han S. K. A practical battery wear model for electric vehicles charging applications. *Applied Energy*, 2014, vol. 113, pp. 1100–1108.
11. Millner A. Modeling lithium ion battery degradation in electric vehicles. *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, Waltham, MA, 27–28 September 2010*. Waltham, 2010, pp. 349–356.
12. Pelletier S., Jabali O., Laporte G. Charge scheduling for electric freight vehicles. *Transportation Research Part B*, 2018, vol. 115, pp. 246–269.
13. Guschinsky N. N., Kovalyov M. Y., Rozin B. M. Optimization of slow-charging infrastructure for electric buses of one depot. Tanaevskie chteniya: Doklady Devyatoj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, 30 marta 2021 g. [Proceedings of 9th International Scientific Conference "Tanaev's Readings", Minsk, 30 March 2021], Minsk, Ob`edinennyj institut problem informatiki Nacional'noj akademii nauk Belarusi, 2021, pp. 153–157.
14. Scobtsov Yu. A., Fedorov E. E. Metae`vristiki. *Metaheuristics*, Donetsk, Noulidzh, 2013, 426 p. (In Russ.)
15. Poli, R. Analysis of the Publications on the Applications of Particle Swarm Optimisation / R. Poli // *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, vol. 2008, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2008/685175>

16. Guschinsky N. N., Zdanovich V. E., Rozin B. M. *Optimization of part placement on a multi-position rotary table of a machine-tool*. Informatika [Informatics], 2015, no. 4(48), pp. 57–72 (In Russ.)

17. Guschinsky N., Kovalyov M. Y., Rozin B., Brauner N. Fleet and charging infrastructure decisions for fast-charging city electric bus service. *Computers and Operations Research*, 2021, vol. 135. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105449>

Информация об авторах

Ковалев Михаил Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, зам. генерального директора по научной работе, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

<http://orcid.org/0000-0003-0832-0829>

E-mail: kovalyov_my@newman.bas-net.by

Розин Борис Матвеевич, кандидат технических наук, заведующий сектором, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

<http://orcid.org/0000-0003-3814-6569>

E-mail: rozin@newman.bas-net.by

Шатерник Илья Андрианович, инженер-программист, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.

E-mail: shatoby.i@gmail.com

Information about the authors

Mikhail Ya. Kovalyov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Deputy General Director, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

<http://orcid.org/0000-0003-0832-0829>

E-mail: kovalyov_my@newman.bas-net.by

Boris M. Rozin, Cand. Sci. (Eng.), Head of the sector, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

<http://orcid.org/0000-0003-3814-6569>

E-mail: rozin@newman.bas-net.by

Ilya A. Shatarnik, Engineer-programmer, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

E-mail: shatoby.i@gmail.com

ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

LOGICAL DESIGN



УДК 681.32
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-96-107>

Оригинальная статья
Original Paper

Распознавание логических вентилях в плоской транзисторной схеме

Д. И. Черемисинов, Л. Д. Черемисинова[✉]

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
✉E-mail: cld@newman.bas-net.by*

Аннотация

Цели. С ростом трудоемкости верификации и моделирования современных СБИС, содержащих сотни миллионов транзисторов, основными инструментами автоматизированного проектирования и верификации становятся средства извлечения из плоского (неиерархического) описания схем на транзисторном уровне иерархического описания на уровне логических элементов. Средства декомпиляции транзисторных схем не только позволяют существенно снизить время выполнения проверки топологии, но и служат основой для генерации тестовых наборов, логического перепроектирования интегральных схем и обратного инжиниринга для обнаружения несанкционированных вложений.

Целью работы является решение задачи извлечения структуры функционального уровня из плоской схемы транзисторного уровня путем распознавания в ней подсхем, реализующих логические элементы.

Методы. Предлагаются графовые методы решения некоторых ключевых задач, возникающих на этапе структурного распознавания КМОП-вентилей в транзисторной схеме: разбиение графа на компоненты связности, соответствующие подсхемам из транзисторов; распознавание подсхем, являющихся логическими элементами, и реализуемых ими функций; формирование библиотеки распознанных вентилях и построение двухуровневого описания транзисторной схемы. Исходная плоская и полученная двухуровневая транзисторные схемы представляются в формате SPICE.

Результаты. Предложенные методы реализованы на языке C++ как часть программы декомпиляции транзисторных схем для случая, когда искомая библиотека логических элементов заранее неизвестна. Все шаги предлагаемых процедур структурного распознавания КМОП-вентилей в плоской транзисторной схеме выполняются за линейное время от числа транзисторов исходной схемы.

Заключение. Программа декомпиляции была протестирована на практических схемах транзисторного уровня. Показано, что она имеет достаточное быстродействие, чтобы обрабатывать схемы более чем со 100 тыс. транзисторов за несколько минут на персональной ЭВМ. В настоящее время авторами разрабатываются методы распознавания в транзисторной схеме более сложных элементов, таких как элементы памяти.

Ключевые слова: экстракция транзисторных подсхем, КМОП-схемы, верификация, перепроектирование СБИС, распознавание логических вентилях, формат SPICE

Для цитирования. Черемисинов, Д. И. Распознавание логических вентилях в плоской транзисторной схеме / Д. И. Черемисинов, Л. Д. Черемисинова // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 4. – С. 96–107. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-96-107>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 14.09.2021
Подписана в печать | Accepted 08.10.2021
Опубликована | Published 29.12.2021

Logical gates recognition in a flat transistor circuit

Dmitry I. Cheremisinov, Ljudmila D. Cheremisinova[✉]

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus
[✉]E-mail: cld@newman.bas-net.by*

Abstract

Objectives. With the increasing complexity of verification and simulation of modern VLSI, containing hundreds of millions of transistors, the means of extracting the hierarchical description at the level of logical elements from a flat description of circuits at the transistor level are becoming the main tools for computer-aided design and verification. Decompilation tools for transistor circuits can not only significantly reduce the time to perform VLSI topology check, but also provide the basis for generating test cases, logical reengineering of integrated circuits and reverse engineering to detect untrusted attachments.

The objective of the work is to solve the problem of extracting the structure of the functional level from a flat circuit of the transistor level by recognizing in it subcircuits that implement logical elements.

Methods. Graph based methods are proposed for solving some key problems arising at the stage of structural recognition of CMOS gates in a transistor circuit: partitioning a graph into connectivity components corresponding to transistor subcircuits; recognition of subcircuits that are logical elements, and functions implemented by them; forming a library of recognized gates and constructing two-level transistor circuit. The original flat and resulting two-level transistor circuits are presented in SPICE format.

Results. The proposed methods are implemented in C++ as a part of a transistor circuit decompilation program for the case without any predetermined cell library. All steps of the proposed methods of structural CMOS gates recognition are performed in a linear time from the number of transistors in the initial circuit.

Conclusion. The decompilation program has been tested on practical transistor-level circuits. Experiments indicate that the present tool is fast enough to process circuits with more than a hundred thousand transistors in a few minutes on a personal computer. Currently, the authors are developing methods for recognizing more complex elements in a transistor circuit, such as memory elements.

