

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

ИНФОРМАТИКА

ТОМ 17

3

ИЮЛЬ-СЕНТЯБРЬ
2020

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.

Основные разделы журнала: математическое моделирование; обработка сигналов, изображений и речи; прикладные информационные технологии; интеллектуальные системы; космические информационные технологии и геоинформатика; параллельные вычисления; системы, приборы и устройства; распознавание образов; информационная безопасность; автоматизация проектирования.

Журнал «Информатика» включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в список научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований. В декабре 2017 г. журнал 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.

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

Адрес редакции:

ул. Сурганова, 6, к. 305, г. Минск, Беларусь

Тел. +375 (017) 351 26 22

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

Сайт журнала: inf.grid.by

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 academies in the given field. The journal focuses on the most significant and modern papers such as research projects results and PhD/DSc papers in computer sciences, IT and at the boundaries.

The journal covers the following topics: mathematical modeling; processing and recognition of signals, images and speech; applied information technology; intelligent systems; space information technology and GIS technologies; parallel computing; systems, devices and equipment; image recognition; information security; computer aided design.

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 the free access to reviewed electronic scientific paper, improving scientific information traffic and also raising quotation of works of the authors who are published in this journal (please use <https://elibrary.ru> or section for authors https://elibrary.ru_author_tools).

The journal is edited for a wide range of specialists in IT and computer sciences.

For further information:

Phone +375 (017) 351 26 22

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

Office 305, Surganova 6, 220012

Minsk, Belarus

Learn more at: <https://inf.grid.by/jour>

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

ИНФОРМАТИКА

Том 17, № 3, июль-сентябрь 2020

Ежеквартальный научный журнал

Издается с января 2004 г.

Учредитель и издатель – Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Тузиков Александр Васильевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент
Национальной академии наук Беларуси, генеральный директор Объединенного института
проблем информатики Национальной академии наук 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, профессор, член-корреспондент
Национальной академии наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук 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, профессор, академик Национальной академии наук
Беларуси, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

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

Бибило Петр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Бобов Михаил Никитич, д-р техн. наук, профессор, ОАО «АГАТ – системы управления» – управляющая
компания холдинга «Геоинформационные системы управления», Минск, Беларусь

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

Дудин Александр Николаевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь

Карпов Алексей Анатольевич, д-р техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Килин Сергей Яковлевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, академик Национальной академии наук
Беларуси, Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Краснопрошин Виктор Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный
университет, Минск, Беларусь

Крот Александр Михайлович, д-р техн. наук, профессор, Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Кругликов Сергей Владимирович, д-р воен. наук, канд. техн. наук, доцент, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Кундас Семен Петрович, д-р техн. наук, профессор, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Лиходед Николай Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Матус Петр Павлович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт математики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Скляр Валерий Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, Университет Авейру, Португалия

Сотсков Юрий Назарович, д-р физ.-мат. наук, профессор, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Стемпковский Александр Леонидович, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии наук, Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, Москва, Россия

Харин Юрий Семенович, д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, Научно-исследовательский институт прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Чернявский Александр Федорович, д-р техн. наук, профессор, академик Национальной академии наук Беларуси, Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Ярмолик Вячеслав Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

ИНФОРМАТИКА

Том 17, № 3, июль-сентябрь 2020

Ответственный за выпуск *Мойсейчик Светлана Сергеевна*

Редактор *Гончаренко Галина Борисовна*

Корректор *Михайлова Анна Антоновна*

Компьютерная верстка *Бутевич Ольга Борисовна*

Сдано в набор 24.08.2020. Подписано в печать 23.09.2020. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Ризография. Усл. печ. л. 13,0. Уч.-изд. л. 12,7. Тираж 50 экз. Заказ 5.

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.

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

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

INFORMATICS

Vol. 17, no. 3, Jule-September 2020

Published quarterly

Issued since January 2004

Founder and publisher – the United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus

Editor-in-Chief

Alexander V. Tuzikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, General Director of the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Deputy Editor-in-Chief

Mikhail Y. Kovalyov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Editorial Board

Sergey V. Ablameyko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian State University, Minsk, Belarus

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

Petr N. Bibilo, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Mikhail N. Bobov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Open Joint-Stock Company "AGAT – Control Systems – Managing Company of Geoinformation Control Systems Holding", Minsk, Belarus

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

Alexander N. Dudin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Belarus

Alexey A. Karpov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Sergey Ya. Kilin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Viktor V. Krasnoproshin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Belarus

Alexander M. Krot, Dr. Sci. (Eng.), Professor, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Sergey V. Kruglikov, Dr. Sci. (Milit.), Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Semen P. Kundas, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Nikolai A. Likhoded, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Belarus

Petr P. Matus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

Yuri N. Sotskov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Alexander L. Stempkovsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the Russian Federation Academy of Sciences, the Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Federation Academy of Sciences, Moscow, Russia

Yuriy S. Kharin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Research Institute for Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

Alexander F. Cherniavsky, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

Vyacheslav N. Yarmolik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

INFORMATICS

Vol. 17, no. 3, Jule-September 2020

Issue Head *Sviatlana S. Maiseichyk*

Editor *Halina B. Hancharenka*

Corrector *Hanna A. Mikhailava*

Computer Imposition *Volha B. Butsevich*

Sent for press 24.08.2020. Output 23.09.2020. Format 60×84 1/8. Offset paper. Headset Times. Riesography. Printed sheets 13,0. Publisher's signatures 12,7. Circulation 50 copies. Order 5.

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Крот А. М., Павлов С. И.** Моделирование и нелинейный анализ хаотических волновых процессов в электрохимически активных нейронных средах на основе матричной декомпозиции 7
- Курочкин А. В., Садов В. С.** Агрегация и индексирование данных нескольких источников на основе графовой модели в базах данных медицинских экспертных систем 25

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЧИ

- Павленко Д. А., Ковалев В. А., Снежко Э. В., Левчук В. А., Печковский Е. И.** Распознавание подстилающей поверхности Земли с помощью сверточной нейронной сети на одноплатном микрокомпьютере 36

ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

- Поттосин Ю. В.** Эвристический метод алгебраической декомпозиции частичных булевых функций 44
- Кириенко Н. А.** Алгоритмы разбиения логических схем на подсхемы 54

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

- Бобов М. Н., Курилович А. В.** Стойкость механизмов аутентификации в инфокоммуникационных сетях 64
- Давлатов Ш. Р., Кучинский П. В.** Анализ защищенности веб-ресурсов на основе метрики CVSS..... 72
- Бубнов Я. В., Иванов Н. Н.** Текстовый анализ DNS-запросов для защиты компьютерных сетей от эксфильтрации данных 78

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Точицкий Л. И.** О количественных характеристиках информационных ресурсов 87
- Abduganiev S. G.** Website Quality Evaluation Methodology Universal Star: 1st point – “Content” 95

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

CONTENTS

MATHEMATICAL MODELING

- Krot A. M., Pavlov S. I.** Modeling and nonlinear analysis of chaotic wave processes in electrochemically active neuronal media based on matrix decomposition 7
- Kurachkin A. V., Sadau V. S.** Data aggregation and indexing support from multiple sources using graph model in medical expert system databases 25

SIGNAL, IMAGE AND SPEECH PROCESSING

- Paulenka D. A., Kovalev V. A., Snezhko E. V., Liauchuk V. A., Pechkovsky E. I.** Recognition of underlying surface using a convolutional neural network on a single-board computer 36

LOGICAL DESIGN

- Pottosin Yu. V.** A heuristic method for bi-decomposition of partial Boolean functions 44
- Kirienko N. A.** Algorithms for partitioning logical circuits into subcircuits 54

INFORMATION PROTECTION

- Bobov M. N., Kurylovich A. V.** Stability of password authentication in infocommunication networks 64
- Davlatov Sh. R., Kuchinsky P. V.** Web resource security analysis based on CVSS metrics 72
- Bubnov Ya. V., Ivanov N. N.** Text analysis of DNS queries for data exfiltration protection of computer networks 78

INFORMATION TECHNOLOGY

- Tochicki L. I.** On quantitative characteristics of information resources 87
- Abduganiev S. G.** Website Quality Evaluation Methodology Universal Star: 1st point – “Content” 95

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
MATHEMATICAL MODELING

УДК 517.958:532.5; 517.957; 681.513.8; 001.891.57:53
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-7-24>

Поступила в редакцию 01.04.2020
Received 01.04.2020

Принята к публикации 06.05.2020
Accepted 06.05.2020

Моделирование и нелинейный анализ хаотических волновых процессов в электрохимически активных нейронных средах на основе матричной декомпозиции

А. М. Крот, С. И. Павлов✉

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*
✉E-mail: staspavlov008@gmail.com

Аннотация. Разработана общая модель возникновения и эволюции хаотических волновых процессов в электрохимически активных нейронных средах на основе предложенного метода матричной декомпозиции операторов нелинейных систем. Рассмотрены математические модели Ходжкина – Хаксли и ФитцХью – Нагумо электрохимически активной нейронной среды. Определены необходимые условия самоорганизации хаотических автоколебаний в модели ФитцХью – Нагумо. Компьютерное моделирование на основе матричной декомпозиции хаотических волновых процессов в электрохимически активных нейронных средах показало взаимодействие нелинейных процессов высших порядков, приводящее к стабилизации (конечной величине) амплитуды хаотического волнового процесса. Математически это выражается в синхронном «противодействии» нелинейных процессов четных и нечетных порядков в общей векторно-матричной модели электрохимически активной нейронной среды, находящейся в хаотическом режиме. Отмечено, что режим жесткого самовозбуждения нелинейных колебаний в электрохимически активной нейронной среде приводит к появлению хаотического аттрактора в пространстве состояний. Вместе с тем предложенная векторно-матричная модель позволила найти более общие условия возникновения и эволюции хаотических волновых процессов по сравнению с моделью начальной турбулентности Ландау и, как следствие, объяснить возникновение согласованных нелинейных явлений в электрохимически активной нейронной среде.

Ключевые слова: электрохимически активная нейронная среда, модель ФитцХью – Нагумо, необходимые условия самоорганизации автоколебаний, хаотический аттрактор, матричный ряд в пространстве состояний, векторно-матричная модель хаотических волновых процессов, режим жесткого самовозбуждения нелинейных колебаний, стабилизация амплитуды хаотического процесса

Для цитирования. Крот, А. М. Моделирование и нелинейный анализ хаотических волновых процессов в электрохимически активных нейронных средах на основе матричной декомпозиции / А. М. Крот, С. И. Павлов // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 7–24. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-7-24>

Modeling and nonlinear analysis of chaotic wave processes in electrochemically active neuronal media based on matrix decomposition

Alexander M. Krot, Stanislav I. Pavlov✉

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*
✉E-mail: staspavlov008@gmail.com

Abstract. A general model of the origin and evolution of chaotic wave processes in electrochemically active neuronal media based on the proposed method of matrix decomposition of operators of nonlinear systems has been developed. The mathematical models of Hodgkin – Huxley and FitzHugh – Nagumo of an electrochemically

active neuronal media are considered. The necessary conditions for self-organization of chaotic self-oscillations in the FitzHugh – Nagumo model are determined. Computer modeling based on the matrix decomposition of chaotic wave processes in electrochemically active neuronal media has shown the interaction of higher-order nonlinear processes leading to stabilization (to a finite value) of the amplitude of the chaotic wave process. Mathematically, this is expressed in the synchronous “counteraction” of nonlinear processes of even and odd orders in the general vector-matrix model of an electrochemically active neuronal media being in a chaotic mode. It is noted that the state of hard self-excitation of nonlinear oscillations in an electrochemically active neuronal media leads to the appearance of a chaotic attractor in the state space. At the same time, the proposed vector-matrix model made it possible to find more general conditions for the appearance and evolution of chaotic wave processes in comparison with the initial Landau turbulence model and, as a result, to explain the occurrence of consistent nonlinear phenomena in an electrochemically active neuronal media.

Keywords: electrochemically active neuronal media, FitzHugh – Nagumo model, necessary conditions for self-organization of self-oscillations, chaotic attractor, matrix series in state-space, vector-matrix model of chaotic wave processes, mode of hard self-excitation of nonlinear oscillations, stabilization of the amplitude of chaotic process

For citation. Krot A. M., Pavlov S. I. Modeling and nonlinear analysis of chaotic wave processes in electrochemically active neuronal media based on matrix decomposition. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 7–24 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-7-24>

Введение. Изучение распространения электрических сигналов возбуждения по нервным клеткам и сетям представляет большой интерес для современной нейронауки, включая диагностику нервно-мышечных патологий. Нервное волокно (аксон) является типичным примером активной среды, в которой имеется распределенный запас потенциальной энергии. Распространение сигналов по нервному волокну можно рассматривать как автоволновой процесс [1, 2], который представляет собой электрохимическую волну перехода между состоянием покоя и активным состоянием. При распространении нервного импульса в каждой точке возбудимой мембраны высвобождается энергия, исходно запасенная в виде неравновесных концентраций ионов калия и натрия по обе стороны мембраны. В живых организмах помимо одномерных активных сред и нервных волокон существуют двух- и трехмерные активные среды (головной и спинной мозг, сердечная мышца, гладкомышечные стенки кишечника и т. д.). Распространяющиеся по ним автоволны имеют ту же физическую природу, что и нервный импульс, отличаясь от последнего лишь длительностью и скоростью, а также значением в процессах жизнедеятельности организма. Вообще говоря, автоволны – это обобщенное понятие, позволяющее систематизировать экспериментальные факты и теоретические представления о некоторых нелинейных процессах, наблюдаемых в активных средах в физике, химии и биологии. Автоволны представляют собой наблюдаемые структуры, которые поддерживаются процессами локального высвобождения запасенной в среде энергии, идущей на запуск аналогичных процессов в соседних областях.

Развитие теории хаотических волновых процессов (в частности, теории турбулентности в аэрогидродинамических потоках) важно с точки зрения понимания процессов самоорганизации в электрохимически активных нейронных средах. Л. Д. Ландау в своей статье «К проблеме турбулентности» [3] разработал теорию начальной турбулентности. Идея использования неортогональных базисных функций в спектральном представлении хаотических процессов рассмотрена в статье [4]. Э. Лоренц [5], исследуя динамическое поведение вязкой жидкости в условиях конвекции (течение Рэлея – Бенара), предложил модель турбулентности, для построения которой использовался метод Галеркина с целью редуцирования системы уравнений Навье – Стокса и теплопроводности. В результате редуцированная модель Лоренца, описываемая тремя обыкновенными нелинейными дифференциальными уравнениями, позволила выявить хаотическое поведение системы, приведшее к открытию хаотического (странного) аттрактора в пространстве состояний. Математическое понятие «хаотический аттрактор» было сформулировано Д. Рюэлем и Ф. Такенсом [6] как ключевой элемент в интерпретации иррегулярного поведения, описываемого детерминистскими уравнениями для понимания главным образом турбулентности. Тем самым было положено начало исследованиям явления, которое теперь именуется детерминированным хаосом. Впоследствии И. Пригожин [7], Г. Хакен [8]

и др., заложившие основы познания общих законов эволюции сложных динамических систем, показали, что новый порядок (самоорганизация) в сложной системе различной физической природы возникает через детерминированный хаос – хаотический режим функционирования сложной системы. Прогресс, достигнутый в этой области, способствовал интенсивным исследованиям различных сценариев перехода динамики сложных систем от периодического режима функционирования к хаотическому: через квазипериодичность, субгармонический каскад, перемежаемость и т. п. (см., например, [9]).

Несмотря на достигнутые успехи, остаются не до конца выясненными вопросы, касающиеся стабилизации хаотических волновых процессов, которая позволяет достаточно долго поддерживать незатухающие хаотические колебания в сложных системах при неизменности их управляющих параметров (например, характеристических чисел Рейнольдса Re , Рэлея Ra и т. д. для случая аэрогидродинамических систем). В этой связи в работе [10] была предложена эволюционная модель возникновения и стабилизации хаотических волновых процессов на основе матричной декомпозиции. Цель настоящей работы – раскрытие механизмов амплитудной стабилизации и эволюции хаотических волновых процессов в электрохимически активных нейронных средах, моделируемых системой нелинейных уравнений ФитцХью – Нагумо.

Математические модели Ходжкина – Хаксли и ФитцХью – Нагумо электрохимически активной среды биологического нейрона. Во многих случаях активную среду можно рассматривать как энергетически двухуровневую систему, которая может находиться в двух существенно различных состояниях: высоко- и низкоэнергетическом. Активные среды без восстановления после перехода остаются на низкоэнергетическом уровне, и автоволна по ним повторно распространяться не может. В этой связи автоволны по своим свойствам существенно отличаются от волн, распространяющихся в обычных диссипативных средах, например от электромагнитных или механических волн. Две автоволны, сталкиваясь, аннигилируют, т. е. уничтожают, друг друга. Для автоволн не имеют значения интерференция и отражение от границ среды или препятствий. Общее свойство обычных волн и автоволн – способность к дифракции. В активных средах с восстановлением (нервное волокно или активная среда лазера) автоволны могут распространяться повторно, так как любой элемент такой среды возвращается на высокоэнергетический уровень вследствие процессов восстановления – накачки энергии. В мембране нервного волокна накачка осуществляется за счет ионного обмена, при котором из волокна откачиваются ионы натрия, а поступают внутрь ионы калия [1, 2, 11].

Уравнения, описывающие модель Ходжкина – Хаксли. Модель Ходжкина – Хаксли описывает генерацию биоэлектрических потенциалов на уровне токов ионных каналов клеточной мембраны и является отправной точкой как для упрощенных, так и для более детальных моделей нейрона, которые включают большее число ионных каналов, различные типы синапсов и учитывают пространственную геометрию отдельного нейрона [12]. Важнейшую роль в процессе возникновения нервных импульсов играет клеточная мембрана. Мембрана – это двойной слой жировых молекул (липидов толщиной 3–4 нм), который препятствует перемещению заряженных ионов. Способность к изоляции заставляет мембрану функционировать как конденсатор, отделяя заряды во внутреннем пространстве клетки от зарядов во внеклеточной жидкости. Многочисленные ионопроводящие каналы, пронизывающие мембрану, имеют эффективное сопротивление ионному току, приблизительно в 10 000 раз меньше, чем слой липидов [12–14]. Таким образом, мембранная проводимость определяется плотностью и типом ионных каналов. Типичный нейрон может иметь более 10 различных типов каналов с плотностью размещения от нескольких десятков до нескольких сотен каналов на квадратном микроне мембраны.

Таким образом, мембрану можно представить в виде конденсатора. Входной ток, попадая в клетку, может увеличивать заряд конденсатора или проходить через мембранные каналы наружу. Потенциал Нернста, вызванный различием в концентрации ионов, можно изобразить в виде батареи, а ионные каналы – в виде регулируемых сопротивлений (рис. 1). На рис. 1 приняты следующие обозначения: C – емкость мембраны; ε_{Na} , ε_K и ε_L – электродвижущие силы, возникающие за счет разности концентраций ионов натрия снаружи и внутри клетки, ионов калия и остальных видов ионов соответственно; R_{Na} – сопротивление натриевых каналов в за-

висимости от потенциала мембраны, приходящееся на единицу площади мембраны; R_K – сопротивление калиевых каналов; R_L – сопротивление канала утечки.

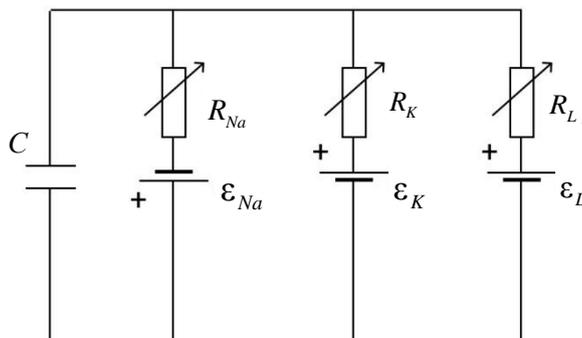


Рис. 1. Схематическое изображение модели Ходжкина – Хаксли

Опишем поведение модели Ходжкина – Хаксли посредством математических уравнений. Входной ток $I(t)$ может быть представлен как емкостной ток I_C , заряжающий конденсатор C , и сумма токов I_K , проходящих через ионные каналы [12–14]:

$$I(t) = I_C(t) + \sum_l I_l(t). \quad (1)$$

Сумма берется по всем ионным каналам, причем стандартная модель Ходжкина – Хаксли включает только три типа каналов: натриевый, калиевый и канал утечки, т. е. $l = K, Na, L$ (см. рис. 1). Из определения емкости $C = Q/V$, где Q – заряд и V – напряжение на конденсаторе, нетрудно найти ток заряда $I_C = C dV/dt$. Следовательно, верно равенство

$$C \frac{dV}{dt} = -\sum_l I_l(t) + I(t), \quad (2)$$

где V – напряжение на мембране; C – емкость мембраны; $\sum_l I_l(t)$ – сумма ионных токов, проходящих через мембрану клетки. Все три канала могут быть характеризованы их сопротивлением (или проводимостью). Канал утечки не зависит от напряжения с проводимостью $g_L = 1/R$. Проводимость других ионных каналов определяется временем и напряжением. Если все каналы открыты, то они пропускают токи с максимальной проводимостью g_{Na} или g_K . Между тем некоторые из каналов обычно бывают заблокированы. Вероятность того, что канал является открытым, описывается дополнительными переменными m , n и h . Пусть n – вероятность прохода одной управляющей частицы, тогда n^4 – вероятность прохода четырех частиц одновременно. Совместное действие переменных m и h управляет каналом ионов натрия Na^+ , а за ионы калия K^+ отвечает n . Ходжкин и Хаксли определили три компоненты суммарного ионного тока следующим образом [11, 12]:

$$i(V, m, n, h) = \sum_l I_l(t) = g_{Na} m^3 h (V - \varepsilon_{Na}) + g_K n^4 (V - \varepsilon_K) + g_L (V - \varepsilon_L), \quad (3)$$

где ε_{Na} , ε_K и ε_L – потенциалы покоя. Потенциалы покоя и проводимость являются эмпирическими параметрами. Величина потенциала покоя для ионов натрия $\varepsilon_{Na} = 50$ мВ, а для ионов калия $\varepsilon_K = -77$ мВ [14].

Математическая модель аксона Ходжкина – Хаксли (т. е. гладкого нервного волокна, лишённого миелиновой оболочки) может быть записана в виде [11, 15]

$$D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{i(u, m, n, h)}{C}, \quad (4)$$

где D_u – коэффициент диффузии, $D_u = 1/RC$, R и C – соответственно сопротивление и емкость на единицу мембраны; u – напряжение нервного импульса; x – координата, вдоль которой распространяется импульс; m , n , h – параметры, независимо релаксирующие к своим равновесным значениям. Переменные m , n и h называются переменными селекции и удовлетворяют следующим уравнениям [11, 12, 14]:

$$\begin{cases} \frac{dm}{dt} = \alpha_m(V)(1-m) - \beta_m(V)m, \\ \frac{dn}{dt} = \alpha_n(V)(1-n) - \beta_n(V)n, \\ \frac{dh}{dt} = \alpha_h(V)(1-h) - \beta_h(V)h. \end{cases} \quad (5)$$

Функции α и β являются эмпирическими функциями напряжения V , которые были подобраны Ходжкиным и Хаксли [12] для аксона кальмара в соответствии с данными наблюдений. Для лучшего понимания эти уравнения удобно переписать в другой форме, разделив на $\alpha_s(V) + \beta_s(V)$:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{-1}{\tau_s(V)} [s - q_s(V)], \quad (6)$$

где s заменяется на m , n или h , предельное значение $q_s(V) = \alpha_s(V) / [\alpha_s(V) + \beta_s(V)]$ и постоянная времени $\tau_s(V) = [\alpha_s(V) + \beta_s(V)]^{-1}$. Как видно из уравнения (6), для фиксированного значения напряжения V переменная s аппроксимируется предельным значением $q_s(V)$ с постоянной времени $\tau_s(V)$. Уравнения (1)–(3) и (5)–(6) вместе с эмпирическими данными определяют полную модель Ходжкина – Хаксли, называемую также канонической моделью электрогенеза нервной клетки.

При распространении нервного импульса отмечается лавинообразное нарастание мембранного тока, в основном потока ионов Na^+ , что обусловлено в первую очередь нарастанием проводимости мембраны для этих ионов. Данный процесс полностью аналогичен процессу возбуждения генератора с положительной обратной связью [11], и его обычно называют возбуждением мембраны. Процесс же установления равновесного мембранного потенциала $V \rightarrow V_R$ ($V_R = -65$ мВ), т. е. возврата мембраны в состояние покоя, обычно называют процессом релаксации, или рефрактерности. Процесс рефрактерности происходит в основном благодаря наличию выходящего из мембраны калиевого тока. Данные электрохимические процессы весьма точно описываются моделью Ходжкина – Хаксли.

Исследование автоволновых процессов на основе модели ФитцХью – Нагумо. Необходимо отметить, что математическая модель Ходжкина – Хаксли является очень громоздкой и сложной для качественного анализа распространения импульса по нервному волокну. В связи

с этим ФитцХью предложил приближенное описание возникновения и распространения нервного импульса, смысл которого заключается в следующем. У аксона Ходжкина – Хаксли время релаксации для натриевого включения τ_m на порядок меньше, чем время релаксации τ_n и τ_h для калиевого включения и натриевого выключения соответственно. Таким образом, имеет смысл рассмотреть приближение, когда выполняются условия

$$\tau_m \rightarrow 0, \tau_n \rightarrow \infty, \tau_h \rightarrow \infty, \quad (7)$$

в результате чего ионный ток становится кубической функцией напряжения [11]. Это приближение справедливо только для процессов с характерными временами, существенно большими, чем τ_m , и малыми по сравнению с τ_n и τ_h . Длительность фронта импульса в аксоне Ходжкина – Хаксли как раз близка к удовлетворению данных требований.

Переписывая выражение (4) с учетом (3) и (7) (переменную u при этом заменяя на u_1) и дополняя его «восстанавливающей» переменной u_2 , приходим к уравнению [2, 11]

$$D_{u_1} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} - \frac{\partial u_1}{\partial t} = \varphi(u_1) + u_2, \quad (8)$$

причем релаксационное уравнение

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = \hat{\varepsilon} (u_1 + \hat{a} - \hat{b}u_2) \quad (9)$$

моделирует восстановление мембраны, т. е. процесс рефрактерности [11]. В уравнении (8) функция $\varphi(u_1)$ представляет собой кубичный полином; $\hat{\varepsilon}$, \hat{a} , \hat{b} – постоянные.

Система уравнений (8), (9) носит название модели ФитцХью – Нагумо (ФХН) и позволяет описывать многие качественные свойства автоволн без необходимости детализировать конкретные особенности динамической системы. Данная модель дает возможность исследовать стационарное распространение и формирование импульса, деление фронтов импульса, автоволновые режимы «эх» и другие явления [2, 11]. Модель ФХН широко применяется при анализе автоволновых процессов как в одномерных, так и в двух- и трехмерных активных средах, особенно при изучении вихревых процессов, приводящих к образованию пространственно-неоднородных спиральных структур в активных средах, а также при исследовании нейронных осцилляторов [1, 15, 16].

При $D_{u_1} = 0$ соотношения (8), (9) сводятся к уравнениям, описывающим точечную кинетику автоволновых процессов. Эти уравнения носят название «система Ван дер Поля» (по аналогии с аналогичной моделью в теории колебаний [11]). Для моделей ФХН существуют две основные формы записи [17, 18], одна из которых может быть представлена в виде системы [16, 19]

$$\begin{cases} \dot{u}_1 = c(u_1 - \frac{u_1^3}{3} \mp u_2 + g), \\ \dot{u}_2 = -\frac{1}{c}(\pm u_1 - a \mp b u_2), \end{cases} \quad (10)$$

где u_1, u_2 – переменные, описывающие кинетику автоволнового процесса; a, b, c – параметры. Параметр g служит здесь бифуркационной характеристикой и является пороговым значением возникновения диффузионной неустойчивости в исследуемой системе. Значения a, b, c в работе [19] были выбраны на основе экспериментальных исследований $a = 0,7$; $b = 0,8$; $c = 3,0$. На основании численного анализа (10) при помощи метода Рунге – Кутты в работе [19] было

показано, что при $-1,4023 < g < -0,3452$ стационарное состояние становится неустойчивым, а фазовые траектории сходятся к аттрактору типа предельного цикла [7].