Keywords: transistor subcircuit extraction, CMOS circuits, VLSI layout verification, VLSI reengineering, logical gates recognition, SPICE format

For citation. Cheremisinov D. I., Cheremisinova L. D. *Logical gates recognition in a flat transistor circuit*. Informatika [Informatics], 2021, vol. 18, no. 4, pp. 96–107 (In Russ.).
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-4-96-107>

Conflict of interest. The authors declare of no conflict of interest.

Введение. Процесс подготовки производства современной СБИС, содержащей сотни миллионов транзисторов, стоит очень дорого, поэтому перед изготовлением фотошаблонов обязательно выполняется верификация топологии СБИС. Тестирование результатов проектирования становится все более ответственным этапом проектирования, где выявляются ошибки проектирования или устанавливается, что описание проекта на уровне транзисторов, которое будет реализовано «в кремнии», полностью соответствует спецификации проектируемого устройства. Известно, что большая часть (до 70 %) времени проектирования сложной системы тратится именно на проведение верификации проектов. Недостатки верификации могут перечеркнуть все усилия разработчиков, нарушить сроки проектирования и, что наиболее важно, обусловить в результате получение ненадежного устройства. Традиционный метод проверки схем переключательного уровня путем их моделирования является очень дорогим с точки зрения необходимых вычислительных ресурсов, так как симуляторы схем на уровне транзисторов, например SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), позволяют анализировать схемы с относительно небольшим числом транзисторов (несколько десятков тысяч), что ограничивает их использование для анализа современных СБИС.

В то же время средства моделирования и верификации схем на логическом уровне позволяют анализировать схемы больших размеров. Важными инструментами автоматизированного проектирования и верификации СБИС служат средства построения иерархического структур-

ного описания на уровне логических элементов по плоскому структурному описанию схем на транзисторном уровне. Операция, в результате которой из плоской (одноуровневой) транзисторной схемы строится иерархическая транзисторная, называется декомпиляцией [1]. Декомпиляция транзисторной схемы является не только мощным инструментом верификации топологии, позволяя существенно снизить время ее выполнения (см. [2], URL: www.silvaco.com/content/appNotes/iccad/2-003_LogicGates.pdf), но и основой для генерации тестовых наборов [3], логического перепроектирования (reengineering) интегральных схем [4, 5] и обратного инжиниринга СБИС (hardware reverse engineering) для обнаружения несанкционированных вложений [6, 7].

Декомпиляция позволяет выделять блоки, являющиеся сетями логических элементов, которые могут быть описаны на языках высокого уровня. В процессе декомпиляции из плоской транзисторной схемы строится двухуровневая транзисторная схема. Второй уровень такой схемы составляют подсхемы из транзисторов, реализующие логические элементы. После построения логической сети исходя из иерархической транзисторной схемы, появляется возможность распознавания в ней более сложных элементов, если известна библиотека стандартных ячеек.

В настоящей работе рассматриваются задачи, возникающие при декомпиляции транзисторной схемы: распознавание КМОП-вентилей в плоской транзисторной схеме, формирование библиотеки распознанных вентиляей и построение двухуровневой транзисторной схемы. Получаемая двухуровневая схема может содержать не только распознанные КМОП-вентили, но и выделенные при декомпиляции псевдоэлементы (не являющиеся КМОП-вентильями), а также отдельные транзисторы.

Постановка задачи. Существуют разные стили реализации логических элементов, например статическая (static) и динамическая (dynamic) логика, домино (domino), передаточная логика (pass transistor logic), каскадная логика переключателя напряжения (CVSL) [8]. Простейшая цифровая схема состоит из одного МОП-транзистора, который осуществляет управляемую передачу двоичного сигнала и является пассивным элементом, не обеспечивающим усиление входного сигнала.

Усиление двоичных сигналов обеспечивает комплементарная МОП-структура (КМОП-вентиль), которая в настоящее время является наиболее распространенным стилем логики. Комплементарные МОП-структуры относятся к широкому классу логических схем, называемых статическими схемами, в которых в каждый момент времени каждый выход элемента соединяется либо с шиной питания V_{dd} , либо с шиной земли Gnd через тракт с малым сопротивлением. Статические логические вентиля представляют собой группу транзисторов, соединенных по постоянному току, т. е. транзисторов, соединенных через исток и сток с шинами питания и земли (рис. 1). Выходы таких элементов в любой момент времени описываются булевыми функциями, реализуемыми их схемой (игнорируя переходные эффекты во время подключения).

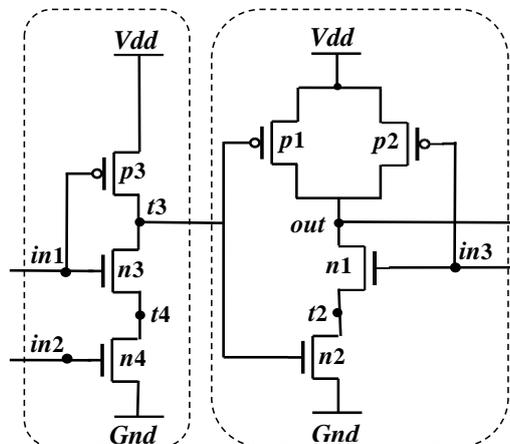


Рис. 1. Транзисторная схема: выделение групп транзисторов, связанных по току

Fig. 1. Transistor circuit: finding groups of channel connected transistors

Статическая КМОП-схема включает две подсхемы, состоящие из p -МОП- и n -МОП-транзисторов соответственно. Первый блок размещен между выходным полюсом (цепь *out* на рис. 1) и шиной земли, второй – между шиной питания и выходом. Блоки обеспечивают связь выходного полюса схемы либо с источником питания *Vdd*, либо с землей *Gnd*, что достигается комплементарностью p -МОП- и n -МОП-подсхем. Комплементарность отличает статические КМОП-схемы от динамических КМОП-схем, в которых используется эффект временного запоминания значений сигнала в емкости узлов схемы с высоким импедансом.

Предложенный метод распознавания подсхем [1] извлекает структуру функционального уровня из схемы транзисторного уровня, собирая транзисторы в подсхемы, когда библиотека логических элементов неизвестна. Сначала выполняется предварительная обработка схемы, в ходе которой ищутся некоторые стандартные фрагменты транзисторной схемы. Например, осуществляется поиск групп идентичных МОП-транзисторов (с одинаковыми сигналами, подаваемыми на их затворы), соединенных последовательно или параллельно, и идентификация передаточных элементов. Затем используется структурный подход: распознаются группы транзисторов, связанных по постоянному току, и среди них выделяются те, которые представляют собой КМОП-вентили. И, наконец, на множестве оставшихся транзисторов ищутся и выделяются в качестве псевдоэлементов часто встречающиеся транзисторные подсхемы, при этом схема разбивается на минимальное количество классов функционально идентичных псевдоэлементов.

В настоящей статье рассматриваются задачи и графовые методы их решения, возникающие на этапе структурного распознавания КМОП-вентилей в транзисторной схеме.