Применим методику бифуркационного анализа к кинетической модели ФХН, для чего переписем (10) в общем виде:

$$\begin{cases} \dot{u}_1 = f_1(u_1, u_2), \\ \dot{u}_2 = f_2(u_1, u_2). \end{cases} \quad (11)$$

Рассмотрим матрицу $L_{2 \times 2}^{(1)}$ линеаризованной системы, соответствующей (11):

$$L_{2 \times 2}^{(1)} = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $l_{ij}^{(1)} = \left[\frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right]_{u_j^*}$, $i, j = 1, 2$, – элементы матрицы $L_{2 \times 2}^{(1)}$. След и определитель линеаризованной матрицы (12) находим согласно формулам

$$SpL_{2 \times 2}^{(1)}(u_1^*) = l_{11} + l_{22}, \quad \det L_{2 \times 2}^{(1)}(u_1^*) = l_{11}l_{22} - l_{12}l_{21}. \quad (13)$$

Известно [7], что нетривиальные решения линеаризованной системы уравнений существуют при выполнении условия

$$\det [L_{2 \times 2}^{(1)} - \omega E_{2 \times 2}] = 0,$$

определяющего характеристическое уравнение

$$\omega^2 - SpL_{2 \times 2}^{(1)}\omega + \det L_{2 \times 2}^{(1)} = 0. \quad (14)$$

Для потери устойчивости при выходе системы из стационарного состояния необходимо, чтобы хотя бы один корень (14) имел положительную действительную часть, т. е. выполнялись условия

$$\operatorname{Re} \omega_i > 0; \quad (15)$$

$$\omega_i = \frac{1}{2} SpL_{2 \times 2}^{(1)} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2} SpL_{2 \times 2}^{(1)} \right)^2 - \det L_{2 \times 2}^{(1)}}, \quad (16)$$

где $i = 1, 2$. В работе [7] показано, что это имеет место лишь в том случае, если на фазовой плоскости стационарное состояние представляет собой неустойчивый узел или фокус, причем данную особую точку окружает, как правило, фазовая траектория типа предельного цикла. Если $\det L_{2 \times 2}^{(1)} > 0$, то из выражений (14), (16) следует, что для выполнения (15) должно иметь место условие $SpL_{2 \times 2}^{(1)} > 0$. Данное неравенство определяет необходимое условие неустойчивости, приводящее к возникновению явления самоорганизации в активной среде [20]. При этом, как правило, происходит бифуркация особой точки, соответствующей стационарному состоянию, т. е. экспериментально наблюдается наличие «двойного» автоволнового процесса. В нервном волокне, например, начинают распространяться два импульса с различными скоростями, причем автоволна, распространяющаяся с меньшей скоростью, достаточно быстро затухает.

Для моделей ФХН (10) диагональные элементы линеаризованной матрицы $l_{11} = c(1 - u_1^{*2})$ и $l_{22} = \pm b/c$, поэтому необходимое условие самоорганизации можно записать следующим образом [20]:

$$\mp \frac{b}{c^2} < 1 - u_1^{*2}, \quad (17)$$

если

$$\det L_{2 \times 2}^{(1)} > 0.$$

Согласно выражению (16) в случае $\det L_{2 \times 2}^{(1)} < 0$ условие (15) выполняется, если $SpL_{2 \times 2}^{(1)} < 0$, т. е. с учетом диагональных элементов необходимое условие самоорганизации принимает вид

$$1 - u_1^{*2} < \mp \frac{b}{c^2}, \quad (17a)$$

если

$$\det L_{2 \times 2}^{(1)} < 0.$$

Следуя работе [19], рассмотрим модель ФХН при выборе верхних знаков при переменных u_1 и u_2 в системе (10). Тогда значение переменной u_1 , соответствующее стационарному состоянию нелинейных динамических систем (НДС), может быть определено с помощью решения системы уравнений, которое получается из (10) при $\dot{u}_1 = \dot{u}_2 = 0$:

$$\begin{cases} u_2 + u_1 - \frac{u_1^3}{3} + g = 0, \\ u_1 - a - bu_2 = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Найдем решения системы (18), т. е. определим состояния равновесия. Приравнивая правые части уравнений (18), получим кубическое уравнение [20]

$$u_1^3 + 3 \frac{1-b}{b} u_1 - 3 \left(g + \frac{a}{b} \right) = 0, \quad (19)$$

или в более краткой форме

$$u_1^3 + pu_1 + q = 0. \quad (20)$$

При $q = 0$ по аналогии с моделью, рассмотренной в [2], имеем нулевой порог возбудимости активной среды. Процесс возбуждения начинается из нулевого стационарного состояния $u_1^* = 0, u_2^* = 0$. Вместе с тем в реальных физических системах порог возбуждения всегда отличен от нуля и, соответственно, $q \neq 0$. При этом вместо нулевого решения будем рассматривать действительное решение уравнения (20), определяемое формулой Кардано:

$$u_1^* = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}, \quad (21)$$

причем дискриминант кубического уравнения $Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2$.

Из уравнений (19), (20) следует, что $p = 3 \frac{1-b}{b}$, $q = -3 \left(g + \frac{a}{b} \right)$. Подставляя величины p и q в (21), для равновесного значения переменной u_1 получаем следующее выражение [20]:

$$u_1^* = \sqrt[3]{\frac{3\gamma_1}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{\frac{3\gamma_1}{2} - \sqrt{Q}}. \quad (22)$$

Здесь $\gamma_1 = g + \frac{a}{b}$, а дискриминант Q кубического уравнения (19) определяется по формуле [20]

$$Q = \sqrt{\frac{9\gamma_1^2}{4} + \gamma_2^3}, \quad (23)$$

где $\gamma_2 = \frac{1-b}{b}$.

Как упоминалось выше, в работе [19] было показано, что в окрестности значения бифуркационного параметра $g = -1$ состояние равновесия кинетической модели (10) становится неустойчивым. Воспользовавшись формулами (22) и (23), нетрудно определить значения параметра g , при которых выполняется условие (17). Так, в случае $g = -1$ величина $1 - u_1^{*2} = 0,9551198$, в то время как значение левой части (17) не зависит от g и равно $b/c^2 = 0,0889$. Другими словами, на основании результатов численных расчетов можно сделать вывод о том, что в окрестности значения бифуркационного параметра $g = -1$, а именно при $-1,4034 \leq g \leq -0,3466$ действительно выполняется необходимое условие самоорганизации (17). Данный отрезок с высокой точностью совпадает с отрезком, рассчитанным в работе [19] при помощи численного решения системы дифференциальных уравнений (10).

Нелинейный анализ хаотической динамики системы ФХН на основе матричной декомпозиции. Вообще говоря, хаотические волновые процессы возникают в сложных системах самой различной физической природы (например, в гидродинамических, химических и физиологических системах [7]). В этой связи в статье [10] построена общая модель возникновения и стабилизации хаотических волновых процессов с использованием метода матричной декомпозиции в пространстве состояний сложной системы.

Построение общей модели возникновения хаотических волновых процессов в сложных динамических системах с использованием метода матричной декомпозиции. Известно [7], что механизмы возникновения пространственных и временных структур в сложных НДС могут быть выявлены при анализе системы нелинейных уравнений в частных производных вида

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = f_i(\{u_j\}, \{\nabla u_j\}, \{\nabla^2 u_j\}, \dots, \{c_j\}), \quad i, j = 1, 2, \dots, N, \quad (24)$$

где f_i – нелинейная функция; $u_i = u_i(t, \vec{r})$ – функция временной t переменной и пространственных \vec{r} переменных, удовлетворяющая начальным и граничным условиям; ∇ – дифференциальный оператор Гамильтона; c_i – параметры системы. С помощью метода Галеркина система нелинейных уравнений в частных производных сводится к системе нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений [8], поэтому в дальнейшем не будем учитывать явную зависимость u_i от пространственного вектора \vec{r} , считая, что $u_i = u_i(t)$.

Часто необходимо изучать поведение решения уравнения (24) вблизи конкретного стандартного состояния $\{u_i^*\}$, причем $u_i^* = u_i^*(t)$ рассматривается как невозмущенное решение (24), постоянно возмущаемое внешними воздействиями или внутренними флуктуациями на величину $v_i = v_i(t)$ [7]. В результате вместо u_i^* возникает новое решение

$$u_i = u_i^* + v_i. \quad (25)$$

Из соотношений (24) и (25) получим систему уравнений для $\{v_i\}$:

$$\frac{dv_i}{dt} = f_i(\{u_j^* + v_j\}) - f_i(\{u_j^*\}). \quad (26)$$

Вблизи начала отсчета, т. е. при $|v_i/u_i^*| \ll 1$, можно линеаризовать функцию f_i в окрестности нулевых значений v_i , используя первые члены кратного ряда Тейлора [7]. Теорема Ляпунова устанавливает связь между устойчивостью систем уравнений (24) и (26): если тривиальное решение ($v_i = 0$) уравнения (26) асимптотически устойчиво, то u_i^* является асимптотически устойчивым решением уравнения (24). Однако линейная теория устойчивости не позволяет сделать точный прогноз в случае сложных НДС.

В векторно-матричном виде система обыкновенных дифференциальных уравнений, полученная из (24), может рассматриваться как задача Коши в N -мерном пространстве состояний U сложной НДС:

$$\dot{\bar{u}} = \bar{f}(\bar{u}(t), \bar{u}_0, \{c_l\}), \quad \bar{u}(0) = \bar{u}_0, \quad \bar{u}(t) \in U, \quad (27)$$

где $\bar{u}(t) = (u_1(t), \dots, u_N(t))^T$, T – символ транспонирования, \bar{u}_0 – вектор начальных данных, $\{c_l\}$ – множество параметров системы. Решение $\bar{u}(t)$ уравнения (27) задает некоторую кривую в пространстве состояний (фазовом пространстве) $U = \mathfrak{R}^N$, называемую фазовой траекторией. Аналогично запишем систему (26) в векторно-матричном виде:

$$\dot{\bar{v}} = \Delta \bar{f}(\bar{v}(t), \bar{u}^*, \{c_l\}), \quad (28)$$

где $\bar{v}(t) = (v_1(t), \dots, v_N(t))^T$, $\Delta \bar{f}$ – приращение векторной функции, \bar{u}^* – вектор невозмущенного (стандартного) состояния, $\{c_l\}$ – набор параметров системы.

В работах [21–26] предложен метод матричной декомпозиции операторов сложных НДС на основе матричного ряда в пространстве состояний и рассмотрены многочисленные примеры применения данного метода для анализа сложных систем. В их числе аттракторы сложных НДС [23, 24], а также искусственная нейронная сеть Хопфилда и электрическая цепь Чжуа [26]. Согласно этому методу приращение векторной функции $\Delta \bar{f}$ сложной НДС в пространстве состояний описывается матричным рядом [21–23]

$$\begin{aligned} \Delta \bar{f}(\bar{v}, \bar{u}^*) &= \bar{f}(\bar{u}^* + \bar{v}) - \bar{f}(\bar{u}^*) = L_{N \times N}^{(1)} \bar{v} + \frac{1}{2!} L_{N \times N^2}^{(2)} (\bar{v} \otimes \bar{v}) + \\ &+ \frac{1}{3!} L_{N \times N^3}^{(3)} (\bar{v} \otimes \bar{v} \otimes \bar{v}) + \dots = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} L_{N \times N^k}^{(k)} \cdot \bar{v}^{\otimes k}, \end{aligned} \quad (29)$$

где $L_{N \times N^k}^{(k)} = \underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial \bar{v}^T} \otimes \left(\frac{\partial}{\partial \bar{v}^T} \otimes \dots \otimes \left(\frac{\partial}{\partial \bar{v}^T} \otimes \bar{f} \right) \dots \right) \right)}_k \Big|_{\bar{u}^*}$ – матричные ядра однородных нелинейных операторов системы; $\bar{v}^{\otimes k} = \underbrace{(\bar{v} \otimes \bar{v} \otimes \dots \otimes \bar{v})}_k$ – k -я кронекеровская степень вектора возмущений \bar{v} , а \bar{u}^* рассматривается как вектор стандартного состояния в \mathfrak{R}^N .

Применяя матричное разложение (29) к правой части уравнения (28), получим уравнение

$$\dot{\bar{v}} = L_{N \times N}^{(1)} \bar{v} + \frac{1}{2!} L_{N \times N^2}^{(2)} (\bar{v} \otimes \bar{v}) + \frac{1}{3!} L_{N \times N^3}^{(3)} (\bar{v} \otimes \bar{v} \otimes \bar{v}) + \dots \quad (30)$$

Как отмечено в работе [10], уравнение (30) обобщает модель Ландау начальной турбулентности [3] после срыва стационарного режима течения жидкости с точностью до членов третьего порядка:

$$\dot{S} = 2\gamma_1 S - \alpha_L S^2 - \beta_L S^3 - \dots, \quad (31)$$

где γ_1 – коэффициент затухания, α_L – постоянная Ландау [27], β_L – положительная или отрицательная постоянная, $S = |A|^2$ – квадрат амплитуды нестационарного процесса. В работе [3] показано, что в случае выполнения условий

$$\gamma_1 > 0, \alpha_L > 0, \beta_L = 0 \quad (31a)$$

реализуется нестационарный режим конечной амплитуды с дополнительной частотой ω_1 , причем $\omega_1 \gg \gamma_1$. Этот режим при критическом значении управляющего параметра – числа Рейнольдса Re_{cr1} – становится неустойчивым даже по отношению к бесконечно малым возмущениям и поэтому соответствует системе с мягким самовозбуждением.

По мере изменения управляющего параметра возможен новый хаотический режим, при котором выполняются условия

$$\gamma_1 > 0, \alpha_L < 0, \beta_L > 0. \quad (31б)$$

В этом режиме стационарные колебания не могут существовать вовсе, т. е. при Re_{cr2} возмущение скачком возрастает до конечной амплитуды с появлением новой дополнительной частоты ω_2 . В интервале $Re_{cr1} < Re < Re_{cr2}$ основное движение метастабильно устойчиво по отношению к бесконечно малым величинам, но неустойчиво по отношению к возмущению конечной амплитуды [27]. Следует отметить, что феноменологическая теория Ландау, построенная на интуитивно-логическом выводе уравнения (31) и результатах гидродинамических экспериментов Рейнольдса, пригодна исключительно для объяснения возникновения начальной турбулентности в движущейся вязкой жидкости. Следовательно, уравнение (30) можно рассматривать в качестве общей модели возникновения и эволюции хаотических волновых процессов в сложных НДС [10].