Задание транзисторных схем. Исходная плоская и полученная двухуровневая транзисторные схемы представляются в формате SPICE. В этом формате электрические элементы схемы состоят из элементов, соединенных друг с другом цепями. Главной частью описания схемы в формате SPICE является список транзисторов, в котором для каждого вывода транзистора (сток, затвор, исток, подложка) указано имя цепи, соединяющей его с остальными частями схемы. Общая форма описания связей униполярного транзистора в формате SPICE имеет вид

$$\langle \text{name} \rangle \langle \text{nd} \rangle \langle \text{ng} \rangle \langle \text{ns} \rangle \langle \text{nb} \rangle \langle \text{model-name} \rangle,$$

где *name* – название транзистора; *nd*, *ng*, *ns* и *nb* – идентификаторы цепей, связанных с выводами стока (*drain*), затвора (*gate*), истока (*source*) и подложки (*substrate*) соответственно; *model-name* – тип транзистора: n -МОП или p -МОП (*nmos* или *pmos*).

Например, транзисторная схема в формате SPICE (см. рис. 1) представлена на листинге 1. Здесь первая и последняя строки – это начальная и конечная строки описания. Остальные четыре строки начинаются с названий двух p -МОП- и двух n -МОП-транзисторов. В каждой строке после названия транзистора представлены метки цепей, связанные с выводами стока, затвора, истока и подложки.

Листинг 1. SPICE-описание схемы из транзисторов

```
.GLOBAL Gnd Vdd
.SUBCKT GG0 in1 in2 in3 out
Mn1 out in3 t2 Gnd nmos
Mn2 t2 t3 Gnd Gnd nmos
Mn3 t3 in1 t4 Gnd nmos
Mn4 t4 in2 Gnd Gnd nmos
Mp1 out t3 Vdd Vdd pmos
Mp2 out in3 Vdd Vdd pmos
Mp3 t3 in1 Vdd Vdd pmos
.ENDS

Circuit GG0 contains 7 device instances.
  Class: pmos           instances: 3
  Class: nmos           instances: 4
Circuit contains 9 nets.
```

Цепи $in1$, $in2$ и $in3$ задают входы, out – выход, $t2$, $t3$ и $t4$ – внутренние цепи транзисторной схемы, Vdd и Gnd – цепи вывода питания и земли. Например, описание экземпляра транзистора ($Mr1\ out\ t3\ Vdd\ Vdd\ pmos$) является сокращенным обозначением пар связей ($Mr1.d, out$), ($Mr1.g, t3$), ($Mr1.s, Vdd$), ($Mr1.b, Vdd$), в котором имя $Mr1$ p -МОП-транзистора вынесено, а имена его выводов опущены, но цепи перечислены в заранее определенной последовательности.

Естественной формальной моделью транзисторной схемы является гиперграф, в котором вершины соответствуют устройствам, а ребра – их соединениям. Однако для целей декомпиляции транзисторных схем более удобной и компактной моделью является неориентированный двудольный граф $G = (V_1, V_2, E)$, $V_1 \cap V_2 = \emptyset$. Этот граф задает структуру транзисторной схемы. В нем вершины разделены на два непересекающихся подмножества V_1 и V_2 . Каждое ребро $e \in E$ графа имеет один конец в V_1 , а другой в V_2 . Одну долю графа (подмножество V_1) составляют вершины, соответствующие выводам транзисторов и портам схемы (входам и выходам электрической схемы), а другую (подмножество V_2) – вершины, соответствующие цепям, т. е. связям между выводами транзисторов. Число вершин в графе G зависит от числа транзисторов (каждый вывод транзистора соответствует вершине из V_1) и числа цепей (каждая цепь соответствует вершине из V_2) в списке соединений. Примерами цепей являются цепи питания и земли, которые связаны с большим числом элементов схемы.

На рис. 2 изображен граф $G = (V_1, V_2, E)$, задающий приведенную выше транзисторную схему. Здесь $V_1 = \{p1.d, p1.g, p1.s, p2.d, p2.g, p2.s, p3.d, p3.g, p3.s, n1.d, n1.g, n1.s, n2.d, n2.g, n2.s, n3.d, n3.g, n3.s, n4.d, n4.g, n4.s\}$, $V_2 = \{Vdd, Gnd, in1, in2, in3, out, t2, t3, t4\}$.

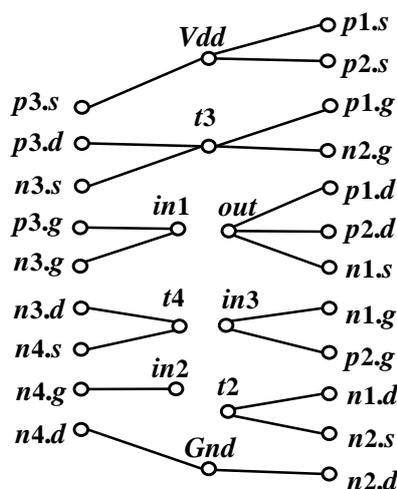


Рис. 2. Граф $G = (V_1, V_2, E)$, задающий структуру транзисторной схемы
Fig. 2. Graph $G = (V_1, V_2, E)$ defining the structure of the transistor circuit

Для современных СБИС число вершин в графе может достигать десятков миллиардов. Доля V_1 выводов транзисторов двудольного графа состоит из вершин степени 1. В доле V_2 цепей каждой цепи соответствует компонента связности двудольного графа и степени вершин в основном невелики. Таким образом, помеченный граф, моделирующий транзисторную схему, является разреженным. Кроме того, этот граф связный (любая пара вершин в графе связана цепью).

Распознавание групп транзисторов, связанных по постоянному току. Для построения иерархического структурного описания транзисторной схемы необходимо выделить в ней наборы взаимосвязанных транзисторов в качестве отдельных компонентов, реализующих логические элементы, т. е. выделить подсхемы в исходной схеме.

Статическая МОП-схема имеет четко определенную структуру, и подсхема, реализующая логический элемент, представляет собой группу транзисторов, связанных по току (channel-connected component) [9]). Такая подсхема состоит из транзисторов, соединенных выводами истока и стока. Она обеспечивает путь прохождения сигнала между шинами питания Vdd и земли Gnd .

Группой транзисторов, соединенных по постоянному току, является произвольная схема из МОП-транзисторов с тремя типами внешних соединений:

- входы группы подаются только на затворы транзисторов группы;
- выходы группы подаются только на затворы транзисторов других групп;
- имеются связи транзисторов группы с шинами питания Vdd и земли Gnd .

Из приведенного определения группы транзисторов, связанных по току, следует, что соответствующий ей граф является связным двудольным подграфом $G_i = (V_{i1}, V_{i2}, E_i)$ неориентированного двудольного графа $G = (V_1, V_2, E)$ транзисторной схемы, а множества ребер E_i и E_j ($i \neq j$) любой пары подграфов не должны пересекаться.

Множество групп транзисторов, связанных по току, представляет собой разбиение множества транзисторов схемы (см. рис. 1).

Таким образом, в графовой интерпретации задача поиска групп транзисторов, связанных по току, состоит в разбиении неориентированного двудольного графа $G = (V_1, V_2, E)$ на связные реберно-непересекающиеся подграфы. Эта задача сводится к нахождению компонент связности графа $H = (V_1^H, V_2^H, E^H)$ связей транзисторов по току (рис. 3), который получается из графа $G = (V_1, V_2, E)$ путем:

- удаления вершин, соответствующих выводам затворов транзисторов (и соответствующих цепей);
- удаления вершин, соответствующих цепям питания (Vdd и Gnd);
- соединения вершин $G = (V_1, V_2, E)$, соответствующих выводам стока и истока для каждого транзистора, ребром соответствующей цепи, связанной с выводом затвора данного транзистора.