Выявление синхронизации нелинейных компонент хаотических колебаний в системе ФХН на основе матричной декомпозиции. Как показано в работе [10], несмотря на различие физических явлений, описываемых разными сложными системами, хаотическая динамика их поведения в пространстве состояний должна иметь схожий сценарий, выражающийся в синхронном «противодействии» нелинейных процессов четных и нечетных порядков, порожденных соответствующими ядрами $L_{N \times N^{2k}}^{(2k)}$ и $L_{N \times N^{2k+1}}^{(2k+1)}$ в общей векторно-матричной модели (30) сложной НДС. В этой связи рассмотрим общую модель (30) возникновения хаотических процессов применительно к сложной НДС ФХН (10). Как показано в работах [22, 23], динамика сложной НДС ФХН описывается на основе линейного (11), квадратичного и кубического ядер:

$$L_{2 \times 2}^{(1)}(\vec{u}^*) = \begin{bmatrix} c - cu_1^{*2} & c \\ -1 & b \\ c & c \end{bmatrix}; \quad (32)$$

$$L_{2 \times 4}^{(2)}(\vec{u}^*) = \begin{bmatrix} -2cu_1^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (33)$$

$$L_{2 \times 8}^{(3)}(\vec{u}^*) = \begin{bmatrix} -2c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (34)$$

поэтому векторное уравнение (30) для сложной НДС ФХН принимает вид

$$\dot{\vec{v}} = L_{2 \times 2}^{(1)} \vec{v} + \frac{1}{2!} L_{2 \times 4}^{(2)} (\vec{v} \otimes \vec{v}) + \frac{1}{3!} L_{2 \times 8}^{(3)} (\vec{v} \otimes \vec{v} \otimes \vec{v}) = \dot{\vec{v}}^{(1)} + \dot{\vec{v}}^{(2)} + \dot{\vec{v}}^{(3)}. \quad (35)$$

С учетом (32)–(35) уравнение для эволюции первой компоненты v_1 векторной переменной $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$ для НДС ФХН запишется в виде уравнения

$$\dot{v}_1 = cv_2 + c(1 - u_1^{*2})v_1 - cu_1^*v_1^2 - \frac{1}{3}cv_1^3. \quad (36)$$

Вводя обозначения, аналогичные модели Ландау [3, 27]: $2\gamma_1 = c(1 - u_1^{*2})$, $\alpha_L = cu_1^*$, $\beta_L = c/3$, при заданных параметрах $a = 0,7$, $b = 0,8$, $c = 3,0$ и $u_1^* = -0,45$ получаем неравенства $\gamma_1 > 0$, $\alpha_L < 0$, $\beta_L > 0$, соответствующие условию жесткого самовозбуждения системы [27]. В этом случае наблюдаются переходы от стационарного режима сложной НДС к нестационарному режиму с возникновением сначала частоты ω_1 , а затем второй частоты ω_2 согласно теориям Ландау [3, 27] и Рюэля – Такенса [6], которые в последующем определяют циклы хаотического аттрактора в пространстве состояний НДС ФХН (рис. 2). Заметим, что НДС ФХН при вышеуказанных параметрах полностью соответствует необходимому условию возникновения неустойчивости вида (17), которое, как оказывается, приводит к жесткому самовозбуждению этой системы.

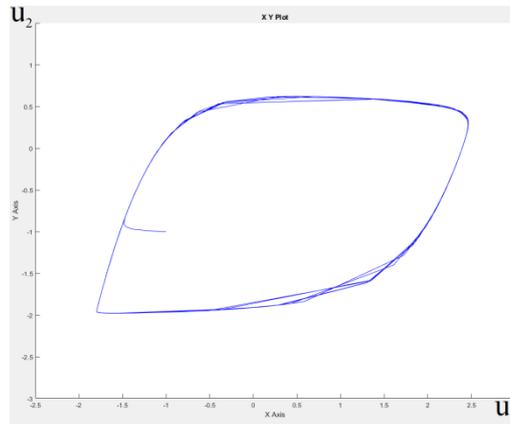


Рис. 2. Аттрактор, формирующийся на основе предельного цикла в пространстве состояний НДС ФХН

С целью детального исследования динамики НДС ФХН построим по результатам разложения в матричный ряд оператора этой системы (35) электронную модель (рис. 3).

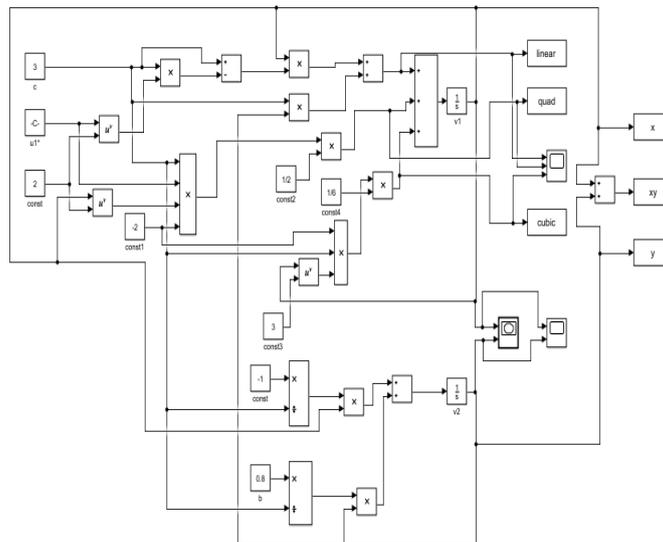


Рис. 3. Simulink-модель НДС ФХН, полученной методом матричной декомпозиции

На рис. 4 аттракторы НДС ФХН, сформированные на основе предельного цикла при заданных выше параметрах, построены на основе непосредственно численного интегрирования системы (10) и матричного разложения (35).

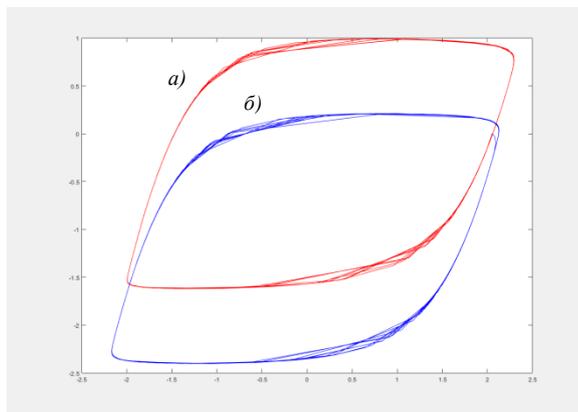


Рис. 4. Аттракторы НДС ФХН, построенные на основе матричной декомпозиции (а) и без ее использования (б)

Исследуем скорость изменения во времени первой компоненты v_1 векторной переменной $\vec{v} \in \mathfrak{R}^3$ для НДС ФХН. Синтезированная электронная модель демонстрирует разнообразные динамические режимы работы (рис. 5). Следовательно, согласно рис. 5 скорость изменения первой компоненты \dot{v}_1 векторной переменной $\vec{v} \in \mathfrak{R}^3$ для НДС ФХН эволюционирует таким образом, что выходные сигналы от кубического и квадратичного ядер, находясь в противофазе, частично компенсируют друг друга только на одном полупериоде, а на другом полупериоде эти же выходные сигналы синфазно складываются, чтобы синхронно «противодействовать» выходному сигналу от линейного ядра (рис. 5, б). Точнее, на одном полупериоде сигналы от ядер высших порядков $L_{2 \times 4}^{(2)}$ и $L_{2 \times 8}^{(3)}$ складываются и частично компенсируют сигнал от первого ядра $L_{2 \times 2}^{(1)}$, а на другом полупериоде сигналы от ядер низших порядков $L_{2 \times 2}^{(1)}$ и $L_{2 \times 4}^{(2)}$ складываются и частично компенсируют сигнал от третьего ядра $L_{2 \times 8}^{(3)}$, что в целом приводит к стабилизации амплитуды хаотического процесса.

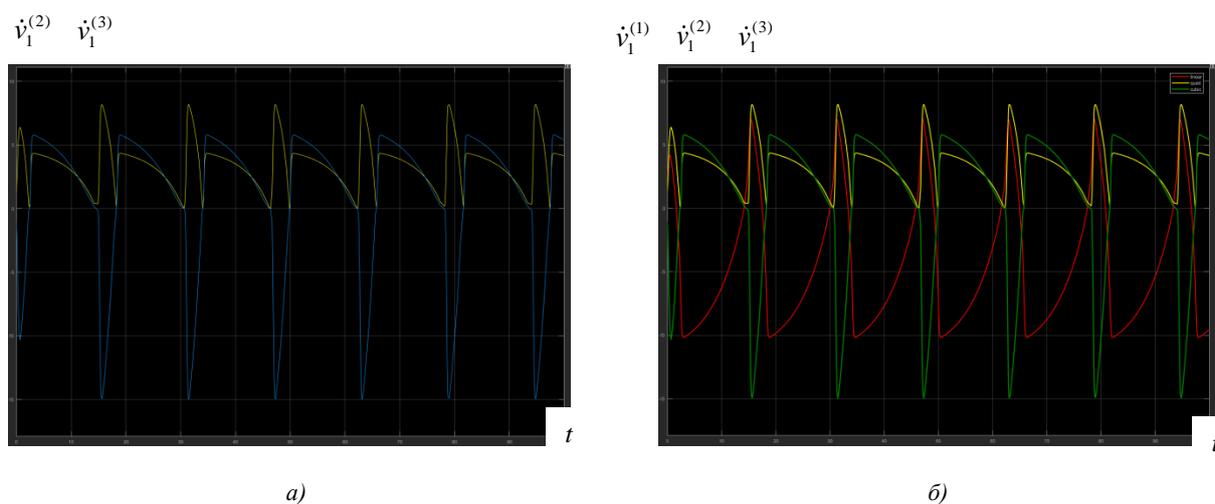


Рис. 5. Вид сигналов, порожденных квадратичным $L_{2 \times 4}^{(2)}$ и кубическим $L_{2 \times 8}^{(3)}$ ядрами (а) и линейным $L_{2 \times 2}^{(1)}$, квадратичным $L_{2 \times 4}^{(2)}$ и кубическим $L_{2 \times 8}^{(3)}$ ядрами (б) в общей модели (35) возникновения хаотических волновых процессов в сложной НДС ФХН

Итак, применение метода матричной декомпозиции позволило получить новые знания о динамике системы ФХН, в частности выявить эффект синхронизации сигналов с выходов четных и нечетных ядер. Кроме того, учет в электронной схеме (см. рис. 3) дополнительного управляющего параметра u_1^* открывает новые возможности для исследования ее динамики. Действительно, при $u_1^* = 1,942\ 908\ 996$ наблюдается качественно иной хаотический аттрактор в пространстве состояний НДС ФХН (рис. 6), нежели представленный на рис. 4, а. Причина состоит в том, что НДС ФХН при заданных параметрах $a = 0,7$, $b = 0,8$, $c = 3,0$ и $u_1^* = 1,942\ 908\ 996$ удовлетворяет второму необходимому условию неустойчивости (17а), приводящему к неравенствам $\gamma_1 < 0$, $\alpha_L > 0$, $\beta_L > 0$ в модели Ландау.

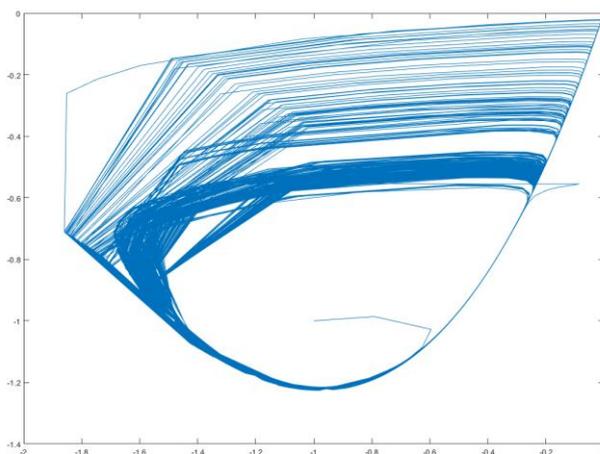


Рис. 6. Хаотический аттрактор НДС ФХН, полученный при значениях параметров $b = 0,8$, $c = 3,0$ и $u_1^* = 1,942\ 908\ 996$

На рис. 6 видно, что при наборе параметров $b = 0,8$, $c = 3,0$ и $u_1^* = 1,942\ 908\ 996$ возникает аperiodический режим, аналогичный аperiodическому режиму в химической модели реакции Белоусова – Жаботинского [9, 28].

Графики переменных с выходов линейного, квадратичного и кубического ядер при тех же значениях параметров показаны на рис. 7.

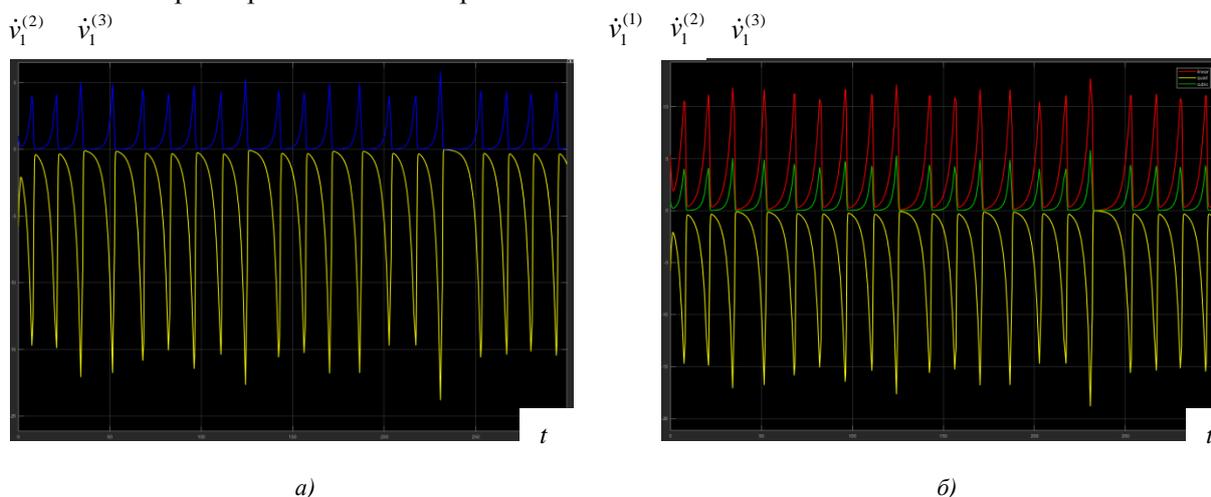


Рис. 7. Вид сигналов, порожденных квадратичным $L_{2 \times 4}^{(2)}$ и кубическим $L_{2 \times 8}^{(3)}$ ядрами (а) и линейным $L_{2 \times 2}^{(1)}$, квадратичным $L_{2 \times 4}^{(2)}$ и кубическим $L_{2 \times 8}^{(3)}$ ядрами (б) в общей модели (35) возникновения хаотических волновых процессов в сложной НДС ФХН

Сигналы с выходов ядер матричного разложения НДС ФХН (рис. 7, б) демонстрируют общее свойство сложной системы в хаотическом режиме – синхронное «противодействие» нелинейных процессов четных и нечетных порядков [10]. Таким образом, вычислительные эксперименты, проводимые при двух наборах параметров $u_1^* = -0,45$ и $u_1^* = 1,942\ 908\ 996$, показали, что в первом случае наблюдался предельный цикл (см. рис. 4, а), а во втором – хаотический аттрактор (см. рис. 6). Именно хаотическая динамика порождает самосинхронизацию автоколебаний как фактор самоорганизации НДС ФХН.