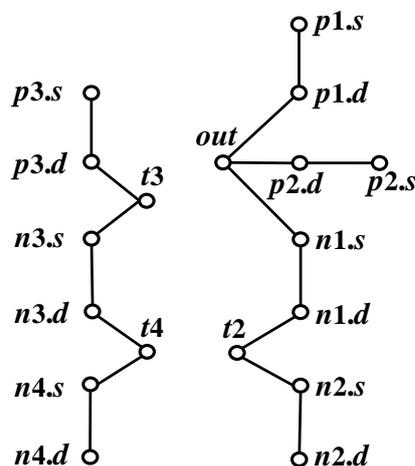


Рис. 3. Граф $H = H = (V_1^H, V_2^H, E^H)$ связей транзисторов по току

Fig. 3. Graph $H = H = (V_1^H, V_2^H, E^H)$ transistor current connections

Группа транзисторов, соединенных по постоянному току, соответствует компоненте связности графа $H = (V_1^H, V_2^H, E^H)$ связей транзисторов по току. Алгоритм поиска компонент связности в графе H построен на основе алгоритма «поиск сначала в глубину» (depth-first search, DFS).

В результате работы алгоритма получаются две компоненты связности, порождающие следующие подграфы графа $G = (V_1, V_2, E)$:

$$G_1 = (V_1^1, V_2^1, E^1),$$

где $V_1^1 = \{p3.d, p3.g, p3.s, n3.g, n3.s, n4.d, n4.g, n4.s\}$; $V_2^1 = \{Vdd, in1, in2, t3, t4\}$; $E^1 = \{(p3.d, t3), (p3.g, in1), (p3.s, Vdd), (n3.d, t4), (n3.g, in1), (n3.s, t3), (n4.d, Gnd), (n4.g, in2), (n4.s, t4)\}$;

$$G_2 = (V_1^2, V_2^2, E^2),$$

где $V_1^2 = \{p1.d, p1.g, p1.s, p2.d, p2.g, p2.s, n1.d, n1.g, n1.s, n2.d, n2.g, n2.s\}$; $V_2 = \{Vdd, Gnd, in3, out, t2, t3\}$; $E^2 = \{(p1.d, out), (p1.g, t3), (p1.s, Vdd), (p2.d, out), (p2.g, in3), (p2.s, Vdd), (n1.d, t2), (n1.g, in3), (n1.s, out), (n2.d, Gnd), (n2.g, t3), (n2.s, t2)\}$.

Две группы связанных по току транзисторов, соответствующие найденным подграфам, показаны на рис. 1.

Распознавание подсхем, реализующих КМОП-вентили. Статический КМОП-вентиль содержит n - и p -подсхемы, состоящие соответственно из n -МОП- и p -МОП-транзисторов. Эти подсхемы включены последовательно между цепями питания и разделены выходной цепью. Потенциал выхода элемента к цепи земли «подтягивает» n -МОП-блок (pull-down network), потенциал выхода элемента к цепи питания – p -МОП-блок (pull-up network). На рис. 4 приведен пример КМОП-вентили и показаны его n -МОП- и p -МОП-блоки.

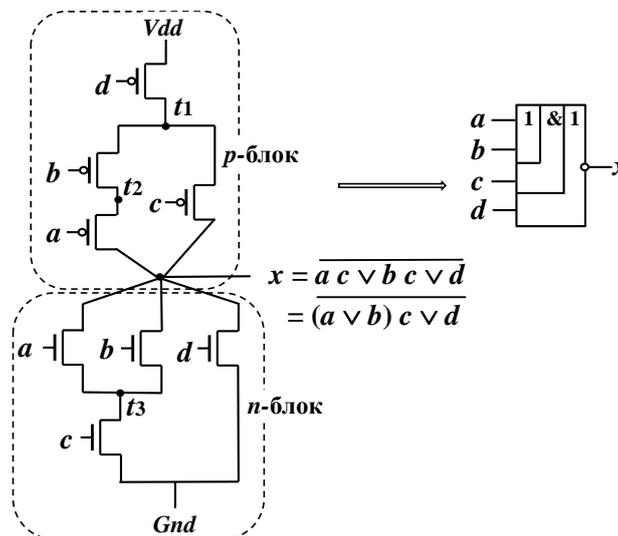


Рис. 4. Пример КМОП-вентили: транзисторная схема и ее обозначение

Fig. 4. CMOS gate example: transistor circuit and its designation

Проводимости блоков КМОП-вентили комплементарны, поэтому на каждом такте работы схемы обеспечивается связь выходного полюса схемы либо с источником питания, либо с землей. КМОП-вентиль реализует на своем выходе отрицание функции проводимости транзисторов n -МОП-блока или функцию проводимости p -МОП-блока при инвертировании входных переменных.

Схема КМОП-вентили представляет собой группу транзисторов, связанных по току, обратное не всегда верно. Группа транзисторов, связанных по току, реализует КМОП-вентиль, если удовлетворяет следующим условиям:

- 1) транзисторы p -блока расположены между цепью Vdd и цепью выхода группы, а транзисторы n -блока – между цепями выхода и Gnd ;
- 2) все пути из цепи выхода доходят до цепей питания (Gnd или Vdd), и наоборот;
- 3) p - и n -блоки группы имеют одинаковое количество транзисторов;
- 4) p - и n -блоки группы реализуют взаимно инверсные функции.

Например, левая из двух обозначенных на рис. 1 групп транзисторов, связанных по току, удовлетворяет первым трем условиям, а правая – нет. Эти же условия выполняются и для схемы на рис. 4. Остается проверить выполнение условия 4.

Логическая функция, реализуемая КМОП-вентилем, определяется отрицанием функции проводимости транзисторов n -МОП-блока (или функцией проводимости p -МОП-блока при инвертировании входных переменных). Проводимость отдельного транзистора управляется его входной переменной, которая определяется цепью, связанной с затвором этого транзистора. Проводимость n -МОП-блока (p -МОП-блока) определяется проводимостью путей от цепи выхода вентиля до цепи Gnd (Vdd). Проводимость каждого пути n -МОП-блока задается конъюнкцией входных переменных, управляющих проводимостью транзисторов, входящих в этот путь, а проводимость p -МОП-блока – конъюнкцией отрицаний входных переменных, управляющих проводимостью транзисторов. Проводимость блока (f_n или f_p) представляется в виде дизъюнктивной нормальной формы (ДНФ), порождаемой проводимостями всех путей блока. Если функции проводимости f_n и f_p n -МОП- и p -МОП-блоков взаимно инверсны ($f_n = \overline{f_p}$), то анализируемая группа транзисторов, связанных по току, представляет собой КМОП-вентиль, а сам КМОП-вентиль реализует функцию $\overline{f_n}$.

В графовой постановке эта задача сводится к поиску цепей, связывающих вершины, на графе $I = (V_1^I, V_2^I, E^I)$ проводимости транзисторной схемы – графе с помеченными ребрами. Этот граф получается из графа $G = (V_1, V_2, E)$, задающего структуру транзисторной схемы, путем:

- удаления вершин, соответствующих выводам затворов транзисторов (и соответствующих цепей);

- соединения вершин графа $G = (V_1, V_2, E)$, соответствующих выводам стока и истока для каждого транзистора, ребром, которое помечается вершиной графа G , соответствующей цепи, связанной с выводом затвора данного транзистора.

На рис. 5 приведены графы $I_1 = (V_{11}^I, V_{21}^I, E^I_1)$ и $I_2 = (V_{12}^I, V_{22}^I, E^I_2)$ проводимости для правой группы транзисторов схемы на рис. 1 и схемы на рис. 4.

Единственная цепь (out, in_3, t_2, t_3, Gnd), связывающая вершины out и Gnd графа $I_1 = (V_{11}^I, V_{21}^I, E^I_1)$, порождает реализуемую n -блоком функцию проводимости $f_n = in_3 t_3$. Цепи (out, t_3, Vdd) и (out, in_3, Vdd), связывающие вершины out и Vdd графа, порождают реализуемую p -блоком функцию проводимости $f_p = \overline{t_3} \vee \overline{in_3}$. Поскольку $f_n = \overline{f_p}$, правая подсхема на рис. 1, являющаяся группой связанных по току транзисторов, представляет собой стандартный КМОП-вентиль 2И-НЕ, реализующий функцию $\overline{f_n} = \overline{in_3 \wedge t_3}$.

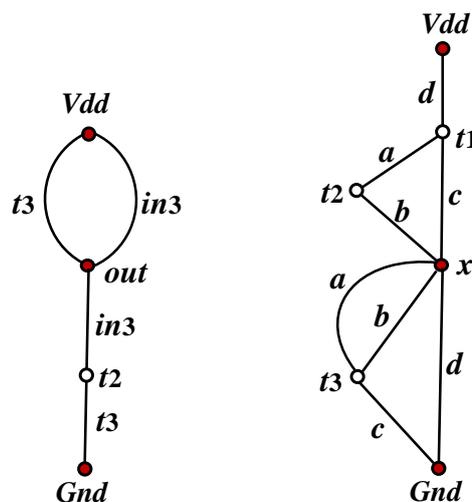


Рис. 5. Графы $I_1 = (V_{11}^I, V_{21}^I, E^I_1)$ и $I_2 = (V_{12}^I, V_{22}^I, E^I_2)$ проводимости транзисторных схем
Fig. 5. Graph $I_1 = (V_{11}^I, V_{21}^I, E^I_1)$ and $I_2 = (V_{12}^I, V_{22}^I, E^I_2)$ of transistor circuit conductivity

Цепи (x, a, t_3, c, Gnd) , (x, b, t_3, c, Gnd) , (x, d, Gnd) , связывающие вершины x и Gnd графа $I_2 = (V_{12}^I, V_{22}^I, E_2^I)$, порождают реализуемую n -блоком схемы (см. рис. 4) функцию проводимости $f_n = a c \vee b c \vee d$. Цепи $(x, b, t_2, a, t_1, d, Vdd)$, (x, c, t_1, d, Vdd) , связывающие вершины x и Vdd графа, порождают реализуемую p -блоком функцию проводимости $f_p = a \bar{b} \bar{d} \vee c \bar{d}$. Равенство $f_n = f_p$ означает, что рассматриваемая транзисторная схема представляет собой стандартный КМОП-вентиль, реализующий функцию $f = \overline{f_n} = \overline{ac \vee bc \vee d}$.

Классификация КМОП-вентилей. Множество КМОП-вентилей может быть разбито на классы, объединяющие функционально идентичные вентиля, которые реализуют одну и ту же логическую функцию.

Для классификации КМОП-вентилей, распознанных в процессе декомпиляции транзисторной схемы, ДНФ реализуемых ими функций представляется в виде алгебраических скобочных выражений. Такая форма строится путем алгебраической факторизации ДНФ, выполняемой путем вынесения за скобки общих литералов [10]. Приведем алгебраическое представление функции $f = \overline{ac \vee bc \vee d}$ рассматриваемого КМОП-вентиля (см. рис. 4) после факторизации:

$$f = \overline{ac \vee bc \vee d} = \overline{(a \vee b)c \vee d}.$$

Следовательно, распознанный КМОП-вентиль реализует функцию 2ИЛИ-2И-2ИЛИ-НЕ.

Все распознанные в процессе декомпиляции плоской транзисторной схемы КМОП-вентиля, которые реализуют функции, описываемые одной и той же скобочной формой, являются функционально эквивалентными. Каждый класс таких функционально эквивалентных вентилей порождает один библиотечный элемент, а соответствующие подсхемы в иерархическом SPICE-описании заменяются ссылками на этот элемент.

Формирование библиотеки вентилей происходит во время работы программы декомпиляции. Исходными данными для программы декомпиляции служат плоский нетлист КМОП-схемы в формате SPICE, имя головной схемы и имена цепей питания. Результатом является двухуровневая транзисторная схема, представляемая иерархическим SPICE-описанием, в которое включены модели всех идентифицированных КМОП-вентилей. Эти модели и составляют извлеченную библиотеку вентилей.

В приведенной выше транзисторной схеме GG0 (см. рис. 1 и листинг 1) в качестве КМОП-вентиля распознается только одна подсхема, реализующая вентиль 2И-НЕ (правая группа транзисторов, связанных по току, на рис. 1). Для нее в результирующую двухуровневую схему GG0 (листинг 2) вводится библиотечный элемент G0, внешние полюсы которого условно именуется А и В (входы), Y (выход). Не распознанная как КМОП-вентиль группа транзисторов, связанных по току, выделяется как псевдоэлемент P0_0, внешние полюсы которого именуется P0, P1, P2.

Листинг 2. SPICE-описание двухуровневой транзисторной схемы

```

Contents of circuit cldG0.sp:  Circuit: 'GG0'
Circuit GG0 contains 7 device instances.
  Class: pmos                instances:   3
  Class: nmos                instances:   4
Circuit contains 9 nets.

Connected Componens = 2
Invalid comps
Valid Componens = 1
Pass fets = 0
Psevdo Componens = 1 nets =4
Unclassified fets = 0 nets = 0

(A AND B)          1
Psevdo
(3) (4)            1

```

```

Defining cell: GG0_gen
  Defining global node: Gnd
  Defining global node: Vdd
Start of Computation: 15h07m55s 27/08/2021
End of Computation: 15h07m55s 27/08/2021
Computation Time (s): 0.0050

.SUBCKT G0 A B Y
* (A AND B)
M1 Y A 2 Gnd nmos
M2 2 B Gnd Gnd nmos
M3 Y B Vdd Vdd pmos
M4 Y A Vdd Vdd pmos
.ENDS

.SUBCKT P0_0 P0 P1 P2
* (3) (4)
M1 P0 P1 2 Gnd nmos
M2 2 P2 Gnd Gnd nmos
M3 P0 P1 Vdd Vdd pmos
.ENDS

.SUBCKT GG0_gen in1 in2 in3 out
XM0I1 in3 t3 out G0 Fets=nmosn1+nmosn2+pmosp1+pmosp2
XMP0I1 t3 in1 in2 P0_0 Fets=nmosn3+nmosn4+pmosp3
.ENDS

```

Некоторые результаты применения предложенного структурного метода распознавания КМОП-вентилей в плоской транзисторной схеме показаны в таблице для нескольких практических примеров. В таблице приведено число *n*-МОП- и *p*-МОП-транзисторов (второй столбец), число выделенных передаточных элементов в схеме (третий столбец), число найденных групп транзисторов, связанных по току (четвертый столбец), число распознанных КМОП-вентилей (пятый столбец) и число групп функционально эквивалентных КМОП-вентилей (шестой столбец). Последний столбец таблицы показывает, что некоторые схемы содержат транзисторы и другие примитивы, не объединяемые в группы элементов, связанных по току.