Другими словами, динамика системы различалась при разных условиях возникновения неустойчивости (17) и (17а), что видно из графиков на рис. 5 и 7, т. е. экспериментальные исследования показывают существенное влияние величины u_1^* на динамику системы. Результаты компьютерного моделирования показали, что применение метода матричной декомпозиции к сложной НДС ФХН позволяет получить новые данные о ее динамике (в частности, выявлена зависимость от величины u_1^*), а также оценить влияние нелинейностей высших порядков на хаотический режим функционирования системы, проявляющееся в эффекте самосинхронизации нелинейных автоколебаний с выходов ядер четных и нечетных порядков.

Заключение. Разработаны аналитические и имитационные модели возникновения процессов самоорганизации в активных электрохимических средах, моделируемых сложной НДС ФХН [11, 16–18, 28], на основе теории матричной декомпозиции А. М. Крота [10, 21–26]. Проведен нелинейный анализ аттракторов НДС ФХН на основе матричного ряда в пространстве состояний. Показано, что оператор системы дифференциальных уравнений ФХН представляется посредством линейного, квадратичного и кубического членов матричного ряда. Полученные члены матричного ряда положены в основу имитационной модели, использованной для проведения вычислительных экспериментов. По результатам экспериментов определены значения управляющих параметров, при которых возникают квазипериодический и хаотический режимы, и осуществлен бифуркационный анализ возникновения неустойчивости в НДС ФХН. Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что процесс возникновения хаотических автоколебаний в активной среде ФХН при выполнении необходимого условия неустойчивости (17) соответствует модели начальной турбулентности Л. Д. Ландау, приводящей к жесткому самовозбуждению этой системы. Однако при выполнении второго необходимого условия неустойчивости (17а) в статье найдено дополнительное условие возникновения и эволюции хаотических волновых процессов по сравнению с моделью Ландау. Это позволило установить, что при хаотическом режиме функционирования НДС ФХН возникает эффект самосинхронизации нелинейных автоколебаний с выходов четных и нечетных ядер матричного разложения. Таким образом, при достижении НДС ФХН хаотического режима наблюдается самосинхронизация автоколебаний как фактор самоорганизации активной среды ФХН.

Список использованных источников

1. Иваницкий, Г. Р. Автоволновые процессы: общие закономерности биологических, химических и физических активных сред / Г. Р. Иваницкий, В. И. Кринский // I Всесоюз. биофизический съезд. Секция 20. – Пушино : НЦБИ, 1982. – 28 с.
2. Васильев, В. А. Автоволновые процессы / В. А. Васильев, Ю. М. Романовский, В. Г. Яхно. – М. : Наука, 1987. – 240 с.
3. Ландау, Л. Д. К проблеме турбулентности / Л. Д. Ландау // Доклады АН СССР. – 1944. – Т. 44, № 8. – С. 339–342.
4. Крот, А. М. О классе дискретных квазистационарных линейных динамических систем / А. М. Крот // Доклады АН СССР. – 1990. – Т. 313, № 6. – С. 1376–1380.
5. Lorenz, E. N. Deterministic nonperiodic flow / E. N. Lorenz // J. of Atmospheric Sciences. – 1963. – Vol. 20, March. – P. 130–141.
6. Ruelle, D. On the nature of turbulence / D. Ruelle, F. Takens // Communications in Mathematical Physics. – 1971. – Vol. 20. – P. 167–192.
7. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах: от диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1979. – 512 с.
8. Хакен, Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. – М. : Мир, 1985. – 423 с.

9. Берже, П. Порядок в хаосе: о детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М. : Мир, 1991. – 368 с.
10. Крот, А. М. Эволюционная модель хаотических волновых процессов в сложных динамических системах на основе теории матричной декомпозиции / А. М. Крот // Доп. Нац. акад. наук України. – 2019. – № 9. – С. 12–19. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.09.012>
11. Скотт, Э. Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике / Э. Скотт. – М. : Сов. радио, 1977. – 368 с.
12. Hodgkin, A. L. A quantitative description of ion currents and its applications to conduction and excitation in nerve membranes / A. L. Hodgkin, A. F. Huxley // *J. of Physiology*. – 1952. – Vol. 117. – P. 500–544.
13. Fuortes, M. G. F. Interpretation of the repetitive firing of nerve cells / M. G. F. Fuortes, F. Mantegazzini // *J. of General Physiology*. – 1962. – Vol. 45. – P. 1163–1179.
14. Koch, C. Do neurons have a voltage or a current threshold for action potential initiation? / C. Koch, O. Bernander, R. J. Douglas // *J. of Computational Neuroscience*. – 1995. – No. 2. – P. 63–82.
15. Nandapurcar, P. J. Dynamically stability of untwisted scroll rings in excitable media / P. J. Nandapurcar, A. T. Winfree // *Physica D*. – 1989. – Vol. 35, no. 3. – P. 277–288.
16. Courtemanche, M. Stable tree-dimensional action potential calculation in the FitzHugh – Nagumo model / M. Courtemanche, W. Scaggs, A. T. Winfree // *Physica D*. – 1990. – Vol. 41, no. 1. – P. 173–182.
17. FitzHugh, R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane / R. FitzHugh // *Biophysical J*. – 1961. – Vol. 1. – P. 445–446.
18. Nagumo, J. S. An active pulse transmission line simulating nerve axon / J. S. Nagumo, S. Arimoto, S. Yoshisawa // *Proc. of the IRE*. – 1962. – Vol. 50. – P. 2061–2070.
19. Paydarfar, D. Dysrhythmias of the respiratory oscillator / D. Paydarfar, D. M. Buerkel // *Chaos*. – 1995. – Vol. 5, no. 1. – P. 18–29.
20. Дайлюденко, В. Ф. Моделирование процессов самоорганизации в активных средах / В. Ф. Дайлюденко, А. М. Крот // *Интеллектуальные системы : сб. науч. тр. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 1998. – Вып. 1. – С. 32–45.*
21. Krot, A. M. The decomposition of vector functions in vector-matrix series into state-space of nonlinear dynamic system / A. M. Krot // *EUSIPCO–2000 : Proc. X European Signal Processing Conf., Tampere, Finland, 4–8 Sept. 2000. – Tampere, 2000. – Vol. 3. – P. 2453–2456.*
22. Krot, A. M. Matrix decompositions of vector functions and shift operators on the trajectories of a nonlinear dynamical system / A. M. Krot // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2001. – Vol. 4, no. 2. – P. 106–115.
23. Крот, А. М. Анализ аттракторов сложных нелинейных динамических систем на основе матричных рядов в пространстве состояний / А. М. Крот // *Информатика*. – 2004. – № 1(1). – С. 7–16.
24. Krot, A. M. The development of matrix decomposition theory for nonlinear analysis of chaotic attractors of complex systems and signals / A. M. Krot // *DSP–2009 : Proc. 16th IEEE Intern. Conf. on Digital Signal Processing, Thira, Santorini, Greece, 5–7 July 2009. – Santorini, 2009. – P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icdsp.2009.5201123>*
25. Krot, A. M. Bifurcation analysis of attractors of complex systems based on matrix decomposition theory / A. M. Krot // *IEM 2011 : Proc. of IEEE Intern. Conf. on Industrial Engineering and Management, Zhengzhou, China, 12–14 Aug. 2011. – Zhengzhou, 2011. – P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icmss.2011.5999350>*
26. Крот, А. М. Анализ хаотических режимов функционирования схемы Чжуа с гладкой нелинейностью на основе метода матричной декомпозиции / А. М. Крот, В. А. Сычев // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 501–512. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-501-512>
27. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие для студентов физ. специальностей ун-тов : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского. – 3-е изд., перераб. – М. : Наука, 1986. – Т. 6 : Гидродинамика. – 736 с.
28. Ерофеенко, В. Т. Основы математического моделирования : курс лекций / В. Т. Ерофеенко, И. С. Козловская. – Минск : БГУ, 2002. – 195 с.

References

1. Ivanitsky G. R., Krinsky V. I. Avtovolnovye processy: obshhie zakonomernosti biologicheskikh, himicheskikh i fizicheskikh aktivnykh sred [Autowave processes: general laws of biological, chemical and physical active media]. I Vsesojuznyj biofizicheskij s"ezd. Sekcija 20 [*1st USSR Biophysical Congress. Section 20*]. Pushchino, Nauchnyj centr biologicheskikh issledovanij, 1982, 28 p. (in Russian).

2. Vasiliev V. A., Romanovsky Yu. M., Yakhno V. G. Avtovolnovye processy. *Autowave Processes*. Moscow, Nauka, 1987, 240 p. (in Russian).
3. Landau L. D. K probleme turbulentnosti [To the problem of turbulence]. *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the Academy of Sciences of USSR]*, 1944, vol. 44, no. 8, pp. 339–342 (in Russian).
4. Krot A. M. O klasse diskretnykh kvazistacionarnykh linejnykh dinamicheskikh sistem [On a class of discrete quasistationary linear dynamic systems]. *Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the Academy of Sciences of USSR]*, 1990, vol. 313, no. 6, pp. 1376–1380 (in Russian).
5. Lorenz E. N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1963, vol. 20, March, pp. 130–141.
6. Ruelle D., Takens F. On the nature of turbulence. *Communications in Mathematical Physics*, 1971, vol. 20, pp. 167–192.
7. Nicolis G., Prigogine I. *Self-organization in Nonequilibrium Systems: from Dissipative Structures to Order through Fluctuation*. New York, John Wiley&Sons, 1977, 512 p.
8. Haken H. *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1983, 356 p.
9. Bergé P., Pomeau Y., Vidal C. *L'ordre Dans le Chaos: Vers une Approche Déterministe de la Turbulence*. Paris, Hermann, 1988.
10. Krot A. M. Jevoljucionnaja model' haoticheskikh volnovykh processov v slozhnykh dinamicheskikh sistemah na osnove teorii matrichnoj dekompozicii [An evolutionary model of chaotic wave processes in complex dynamical systems based on the matrix decomposition theory]. *Dopovidi Nacional'noï akademii nauk Ukraïni [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, 2019, no. 9, pp. 12–19 (in Russian). <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.09.012>
11. Scott A. *Active and Nonlinear Wave Propagation in Electronics*. New York, London, etc., John Wiley&Sons, 1970, 326 p.
12. Hodgkin A. L., Huxley A. F. A quantitative description of ion currents and its applications to conduction and excitation in nerve membranes. *The Journal of Physiology*, 1952, vol. 117, pp. 500–544.
13. Fuortes M. G. F., Mantegazzini F. Interpretation of the repetitive firing of nerve cells. *The Journal of General Physiology*, 1962, vol. 45, pp. 1163–1179.
14. Koch C., Bernardier O., Douglas R. J. Do neurons have a voltage or a current threshold for action potential initiation? *Journal of Computational Neuroscience*, 1995, no. 2, pp. 63–82.
15. Nandapurcar P. J., Winfree A. T. Dynamically stability of untwisted scroll rings in excitable media. *Physica D*, 1989, vol. 35, no. 3, pp. 277–288.
16. Courtemanche M., Scaggs W., Winfree A. T. Stable tree-dimensional action potential calculation in the FitzHugh – Nagumo model. *Physica D*, 1990, vol. 41, no. 1, pp. 173–182.
17. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane. *Biophysical Journal*, 1961, vol. 1, pp. 445–446.
18. Nagumo J. S., Arimoto S., Yoshisawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon. *Proceedings of the IRE*, 1962, vol. 50, pp. 2061–2070.
19. Paydarfar D., Buerkel D. M. Dysrhythmias of the respiratory oscillator. *Chaos*, 1995, vol. 5, no. 1, pp. 18–29.
20. Dailudenko V. F., Krot A. M. Modelirovanie processov samoorganizacii v aktivnykh sredah [Modeling of processes of self-organization in active media]. *Intellektual'nye sistemy [Intelligent systems]*, Minsk, Institute of Technical Cybernetics of the National Academy of Sciences of Belarus, 1998, vol. 1, pp. 32–45 (in Russian).
21. Krot A. M. The decomposition of vector functions in vector-matrix series into state-space of nonlinear dynamic system. *EUSIPCO-2000: Proceedings X European Signal Processing Conference, Tampere, Finland, 4–8 September 2000*. Tampere, 2000, vol. 3, pp. 2453–2456.
22. Krot A. M. Matrix decompositions of vector functions and shift operators on the trajectories of a nonlinear dynamical system. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2001, vol. 4, no. 2, pp. 106–115.
23. Krot A. M. Analiz attraktorov slozhnykh nelinejnykh dinamicheskikh sistem na osnove matrichnykh rjadov v prostranstve sostojanij [Analysis of attractors of complex nonlinear dynamical systems based on matrix series in the state-space]. *Informatica [Informatics]*, 2004, vol. 1, no. 1, pp. 7–16 (in Russian).
24. Krot A. M. The development of matrix decomposition theory for nonlinear analysis of chaotic attractors of complex systems and signals. *DSP-2009: Proceedings 16th IEEE International Conference on Digital Signal Processing, Thira, Santorini, Greece, 5–7 July 2009*. Santorini, 2009, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icdsp.2009.5201123>
25. Krot A. M. Bifurcation analysis of attractors of complex systems based on matrix decomposition theory. *IEM 2011: Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Engineering and Management, Zhengzhou, China, 12–14 August 2011*. Zhengzhou, 2011, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icmss.2011.5999350>

26. Krot A. M., Sychou U. A. Analiz haoticheskikh rezhimov funkcionirovaniya shemy Chzhua s gladkoj nelinejnost'ju na osnove metoda matrichnoj dekompozicii [The analysis of chaotic regimes in Chua's circuit with smooth nonlinearity based on the matrix decomposition method]. *Vesti Natsyional'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-technichnykh navuk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series]*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 501–512 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-501-512>

27. Landau L. D., Lifschitz E. M. *Fluid Mechanics*. Oxford, Pergamon, 1959, vol. 6, 539 p.

28. Erofeenko V. T., Kozlovskaya I. S. *Fundamentals of Mathematical Modeling*. Minsk, Belarusian State University, 2002, 195 p. (in Russian).