Данные экспериментальных исследований
Experimental Research Data

Схема <i>Scheme</i>	<i>n</i> -МОП-, <i>p</i> -МОП- транзисторы <i>n</i> -MOS-, <i>p</i> -MOS- transistors	Передаточные элементы <i>Transmission</i> <i>elements</i>	Группы транзисторов <i>Groups of</i> <i>transistors</i>	КМОП- вентили <i>CMOS</i> <i>valves</i>	Классы КМОП- вентилей <i>Classes of CMOS</i> <i>valves</i>	Непокрытая часть <i>Uncovered</i> <i>part</i>
DV	22 988, 16 436	766	7093	5915	39	283
sinxr	87, 87	0	40	40	7	0
IZ	3016, 2381	89	1325	1041	15	83
T9	1682, 1269	0	682	528	16	110
flat	5776, 5827	25	3007	2392	7	409
control	9415, 9415	1374	6639	6639	16	0
delta	5962, 5947	661	2896	2777	17	17

Заключение. Предложенные графовые методы структурного распознавания КМОП-вентилей реализованы на языке C++ как часть программы декомпиляции плоской транзисторной схемы. Программа была протестирована на практических схемах транзисторного уровня и имеет достаточное быстродействие, чтобы обрабатывать схемы более чем со 100 тыс. транзисторов за несколько минут на персональной ЭВМ.

В программе используется внутреннее представление транзисторной схемы, оптимальное с точки зрения требуемого объема памяти и скорости обработки. Оно состоит из графовой модели SPICE-описания схемы и иерархической хеш-таблицы для хранения синтаксических элементов этой схемы. Сложность такого представления оценивается как $O(n)$, где n – количество элементов схемы. Все шаги предлагаемых графовых методов структурного распознавания КМОП-вентилей в плоской транзисторной схеме выполняются за линейное время от числа транзисторов исходной схемы.

Вклад авторов. Л. Д. Черемисинова приняла участие в разработке метода решения задачи распознавания логических вентилях и подготовила текст статьи. Д. И. Черемисинов разработал и программно реализовал метод решения задачи распознавания логических вентилях в плоской транзисторной схеме, провел экспериментальные исследования.

Список использованных источников

1. Cheremisinov, D. I. Extracting a logic gate network from a transistor-level CMOS circuit / D. I. Cheremisinov, L. D. Cheremisinova // *Russian Microelectronics*. – 2019. – Vol. 48, no. 3. – P. 187–196. <https://doi.org/10.1134/S0544126919030037>
2. Abadir, M. S. An improved layout verification algorithm (LAVA) / M. S. Abadir, J. Ferguson // *Proc. of the European Design Automation Conf., Glasgow, UK, 12–15 March 1990*. – Glasgow, 1990. – P. 391–395.
3. Kundu, S. GateMaker: A transistor to gate level model extractor for simulation, automatic test pattern generation and verification / S. Kundu // *Proc. of the Intern. Test Conf., Washington, DC, USA, 18–23 Oct. 1998*. – Washington, 1998. – P. 372–381.
4. Hunt, V. D. Reengineering: Leveraging the Power of Integrated Product Development / V. D. Hunt. – Wiley, 1993. – 283 p.
5. Framework for simulation of the Verilog/SPICE mixed model: Interoperation of Verilog and SPICE simulators using HLA/RTI for model reusability / M. G. Seok [et al.] // *22nd Intern. Conf. on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), Playa del Garmen, Mexico, 6–8 Oct. 2014*. – Playa del Garmen, 2014. – P. 1–6.
6. Белоус, А. И. Основы кибербезопасности. Стандарты, концепции, методы и средства обеспечения / А. И. Белоус, В. А. Солoduха. – М. : Техносфера, 2021. – 482 с.
7. Zhang, T. A comprehensive FPGA reverse engineering tool-chain: From bitstream to RTL code / T. Zhang, L. Wang // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 38379–38389. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2901949>
8. Rabaev, J. M. Digital Integrated Circuits / J. M. Rabaev, A. Chandrakasan, B. Nikolic. – Prentice Hall Press, 2008. – 702 p.
9. Bushnell, M. Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory and Mixed-Signal VLSI / M. Bushnell, V. Agrawal. – Springer Science & Business Media, 2006. – 690 p.
10. Черемисинова, Л. Д. Синтез и оптимизация комбинационных структур СБИС / Л. Д. Черемисинова. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – 235 с.

References

1. Cheremisinov D. I., Cheremisinova L. D. Extracting a logic gate network from a transistor-level CMOS circuit. *Russian Microelectronics*, 2019, vol. 48, no. 3, pp. 187–196. <https://doi.org/10.1134/S0544126919030037>
2. Abadir M. S., Ferguson J. An improved layout verification algorithm (LAVA). *Proceedings of the European Design Automation Conference (EURO-DAC'90), Glasgow, UK, 12–15 March 1990*. Glasgow, 1990, pp. 391–395.
3. Kundu S. GateMaker: A transistor to gate level model extractor for simulation, automatic test pattern generation and verification. *Proceedings of the International Test Conference, Washington, DC, USA, 18–23 October 1998*. Washington, 1998, pp. 372–381.
4. Hunt V. D. *Reengineering: Leveraging the Power of Integrated Product Development*. Wiley, 1993, 283 p.
5. Seok M. G., Park D. J., Cho G. R., Kim T. G. Framework for simulation of the Verilog/SPICE mixed model: Interoperation of Verilog and SPICE simulators using HLA/RTI for model reusability. *22nd International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC), Playa del Garmen, Mexico, 6–8 October 2014*. Playa del Garmen, 2014, pp. 1–6.

6. Belous A. I., Solodukha V. A. Osnovy kiberbezopasnosti. Standarty, kontseptsii, metody i sredstva obespecheniya. *Fundamentals of Cybersecurity. Standards, Concepts, Methods and Means of Support*. Moscow, Tekhnosfera, 2021, 482 p. (In Russ.).
7. Zhang T., Wang L. A comprehensive FPGA reverse engineering tool-chain: From bitstream to RTL code. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 38379–38389. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2901949>
8. Rabaev J. M., Chandrakasan A., Nikolic B. *Digital Integrated Circuits*. Prentice Hall Press, 2008, 702 p.
9. Bushnell M., Agrawal V. *Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory and Mixed-Signal VLSI*. Springer Science & Business Media, 2006, 690 p.
10. Cheremisinova L. D. Sintez i optimizatsiya kombinatsionnykh struktur SBIS. *Synthesis and Optimization of Combinational Structures of VLSI*. Minsk, Ob"edinennyj institut problem informatiki Nacional'noj akademii nauk Belarusi, 2005, 235 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Черемисинов Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: cher@newman.bas-net.by

Черемисинова Людмила Дмитриевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: cld@newman.bas-net.by

Information about the authors

Dmitry I. Cheremisinov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.

E-mail: cher@newman.bas-net.by

Ljudmila D. Cheremisinova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: cld@newman.bas-net.by

УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ SCIENTISTS OF BELARUS

Геннадий Римский – крупный ученый, поэт, переводчик (19.09.1936–23.08.2000)

«Без огня в душе я жить не могу.
Во мне живет дух поэта...»

В сфере науки и образования СССР и Беларуси привычно говорить о Геннадии Васильевиче Римском прежде всего как об известном ученом в области технической кибернетики, информатики, автоматического управления, интеллектуальных систем. И это логично по отношению к доктору технических наук, профессору, члену-корреспонденту Академии наук Беларуси, лауреату ее премии, отдавшему научной деятельности более 40 лет. Он автор семи монографий (одна из них переведена и издана в США), десятков брошюр и препринтов, сотен статей и докладов на международных и всесоюзных научно-технических конференциях, 30 изобретений новых устройств и систем, свидетельства на промышленный образец. Геннадий Васильевич подготовил двух докторов, 19 кандидатов наук, его подпись как председателя ГЭК стоит на сотнях дипломов выпускников БГУИР.

Подробное научное наследие Г. В. Римского представлено в журнале «Информатика» (№ 4(52), 2016), книгах «Наука Беларуси в XX столетии» (2001), «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники: история в биографиях» (2004), «Объединенный институт проблем информатики: 40 лет» (2005). Однако жизненный путь Геннадия Римского, его активная общественная работа, а также интересная литературная деятельность освещены слабо.

Геннадий Римский родился в 1936 г. в Сталинграде в семье инженера тракторного завода Василия Константиновича и учительницы русского языка и литературы Татьяны Яковлевны. В доме часто звучали пушкинские и лермонтовские поэмы, стихи, сказки. Счастливое и беззаботное детство Геннадия на Волге прервала война, об ужасах которой он позже расскажет в своей поэме из книги «Я есть!» (М., 2000). В Институте технической кибернетики (ныне Объединенный институт проблем информатики (ОИПИ) НАН Беларуси) на стенде ветеранов вместе с фотографиями участников Великой Отечественной войны многие годы размещались отрывки из названной поэмы, с которыми знакомился весь коллектив. В 1942 г. родилась сестра Геннадия Юлия. Во время войны отец пропал на заводе, дети прятались от бомб в подвалах. Наконец семье с трудом удалось эвакуироваться в Свердловск, где Геннадий в 1944 г. пошел в школу и окончил три класса. Вскоре отца как члена КПСС направили на Минский тракторный завод заместителем главного технолога, где позже он работал начальником цеха и начальником производства, был также управляющим предприятия «Белсельхозтехника» и доцентом Белорусского института механизации и электрификации сельского хозяйства.

В Минске Геннадий продолжил учебу в СШ № 11 в тракторозаводском поселке. Как сын специалиста, направленного на МТЗ, и как школьник, приехавший из России, согласно принятым в БССР правилам он освобождался от необходимости изучать белорусский язык. Эта привилегия для многих учащихся была желанной, так как оставляла больше свободного времени на увлечения и отдых. Родители детей приезжали в Минск из разных городов СССР, были, как правило, руководителями и не стремились изучать (и не учили своих детей) культуру, обычаи и язык белорусов. Геннадия же белорусский язык заинтересовал. Родители поддержали сына и оказались правы.

Через многие годы Геннадий Васильевич благодаря своим переводам белорусских поэтов вошел в сообщество литераторов Беларуси, стал известен среди писателей России и иных творческих людей. В этом была большая заслуга любимого учителя-белорусоведа Михаила Степановича Монака, умевшего увлечь школьников прекрасными строками М. Богдановича, Я. Купалы, Я. Коласа, знаменитых на то время анонимных поэм «Тарас на Парнасе» и «Энеида навыворот» (фамилии авторов были позже установлены – Викентий Ровинский и Константин Вереницын).

Михаил Степанович был еще и неординарным человеком (в годы войны – подпольщик, узник фашистского концлагеря). Именно классному руководителю и своим одноклассникам Геннадий Васильевич вручил свою первую книгу «Белорусская лирика XIX – XX веков» (М., Русский двор, 1998) с благодарственной подписью. Это произошло в апреле 2000 г. в квартире М. С. Монака, который не скрывал радости и гордости за своего ученика. Татьяна Ульянова, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник ИОНХ НАН Беларуси, вспоминает, что этой эмоциональной встречи им не забыть никогда. Через несколько недель в августе того же года одноклассники попрощались со своим талантливым другом и сочинили в его память трогательное, берущее за душу стихотворение.

Упомянутая книга белорусской лирики, как и две антологии, стихотворный роман, книги «Я есть!», «Я люблю», «Жизнь в четвертом измерении», превратилась в библиографическую редкость. В свое время руководство ОИПИ НАН Беларуси, члены ученого совета смогли познакомиться с творчеством писателя, а некоторые и получить личные экземпляры отдельных книг и поэтических антологий Г. В. Римского. Престижно было для института вручить белорусским космонавтам П. И. Климуку, В. В. Коваленку, О. В. Новицкому и начальнику стратегического управления Роскосмоса Ю. Н. Макарову во время проведения Белорусского космического конгресса (2014 г.) двухтомную антологию белорусской поэзии в переводах Г. В. Римского – настоящего патриота Беларуси, совершившего большой человеческий подвиг, не оставившего равнодушными к своим заслугам Беларусь и Россию, ставшего известным в крупнейших библиотеках мира. Из библиотеки Конгресса США вдова ученого М. А. Римская получила благодарность.

Как предсказывала Зинаида Давыдовна Вешнякова, учительница русского языка и литературы СШ № 11, и как публично заявляли знатоки русской и белорусской культуры, известные поэты во время творческих вечеров и презентаций изданных в Москве и Минске книг, литературное наследие Г. В. Римского достойно восхищения.

Получив в начале июля 1954 г. аттестат с серебряной медалью, Геннадий поехал в Ленинград, а оттуда в Гатчину, так как с детства любил море и Волгу. Вскоре он был зачислен в Высшее военно-морское инженерное радиотехническое училище (сейчас Высшее военно-морское училище радиоэлектроники им. А. С. Попова). Курсанты жили в бывшем дворце Павла I. Ленинград, Гатчина с парками, озерами, пушкинские места покорили будущего литератора, который буквально поглощал мировую и отечественную классику, часто посещая театры. Осенью 1955 г. Геннадий участвовал в военном параде в Москве, где училище впервые представляло флот, и получил массу позитивных впечатлений, в том числе от маршала Г. К. Жукова, который в последний раз в своей жизни командовал парадом.