Информация об авторах

Крот Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией моделирования самоорганизующихся систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: alxkrot@newman.bas-net.by

Павлов Станислав Игоревич, инженер-программист, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: staspavlov008@gmail.com

Information about the authors

Alexander M. Krot, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory of Self-Organization Systems Modeling, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: alxkrot@newman.bas-net.by

Stanislav I. Pavlov, Software Engineer, the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: staspavlov008@gmail.com

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

УДК 004.652, 004.891
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-25-35>

Поступила в редакцию 16.07.2020
Received 16.07.2020

Принята к публикации 17.08.2020
Accepted 17.08.2020

Агрегация и индексирование данных нескольких источников на основе графовой модели в базах данных медицинских экспертных систем

А. В. Курочкин[✉], В. С. Садов

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
[✉]E-mail: alex.v.kurochkin@gmail.com

Аннотация. Проблема агрегации информации является одной из ключевых при разработке и внедрении экспертных систем в медицинской практике. Как правило, общая информация о пациенте, а также данные о проводимых обследованиях являются частью нескольких разобщенных информационных систем, в каждой из которых используется своя схема представления и хранения информации. В работе рассматривается решение по агрегации данных об обследованиях и пациентах в медицинских учреждениях с использованием предложенного механизма формальных проекций, который позволяет унифицировать процесс извлечения информации из различных видов источников. Для представления информации о пациентах и обследованиях предлагается применение графовой модели, способствующей оптимизации поддержки запросов по отдельному пациенту и по совокупности исторических данных отдельного вида обследования. Показывается, что такое представление может быть использовано для централизованной обработки данных различными методами интеллектуального анализа.

Ключевые слова: агрегация данных, графовые схемы, графовые базы данных, медицинские базы данных, медицинские экспертные системы

Для цитирования. Агрегация и индексирование данных нескольких источников на основе графовой модели в базах данных медицинских экспертных систем / А. В. Курочкин, В. С. Садов // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 25–35. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-25-35>

Data aggregation and indexing support from multiple sources using graph model in medical expert system databases

Aliaksandr V. Kurachkin[✉], Vasili S. Sadau

Belarusian State University, Minsk, Belarus
[✉]E-mail: alex.v.kurochkin@gmail.com

Abstract. One of the key problems in developing and integrating expert systems for medical research is the problem of data aggregation. Most of the times, general information about the patient and data about undergone research procedures exist as part of several disconnected information systems, each using its own schema for presenting and storing information. The paper proposes a solution to aggregate research and patient data in medical establishments using formal projections mechanism, which allows to unify data extraction from separate data sources. Graph-based patient and research record representation is introduced, which allows to support and optimize complex queries for single patient and for a set of historical data from single research. Proposed representation mechanism is also shown to be effective for centralized processing using various data mining and intelligent analysis techniques.

Keywords: data aggregation, graph schemas, graph databases, medical databases, medical expert systems

For citation. Kurachkin A. V., Sadau V. S. Data aggregation and indexing support from multiple sources using graph model in medical expert system databases. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 25–35 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-25-35>

Введение. Медицинские экспертные системы находят все более широкое распространение в различных отраслях медицинской практики, в том числе хранении и сборе статистической информации, поддержке диагностики, а также планировании терапевтических мероприятий. По характеру входных данных медицинские экспертные системы можно условно разделить на системы, основывающиеся на данных, и системы, основывающиеся на правилах [1, 2].

Проблема извлечения исходных данных является ключевой как для экспертных систем на основе данных и гибридных систем, так и для систем на основе правил. Во многих случаях исходные данные для обучения систем на основе данных, а также для использования в качестве входных в системах на основе правил представлены разобщенными источниками [3]. Каждый из источников может предоставлять свой механизм доступа к данным (чтение из файловой системы, прямое подключение и использование языка запросов некоторой системы управления базами данных (СУБД), извлечение данных из сервисов посредством REST API, различные виды программных интерфейсов доступа и т. п.). Кроме того, в медицинской практике часто наблюдается значительное разнообразие инструментов по хранению и обработке информации о пациентах и отдельных обследованиях, так как множество программных решений распространяется совместно с медицинским оборудованием и не поддерживает автоматическую интеграцию с централизованной базой данных. Например, многие аппараты для проведения томографического обследования подразумевают выгрузку данных только на лазерные компакт-диски в формате DICOM.

В качестве решения проблемы извлечения исходных данных в работе предлагается алгоритм агрегации информации из различных источников с помощью механизма формальных проекций, основанный на адаптации информации из различных источников в строгую графовую схему и поддерживающий императивный (в виде последовательности команд) и декларативный (в виде описания) стиль задания самого процесса проекции разных форматов информации. Такое представление приближено к семантическому графу и открывает дополнительные возможности для интероперабельного взаимодействия в системах анализа информации.

Графовая модель данных для обработки результатов медицинских обследований. Графовые модели данных основаны на представлении всех сущностей и связей, находящихся в системе, в виде вершин и ребер некоторого ориентированного мультиграфа. В графовых моделях сущности, соответствующие вершинам графа, и сущности, соответствующие ребрам графа, являются в общем виде равноправными. Сущности, ассоциирующиеся с вершинами, задают информацию о некотором объекте, а сущности, ассоциирующиеся с ребрами, – информацию об отношении, в котором сущности в вершинах находятся друг относительно друга. Поскольку модель основана на мультиграфе, все отношения между узлами в терминах реляционной алгебры по определению являются отношениями типа «многое ко многому». При этом ребра, как и узлы, могут содержать в себе некоторую скалярную информацию в атрибутах с фиксированной или произвольной схемой [4].

Более формально обычный граф G представляет собой кортеж (V, E) , состоящий из множества вершин V и множества ребер $E \subseteq V \times V$. Графовая схема данных S может быть задана в виде модели графа с метками и свойствами, которая задается совокупностью множеств

$$S = (V, E, L, l_V, l_E, K, W, p_V, p_E), \quad (1)$$

где L – множество меток; $l_V : V \rightarrow 2^L$ и $l_E : E \rightarrow 2^L$ – функции вычисления меток как подмножества множества L для вершин и ребер соответственно; K – множество ключей (названий) свойств; W – множество значений свойств; $p_V : V \rightarrow 2^{K \times W}$ и $p_E : E \rightarrow 2^{K \times W}$ – функции, ставящие в соответствие вершинам $v_i \in V$ и ребрам $e_i \in E$ некоторое множество пар «ключ –

значение» $\{(k_i, w_i)\}$, $k_i \in K$, $w_i \in W$, а 2^X используется для обозначения множества всех подмножеств (булеана) известного множества X . Метки позволяют ввести понятия типа ребра и типа вершины, как правило, указывающего на тип доменной сущности, который соответствует этой вершине или ребру в графовой схеме. Метки могут применяться для группировки и выполнения запросов без привязки к конкретному входному узлу графа. Свойства моделируются в виде пар «ключ – значение» и используются для представления атрибутов графовой схемы. При этом можно дополнительно ввести связь конкретной метки $l_i \in L$ вершины или ребра со схемой атрибутов, соответствующей данной вершине или ребру, с помощью проекции вида

$$S_L(l_i): L \rightarrow 2^{K \times V}. \quad (2)$$

Хотя проекция (2) не является обязательной для задания графовой схемы данных в виде (1), на практике информация о наличии определенных атрибутов, их типе и ограничениях уже известна и задается метамоделью данных, поэтому такая проекция может использоваться дополнительно для введения типизации из метамодели в полученную схему и для упрощения доступа к этой схеме с применением программных интерфейсов.

При обработке данных медицинских систем различные виды обследований требуют разного представления, а само представление данных об обследовании определяется используемыми аппаратными и программными средствами диагностики. Можно выделить две основные составляющие с точки зрения формирования выборок, относительно которых должна строиться итоговая схема: относительно пациента и относительно обследования. Выборки относительно пациента подразумевают работу с отдельной медицинской картой и историей болезни пациента с агрегацией информации по различным видам обследований. Выборки относительно обследования подразумевают агрегацию результатов обследований и соответствующих диагнозов или исходов по всей совокупности пациентов, которые проходили этот вид обследования. В первом случае выборка осуществляется для оказания медицинских услуг отдельному пациенту и формирования общего представления о клинической картине с течением времени. Во втором случае выборка осуществляется для статистического анализа по некоторой конкретной патологии или конкретному виду обследования для вывода новых наблюдений по всему объему данного исследования, а также для разработки и тестирования медицинских экспертных систем и систем поддержки принятия решений по конкретному виду обследования [5].

Агрегация информации в медицинских системах с использованием механизма формальных проекций. Как уже упоминалось, одними из ключевых особенностей сбора информации в медицинских системах являются разнородность и разноплановость источников данных, систем обработки и долговременного хранения информации. В этой связи для организации централизованной обработки требуется введение дополнительного механизма преобразования данных из произвольного вида, который используется в существующих программных и аппаратных решениях, в тот вид, который был бы удобен для централизованной статистической обработки, индексирования и поддержки произвольных запросов.

Основной сложностью построения универсального механизма агрегации данных из различных источников является тот факт, что конечные схемы данных в каждом из таких источников могут значительно отличаться не только присутствующими в них сущностями, атрибутами и связями, но и самим подходом к организации данных в целом (рис. 1).

Аппаратные системы без собственного хранилища обычно представляют собой некоторую единицу диагностического оборудования для проведения специализированного обследования, которая связывается с персональным компьютером по некоторому проприетарному протоколу уровня драйвера и позволяет (напрямую или с помощью комплектного программного обеспечения) выгружать результаты в файловую систему компьютера в некотором фиксированном формате. Такие системы имеют ряд особенностей при программном доступе к данным, поскольку формат для выгрузки информации, как правило, является проприетарным и его интерпретация может быть затруднена.

Аппаратные системы с собственным хранилищем представляют собой интегрированное аппаратное диагностическое решение с встроенным или подключенным компьютером, на котором установлено специализированное программное обеспечение, позволяющее работать с данными, получаемыми с оборудования, а также хранить историческую информацию о проведенных обследованиях.

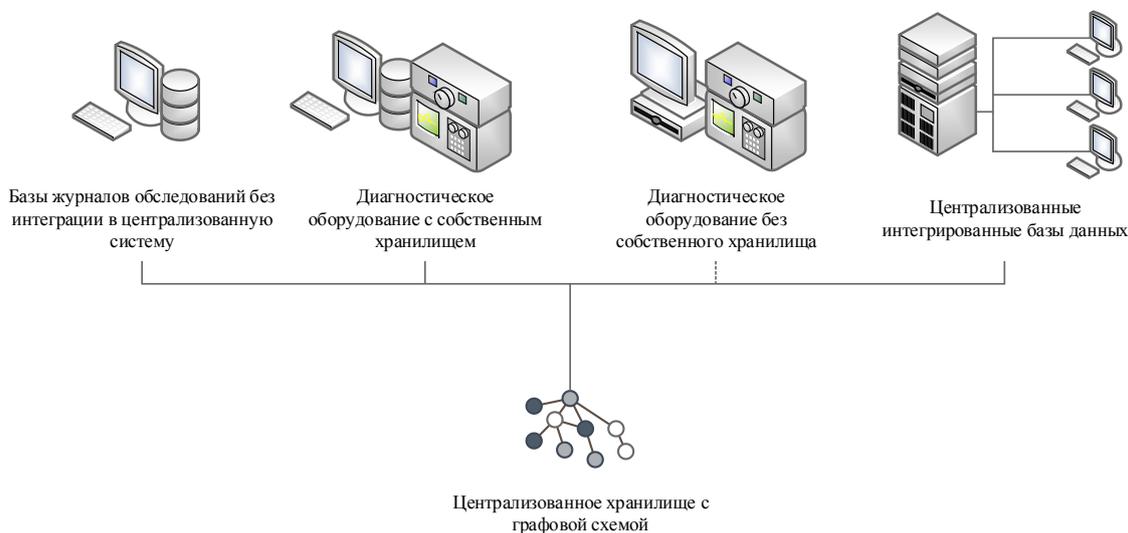


Рис. 1. Структурная схема агрегации данных из различных типов медицинских систем в централизованное хранилище с графовой схемой

Базы данных или журналы обследований без интеграции в центральную систему являются наиболее распространенным видом хранения исторических данных о проводимых обследованиях. Такие системы могут быть представлены базой данных или сводной таблицей, которая заполняется вручную специалистом, проводящим обследование. Для этих систем характерно наличие строгой схемы, вариативности в описании однотипных данных даже с учетом имеющейся схемы из-за ошибок и вводимых условных обозначений, а также, в некоторых случаях, денормализованной структуры.

Централизованные интегрированные базы данных медицинского учреждения представляют собой единую систему учета пациентов в рамках конкретного медицинского учреждения (карточки, истории болезней и т. п.) в виде серверного приложения, подключение к которому может осуществляться с помощью клиентских приложений на рабочих местах специалистов. Как правило, в рамках медицинского учреждения разворачивается не более одной системы такого типа. Кроме того, такие системы имеют строгую схему и предоставляют достаточно простой клиентский программный интерфейс, который значительно облегчает доступ к чтению с любого узла, подключенного к серверу.

Каждый из видов информационных систем требует отдельного подхода к извлечению данных для их дальнейшего использования в графовой схеме. Чтобы упростить задачу агрегации данных об одних и тех же объектах в различных частях медицинских систем, предлагается использовать механизм формальных проекций [6]. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма агрегации информации с использованием формальных проекций. В основе предложенного алгоритма лежит метамодель – описательное представление отдельных типов выходной информации, по которой в дальнейшем выполняется формальная проекция. Особенностью алгоритма является задание модификаций графовой схемы в виде последовательности команд в декларативном стиле, что позволяет предоставлять реализации самих модификаций независимо от их описания. Алгоритм генерации такой последовательности команд с помощью формальной проекции показан на рис. 3.