В 1956 г. Геннадий стал писать стихи. Чувства, события в его жизни совпали с периодом обретения свободы нашим обществом. С того времени в течение более 44 лет он сочинял стихи, поэмы, сказки, пробовал многие жанры, в том числе написал драму в стихах «Урод», даже роман в стихах «Поэзия науки», венок сонетов и др. Писательство (поэзия, проза, переводы) стало для Г. В. Римского вторым после науки делом его жизни.

В 1958 г. родители Геннадия получили из ВВМИРТУ благодарственное письмо за воспитание сына (хранится в архиве Белорусского государственного музея белорусской литературы, Минск). Там же в дневниковых записях хранятся сведения о его лечении в 1959 г., когда врачи обнаружили заболевание легких, что послужило основанием для демобилизации инженера-лейтенанта штаба Ленинградской военно-морской базы.

В феврале 1960 г. Геннадий Васильевич пришел работать в Институт математики и вычислительной техники, где создавалась ЭВМ «Луч». Одновременно с наладкой арифметического

устройства этой машины он заинтересовался системами управления, их математическими моделями и получил первые результаты. Так, самостоятельно нашел новое научное направление, его поддержали ученые из Московского государственного университета и Московского авиационного института. В 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1980 г. – докторскую диссертацию в Московском высшем техническом училище им. Баумана (Московский технический университет).

Важно отметить один факт из биографии ученого Г. В. Римского: он не обучался ни в аспирантуре, ни в докторантуре, государство не тратило средств на его подготовку, а Геннадий Васильевич не тратил времени. Он с удовольствием и большой пользой для себя посещал курсы повышения математических знаний научных и инженерно-технических работников в АН БССР (1965–1967). В период научной стажировки в США (1972–1973) углублял знания по компьютерным наукам и английскому языку в Джорджтаунском (Вашингтон) и Калифорнийском (Лос-Анджелес) университетах. На кафедре компьютерных наук Г. В. Римский был первым советским ученым, который подружился с заведующим кафедрой профессором Уолтером Карплюсом. Их сблизила любовь к поэзии Генриха Гейне. Книги Уолтера Карплюса о гибридных вычислительных системах издавались в СССР.

Из предисловия к книге «Я есть!» (М., Русский Двор, 2000): ...Томик стихов белорусского поэта Геннадия Римского – это дань издателей памяти замечательного человека, в 2000 году ушедшего из жизни. Стихи эти несут свет, тепло, доброту и юмор... Поэзия всегда противостояла жестоким временам, даруя людям Веру, Надежду, Любовь.

А. Г. Буравкин, Н. П. Савик

Правила для авторов

Редакция журнала «Информатика» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи принимаются в редакцию через электронную систему подачи по адресу <http://inf.grid.by> в формате файлов текстовых редакторов Microsoft Word. Объем оригинальной статьи – от 8 до 16 стр., включая рисунки, таблицы и достаточное количество наиболее актуальных ссылок; объем обзорной статьи – от 16 до 32 стр., включая все основные ссылки. Текст набирается с переносами, шрифт Times New Roman 11 пт, интервал между строками – одинарный, абзацный отступ 0,5 см, поля по 2,5 см со всех сторон.

Материал статьи должен быть четко структурированным: Введение; основные разделы, в которых изложены цели и задачи, методы, результаты; Заключение (выводы).

II. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на публикацию (сопроводительное письмо за подписью руководителя или выписку из заседания ученого совета, отдела или кафедры, акт экспертизы).

III. Статьи в обязательном порядке должны включать аннотацию, ключевые слова, список литературы, информацию об авторах на русском и английском языках.

На титульной странице располагаются следующие метаданные:

1. Индекс по универсальной десятичной классификации (УДК); на русском и английском языках тип статьи (оригинальная или обзорная), название статьи, инициалы и фамилии всех авторов, полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием почтового адреса, при наличии указывается ученая степень и ORCID, e-mail ответственного лица.

2. Аннотация (Abstract) объемом 150–250 слов в оригинальной статье должна быть структурирована отдельными подразделами: Цели, Методы, Результаты, Заключение, а также максимально характеризовать содержательную часть рукописи. Сюда не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

3. Ключевые слова (Keywords) – наиболее значимые слова или словосочетания по теме работы, отражающие специфику темы, объекты и результаты исследования; перечень ключевых слов должен содержать 5–10 слов.

4. В разделе Благодарности (Acknowledgements) указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей.

5. Автор обязан уведомить редакцию о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию в раздел Конфликт интересов (Conflict of interest).

6. Формулы, рисунки, таблицы в статье нумеруются в соответствии с порядком их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки и таблицы в тексте обязательны. Рисунки должны быть выполнены с хорошим разрешением в масштабе, позволяющем четко различать надписи и обозначения. Цветные иллюстрации печатаются только в том случае, когда это необходимо для понимания излагаемого материала. Подрисуночные подписи с расшифровкой всех позиций, представленных на рисунке, и названия таблиц набираются шрифтом гарнитуры основного текста размером 9 пт. Перевод подрисуночной подписи и пояснений к рисунку, а также перевод названия таблицы, заголовки строк или столбцов располагаются курсивом после русскоязычной версии.

7. Набор формул выполняется в формульном редакторе Microsoft Equation или Math Type. Прямым шрифтом набираются: греческие и русские буквы; математические символы (\sin , \lg , ∞); символы химических элементов (C, Cl, CH₃); цифры (римские и арабские); индексы (верхние и нижние), являющиеся сокращениями слов. Курсивом набираются латинские буквы, символы физических величин (в том числе и в индексе).

8. Список использованной литературы оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.5–2008). Номер литературной ссылки в тексте дается порядковым номером в квадратных скобках. Ссылаться на неопубликованные работы не допускается.

10. Отдельно оформляется References со следующей структурой: авторы (транслитерация), транслитерированное название монографии, *Перевод названия монографии на английский язык*. Выходные данные с обозначениями на английском языке. От транслитераций названий статей можно отказаться.

Ссылки на учебно-методическую литературу, ГОСТы, авторефераты, статистические отчеты в список не включаются, а оформляются в виде сносок (с подробными рекомендациями можно ознакомиться на сайте журнала в разделе Правила для авторов).

11. В разделе Информация об авторах (Information about the authors) приводятся ФИО авторов полностью, ученая степень, звание, должность, название организации, ORCID (при наличии).

IV. Все поступающие в редакцию рукописи проходят предварительную проверку на соответствие Правилам для авторов. Статья может быть возвращена автору на доработку с просьбой устранить недостатки или дополнить информацию. После проверки на соответствие правилам статья направляется рецензенту с указанием сроков рецензирования.

V. При наличии замечаний рецензента автору предоставляется определенное время на доработку рукописи. Статьи, направляемые на доработку, должны быть возвращены в исправленном виде с ответами на все замечания. Окончательное решение о публикации или отклонении рукописи принимается редколлегией журнала. При положительном заключении рецензента статья передается редактору для подготовки к печати. Редакция оставляет за собой право на редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

VI. Редакция журнала предоставляет возможность первоочередного опубликования статей, представленных лицами, которые осуществляют послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство) в год завершения обучения.

VII. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, уже опубликованных ранее или принятых к публикации другими изданиями.

ИНДЕКСЫ

00827

для индивидуальных
подписчиков

008272

для предприятий
и организаций