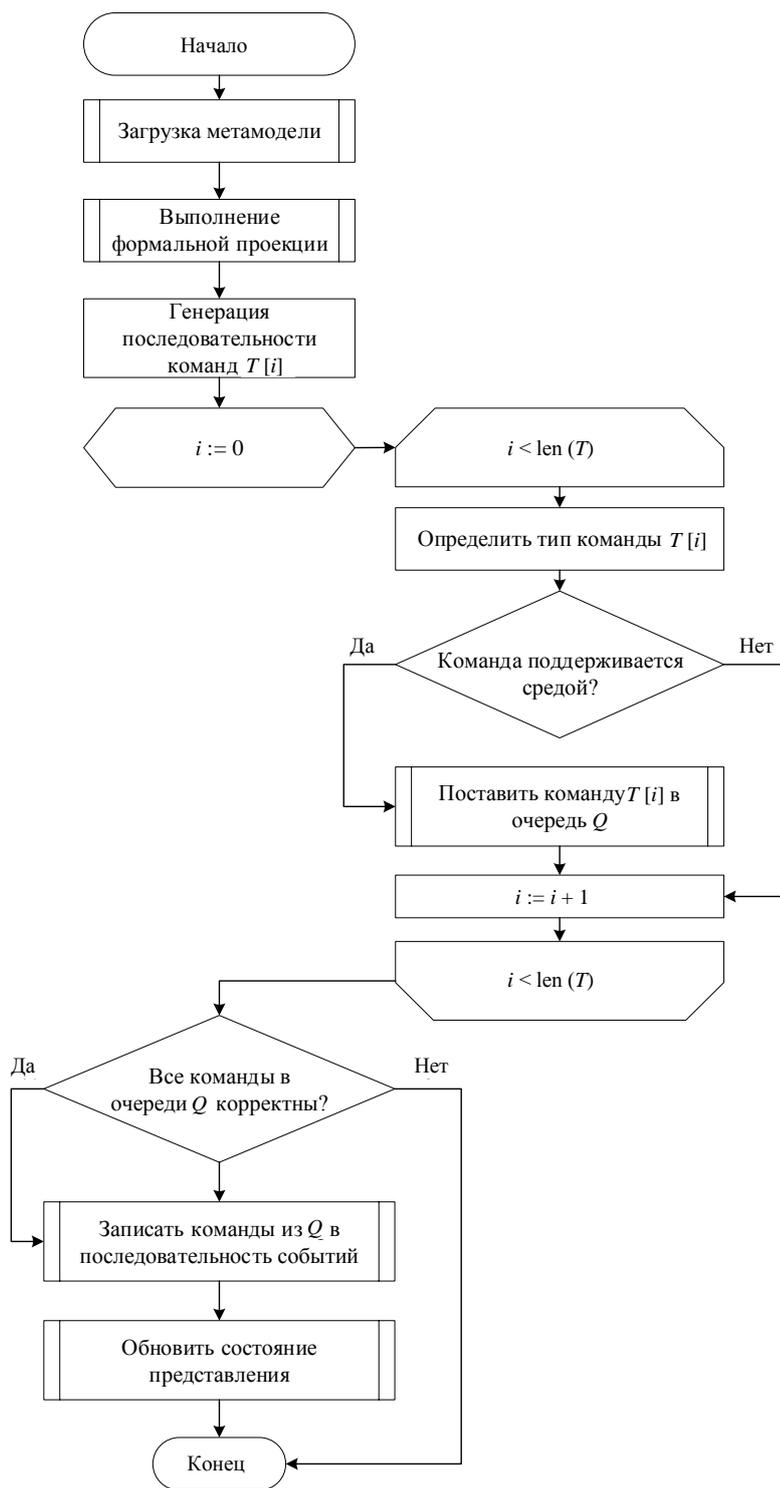


Рис. 2. Алгоритм извлечения информации из отдельного источника для обновления централизованного состояния представления с использованием формальных проекций

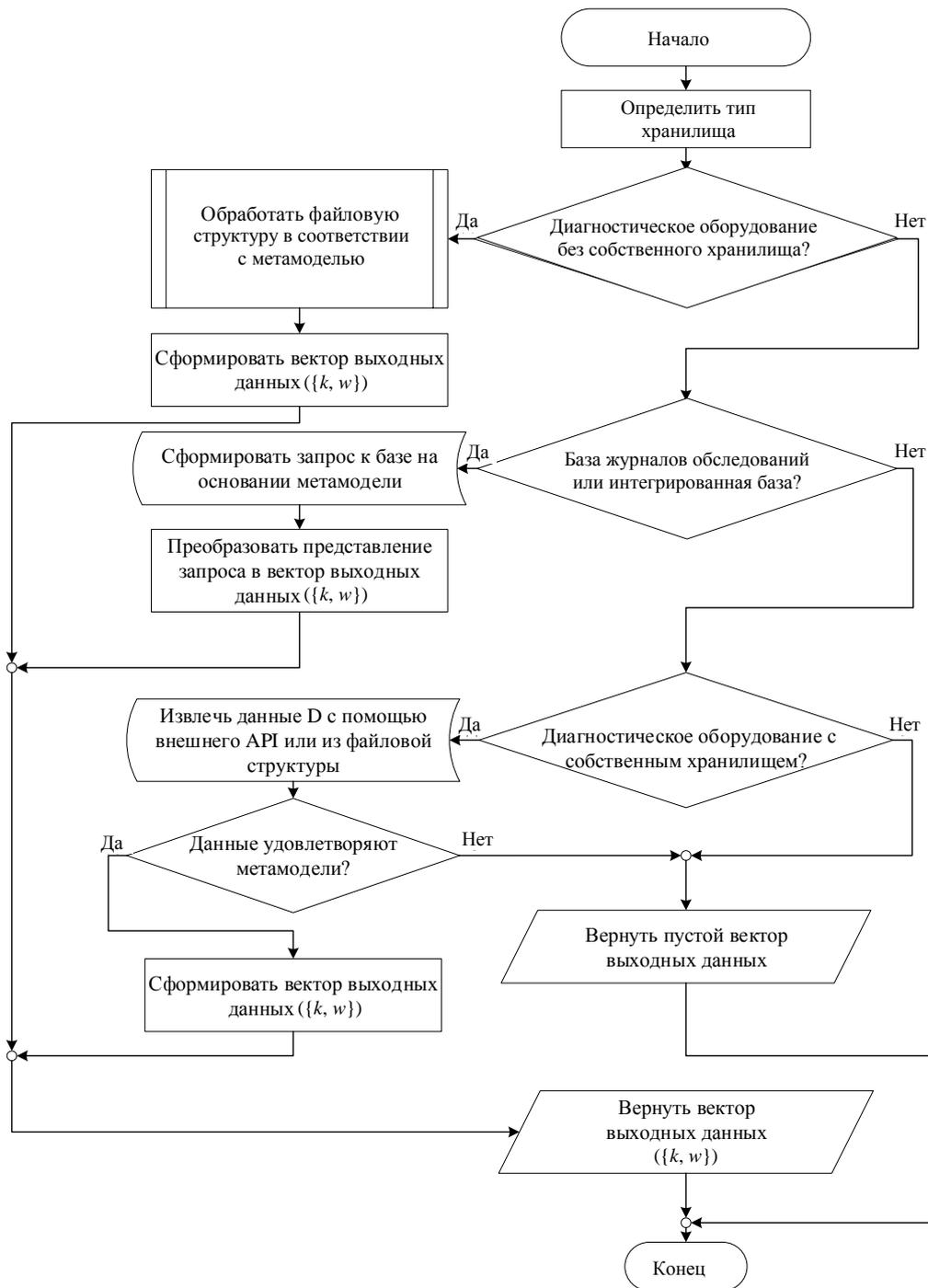


Рис. 3. Алгоритм формальной проекции – генерации вектора выходных данных по метамодели на основании имеющейся в системе информации в зависимости от вида ее хранилища

Под формальной проекцией подразумевается процедура произвольного вида, представленная в виде программы или сценария, которая по запросу позволяет принять данные из конкретной системы, относящейся к одному из описанных типов, и сгенерировать по этим данным набор декларативных описаний операций модификации информации в рамках графовой схемы по некоторой начальной временной метке. По сути, подобный сценарий или процедура представляют собой единичную проекцию для конкретной информационной системы, поэтому при наличии набора таких проекций итоговый набор инструкций для актуализации графовой схемы является сверткой по этим проекциям. Более строго формальная проекция может быть пред-

ставлена в виде функции $p: X \rightarrow \{o_i\}$, где X – множество всех возможных данных в информационной системе в исходном виде, $o_i \in O$ – описание операции по модификации графовой схемы. Сбор информации осуществляется в два этапа: проекцией (map) для формирования операций и сверткой (reduce) для их выполнения – аналогично алгоритму MapReduce [4, 6]. Каждая операция o_i , в свою очередь, позволяет задавать операцию удаления или создания вершины $v_i \in V$, удаления или создания ребра $e_i \in E$, задания или удаления метки $l_i \in L$, удаления атрибута по значению ключа $k_i \in K$ или модификации атрибута по ключу $k_i \in K$ и новому значению $w_i^* \in W$. Модификация самой схемы представлена в виде оператора

$$f_T : (S, \{o_i\}) \rightarrow S. \quad (3)$$

Смысл оператора модификации схемы (3) заключается в генерации ее нового представления в соответствии с набором описаний операций по модификации. Оператор является линейным относительно операции объединения множеств операций O .

Как показано на рис. 3, формальные проекции реализуются различными способами для разных видов хранилищ в исходных системах. Для аппаратных систем без собственного хранилища проекции осуществляются на основании некоторого представления (как правило, файлового) по результатам обследования. При работе с системами с собственным хранилищем и интегрированными системами проекция может осуществлять выборку по данным из хранилищ этих систем, а также синхронизироваться с собственным хранилищем по расписанию. Кроме того, если система поддерживает уведомления о модификации, синхронизация может быть инициирована ими. При работе с базами данных или журналами обследований одним из вариантов организации проекции является предоставление интерфейса для ввода данных специалистом, проводящим обследование.

Основные составляющие графовой схемы для обработки результатов медицинских исследований. Использование графовых моделей при проектировании схемы хранения данных для медицинских систем обосновывается следующими обстоятельствами:

1. В качестве вершин в модели предлагается вводить узлы, соответствующие пациентам, и узлы, соответствующие каким-либо видам обследования. При такой организации данных ребра, связывающие узел конкретного пациента с узлом определенного вида обследования, представляют собой протокол прохождения отдельным пациентом данного вида обследования.

2. При работе с пациентами удобно в качестве входной точки использовать узел, соответствующий конкретному пациенту: при обходе только ребер соответствующего узла будет доступна информация о всех протоколах обследования этого пациента вне зависимости от их вида. Такое представление удобно для просмотра общей истории болезни и может использоваться для постановки комплексного диагноза.

3. При работе с конкретным диагностическим оборудованием или конкретной областью медицинской диагностики в качестве входной точки может использоваться узел, соответствующий определенному виду обследования. Такое представление удобно для исследования в рамках конкретного заболевания или области диагностики для сбора статистической информации о результатах проводимого обследования, установления зависимостей, проверки статистических гипотез и разработки систем поддержки принятия решений на основании исторических данных.

Схема данных может быть конкретизирована типизацией для узлов, соответствующих пациентам, а также для связей как произвольного, так и конкретного типа обследования. Пример базы данных, реализованной по описанной графовой схеме и визуализированной с помощью СУБД Neo4j [7], показан на рис. 4. На представленной схеме выделено три типа узлов: пациент, обследование и врач – и два типа связей: протокол обследования как связь между пациентом и обследованием и специализация врача как связь между врачом и обследованием. При этом связи, соответствующие протоколам обследования, имеют некоторую совокупность обобщенных атрибутов (например, дату проведения обследования) и различные схемы в зависимости от целевого обследования. В частности, для обследования, соответствующего оптической коге-

рентной томографии, в протоколе могут указываться различные измеренные функциональные показатели. Кроме того, количество связей также не ограничено, так как модель представляет собой мультиграф. Это означает, что можно создавать несколько отдельных протоколов одного и того же обследования одного и того же пациента (например, как показано на рис. 4) и записывать в отдельные протоколы результаты оптической когерентной томографии для правого и левого глаза.

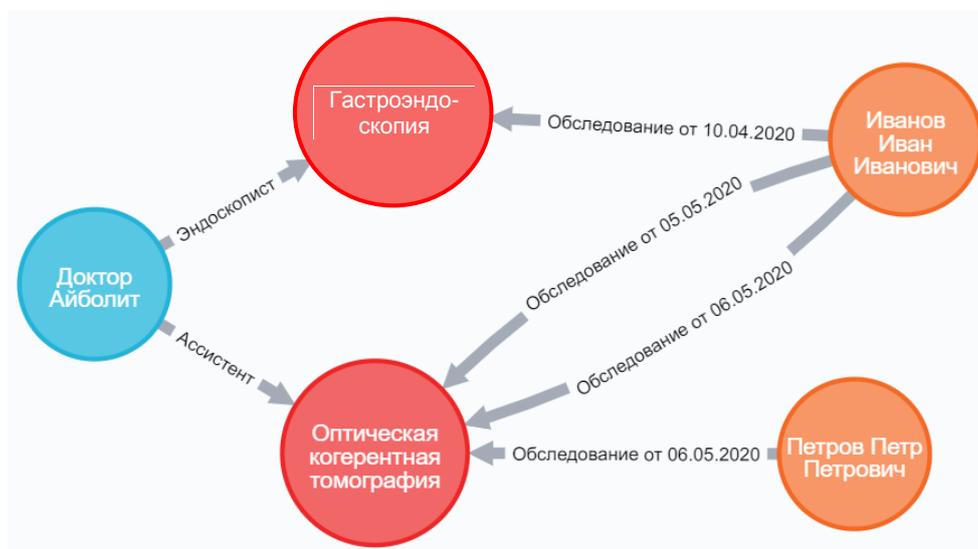


Рис. 4. Наполнение графовой схемы для обработки результатов медицинских обследований для двух пациентов, двух различных видов обследования и четырех протоколов обследований

Ключевой особенностью предложенной схемы является простота обхода полученного графа для извлечения соответствующей информации о пациенте и обследованиях.

Сравнительная характеристика предложенной графовой модели и аналогичной схемы данных, выраженной с помощью реляционной или документно-ориентированной схемы, представлена в таблице. Для реляционной схемы данных, аналогичной представленной на рис. 4, необходимо использовать девять отдельных таблиц, а появление нового обследования вызывает необходимость добавлять каждый раз еще три таблицы, т. е. модифицировать схему данных, что является весьма затратной операцией.

Сравнительная характеристика асимптотической вычислительной сложности операций выборки

Тип операции	Реляционная схема	Документная схема	Графовая схема
Выборка информации по пациенту	Поиск отношения по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$	Поиск документа по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$	Поиск узла графа по индексу $O(\log n)$
Выборка информации по протоколу об обследовании	Поиск отношения по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$	Поиск документа по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$	Поиск ребра графа по индексу $O(\log n)$ или хеш-индексу $O(1)$
Выборка протоколов по пациенту	Объединение таблиц по индексу $O(m \log n)$ или по хеш-индексу $O(n)$	Выборка вложенных документов $O(1)$	Переход по связанным ребрам с единичным шагом $O(1)$
Выборка протоколов по обследованию	Объединение таблиц по индексу $O(m \log n)$ или по хеш-индексу $O(n)$	Линейный поиск с выборкой вложенных документов $O(n + m)$	Переход по связанным ребрам с единичным шагом $O(1)$

Для реализации выборки коллекций на аналогичной реляционной схеме требуется осуществлять операцию объединения таблиц, имеющую асимптотическую квазилинейную или линейную вычислительную сложность в зависимости от организации индексов. В документно-

ориентированной схеме с вложенным хранением документов выборка с одной стороны связи может осуществляться за константное время, но при этом асимптотическая сложность выборки с другой стороны связи будет близка к квадратичной. В рамках графовой схемы по ссылке на конкретный узел, связанный с пациентом, или конкретный узел, связанный с обследованием, необходим только один шаг перехода по связям (обход на глубину 1), который в современных графовых СУБД осуществляется асимптотически за время, близкое к константному, что в значительной степени влияет на производительность системы с увеличением количества обрабатываемых данных.

Изменение времени выполнения запросов с ростом количества элементов в хранилище также оценивалось экспериментально. В качестве основного нагрузочного запроса используется выборка протоколов обследований. Для реляционной схемы применялась СУБД PostgreSQL с хеш-индексами для внешних ключей, для документно-ориентированной схемы – СУБД MongoDB с вложенным хранением документов, для графовой схемы – СУБД Neo4j с предложенной архитектурой хранения данных. Все измерения проводились в режиме хранения данных в оперативной памяти на тестовом компьютере с ЦПУ Intel Core i7-8700K и 32 ГБ ОЗУ с равномерным увеличением количества записей (рис. 5).

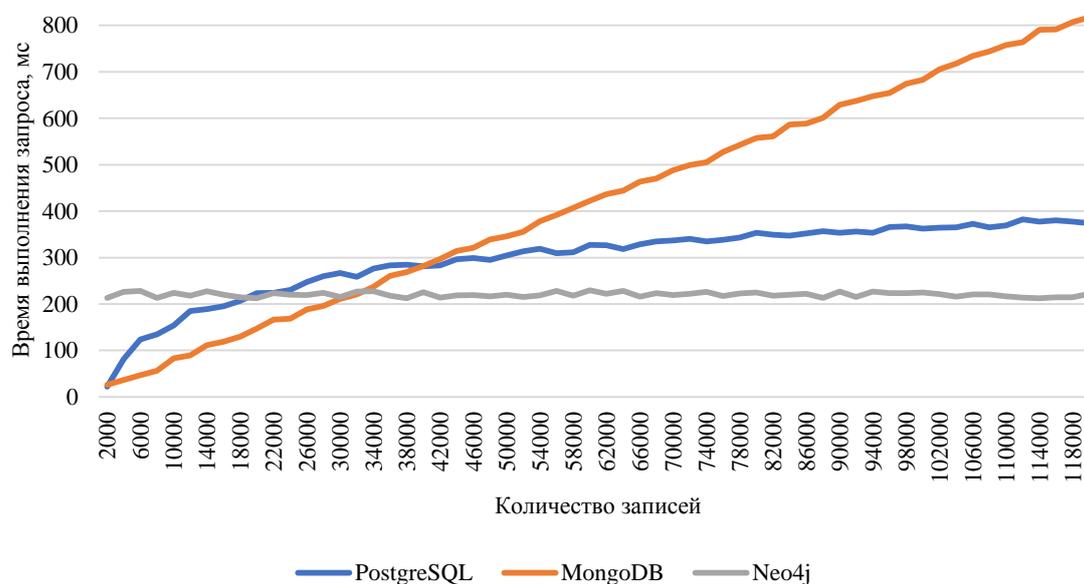


Рис. 5. Время выполнения запросов к СУБД с увеличением объема данных

Согласно представленным экспериментальным зависимостям документно-ориентированная схема показывает наибольшую производительность при небольшом количестве записей (до 22 000), но линейная асимптотическая сложность значительно увеличивает время выполнения запроса с ростом объема выборки. Следует также отметить, что линейный поиск с выборкой вложенных документов может осуществляться по пациентам, а не по протоколам, но в этом случае представленный характер зависимости будет наблюдаться у выборки по протоколам. Реляционная схема на использованных объемах данных демонстрирует логарифмический характер роста времени выполнения запроса благодаря оптимизациям операции объединения по хеш-индексу. Тем не менее уже для 18 000 записей время выполнения становится выше по сравнению с графовой схемой. Использование графовой схемы дает возможность реализовать выборку за постоянное время (хотя при передаче данных приложению может наблюдаться линейная задержка), что позволяет наиболее оптимальным образом осуществлять работу с большими объемами данных. При обработке 200 000 записей наблюдается почти двукратное ускорение по сравнению с реляционной схемой.

Полученные результаты свидетельствуют о значительно более оптимальной производительности графовой схемы при необходимости поддержки запросов и о конкретном пациенте, и о конкретном виде обследования без потери гибкости самой схемы.

Выборки для поиска конкретного пациента или конкретного вида обследования по значениям полей в графовых базах данных могут быть оптимизированы с помощью известных подходов к индексированию. Графовая схема также является намного более гибкой, поскольку не требует строгой типизации и скалярности отдельных атрибутов входящих в нее узлов и связей, что позволяет добавлять поддержку произвольных данных об обследовании без необходимости проведения миграций схемы [4, 7].

Заключение. Задача организации данных в медицинских системах является важнейшим направлением исследований. Основную сложность при построении адекватных моделей организации данных представляет необходимость работы с разнородными и разобщенными источниками данных об обследованиях, которые помимо различных схем самих хранящихся в них данных предоставляют отличающиеся и несовместимые способы доступа к этим данным.

В работе для агрегации информации из различных источников в медицинских системах предлагается использовать механизм формальных проекций, который позволяет унифицировать процесс извлечения информации о конкретном виде обследования способом, не зависящим от формата информации и метода доступа к ней. Это дает возможность осуществить извлечение данных в общую схему. Кроме того, предлагаемый механизм может применяться в качестве промежуточного слоя доступа к данным для облегчения формирования запросов, не заменяя при этом уже существующие системы и использующиеся в них хранилища, что упрощает и ускоряет развертывание системы.

Для непосредственно обработки полученной агрегированной информации предлагается использовать графовую систему управления базами данных с размещением информации о пациентах и видах обследования в узлах графовой схемы и размещением информации о протоколах прохождения конкретного обследования некоторым пациентом в виде связей (ребер) в этой схеме. Предложенный подход позволяет оптимизировать выборку информации по совокупности обследований конкретного пациента для просмотра общей истории болезни, формирования клинической картины и упрощения постановки комплексного диагноза, а также выборку по совокупности протоколов обследований конкретного вида обследования, что дает возможность анализировать статистические зависимости, разрабатывать и тестировать медицинские экспертные системы и системы поддержки принятия решений, опирающиеся на исторические данные. Особенности рассматриваемой модели являются необязательная типизация и отсутствие необходимости задания строгой схемы данных, что позволяет модифицировать и добавлять атрибуты как в информацию о пациенте, так и в используемые протоколы обследований без необходимости введения новых абстракций и выполнения миграций схем данных. Это очень удобно при работе со слабоструктурированными данными, получаемыми с помощью предложенного механизма формальных проекций с различных видов диагностического обследования.

Список использованных источников

1. Abu-Nasser, B. S. Medical expert system survey / B. S. Abu-Nasser // Intern. J. of Engineering and Information Systems (IJEAIS). – 2017. – Vol. 1, iss. 7. – P. 218–224.
2. Jain, L. C. Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine / L. C. Jain, A. Kandel, H. N. L. Teodorescu. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 393 p.
3. Sadalage, P. J. NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence / P. J. Sadalage, M. Fowler. – Hoboken : Addison-Wesley Professional, 2012. – 192 p.
4. Robinson, I. Graph Databases: New Opportunities for Connected Data / I. Robinson, J. Webber, E. Eifrem. – 2nd ed. – O'Reilly Media, 2015. – 238 p.
5. Роль искусственных нейронных сетей в выявлении ранней гибели ганглионарных клеток сетчатки у пациентов с дегенеративными оптиконеуропатиями / Т. В. Качан [и др.] // Офтальмология. Восточная Европа. – Минск, 2019. – Т. 9, № 4. – С. 445–458.
6. Чернявский А. Ф. Обработка и индексирование денормализованных и слабоструктурированных данных / А. Ф. Чернявский, А. В. Курочкин, В. С. Садов // Прикладные проблемы оптики, информатики,

радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы Пятой Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2019. – С. 164–165.

7. Baton, J. Learning Neo4j 3.x / J. Baton, R. van Bruggen. – Birmingham : Packt, 2017. – 316 p.

References

1. Abu-Nasser B. S. Medical expert system survey. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*, 2017, vol. 1., iss. 7, pp. 218–224.

2. Jain L. C., Kandel A., Teodorescu H. N. L. *Fuzzy and Neuro-Fuzzy Systems in Medicine*. Boca Raton, CRC Press, 2017, 393 p.

3. Sadalage P. J., Fowler M. *NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence*. Hoboken, Addison-Wesley Professional, 2012, 192 p.

4. Robinson I., Webber J., Eifrem E. *Graph Databases: New Opportunities for Connected Data*. O'Reilly Media, 2015, 238 p.

5. Kachan, T., Kurachkin A., Halavataya K., Marchanka L, Fedulau A., ..., Mushtina T. Rol' iskusstvennykh nejronnyh setej v vyjavlenii rannej gibeli ganglionarnykh kletok setchatki u pacientov s degenerativnymi optiko-nejropatijami [The role of artificial neural networks in detecting early death of retinal ganglion cells in patients with degenerative optoneuropathies]. *Oftalmologia. Vostochnaya Evropa [Ophthalmology. Eastern Europe]*. Minsk, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 445–458 (in Russian).

6. Chernyavsky A. F., Kurachkin A. V., Sadau V. S. Obrabotka i indeksirovanie denormalizovannykh i slabostrukturirovannykh dannykh [Processing and indexing of denormalized and loosely structured data]. *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostojaniya: materialy Pjatoj Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii [Proceedings of the 5th International Conference "Applied Problems of Optics, Informatics, Radiophysics and Condensed Matter Physics"]*. Minsk, 2019, pp. 164–165 (in Russian).

7. Baton J., Bruggen van R. *Learning Neo4j 3.x*. Birmingham, Packt, 2017, 316 p.

Информация об авторах

Курочкин Александр Васильевич, аспирант, старший преподаватель кафедры интеллектуальных систем, факультет радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

E-mail: alex.v.kurochkin@gmail.com

Садов Василий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры интеллектуальных систем, факультет радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

E-mail: sadov@bsu.by

Information about the authors

Aliaksandr V. Kurachkin, Postgraduate student, Senior Lecturer, Department of Intelligent Systems, Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University, Minsk, Belarus.

E-mail: alex.v.kurochkin@gmail.com

Vasili S. Sadau, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Intelligent Systems, Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University, Minsk, Belarus.

E-mail: sadov@bsu.by

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

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЧИ

SIGNAL, IMAGE AND SPEECH PROCESSING

УДК 004.93'1; 004.932
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-36-43>

Поступила в редакцию 03.02.2020
Received 03.02.2020

Принята к публикации 25.08.2020
Accepted 25.08.2020

Распознавание подстилающей поверхности Земли с помощью сверточной нейронной сети на одноплатном микрокомпьютере

Д. А. Павленко[✉], В. А. Ковалев, Э. В. Снежко, В. А. Левчук, Е. И. Печковский

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*
[✉]E-mail: dmitri.pavlenko@gmail.com

Аннотация. Приводятся результаты разработки программно-аппаратного комплекса (микромодуля) по обнаружению и классификации изображений подстилающей поверхности Земли. Микромодуль используется на борту легких беспилотных летательных аппаратов (дронов). Полученное устройство имеет размеры 5,2×7,4×3,1 см, массу 52 г, работает на одноплатном микрокомпьютере модели Raspberry Pi Zero Wireless и использует сверточную нейронную сеть на основе архитектуры MobileNetV2 для классификации изображений в реальном времени. При разработке микромодуля авторы преследовали цель добиться качества классификации изображений в реальном времени на недорогом мобильном оборудовании с малой вычислительной способностью, сопоставимого с качеством классификации популярными архитектурами глубоких сверточных сетей. Приведенные в статье сведения могут быть полезны инженерам и научным работникам, разрабатывающим компактные бюджетные мобильные системы обработки, анализа и распознавания изображений.

Ключевые слова: распознавание изображений, сверточная нейронная сеть, глубокое обучение, одноплатный микрокомпьютер, мобильная система

Благодарности. Работа была выполнена при финансовой поддержке проекта № 3.2.4.1 программы Союзного государства «Технология-СГ».

Для цитирования. Распознавание подстилающей поверхности Земли с помощью сверточной нейронной сети на одноплатном микрокомпьютере / Д. А. Павленко [и др.] // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 36–43. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-36-43>

Recognition of underlying surface using a convolutional neural network on a single-board computer

Dzmitry A. Paulenka, Vassili A. Kovalev, Eduard V. Snezhko, Vitali A. Liauchuk, Evgeniy I. Pechkovsky

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*
[✉]E-mail: dmitri.pavlenko@gmail.com

Abstract. The results of the development of hardware and software system (micromodule), which detects and classifies underlying surface images of the Earth are presented. The micromodule can be installed on board of a light unmanned aerial vehicle (drone). The device has the size 5.2×7.4×3.1 cm, the weight 52 g, runs on a Raspberry Pi Zero Wireless single-board microcomputer and uses a convolutional neural network based on

MobileNetV2 architecture for real-time image classification. When developing the micromodule, the authors aimed to achieve a real-time image classification on inexpensive mobile equipment with low computing power so that the classification quality is comparable to popular deep convolutional network architectures. The provided information could be useful for engineers and researchers who are developing compact budget mobile systems for processing, analyzing and recognition of images.

Keywords: image recognition, convolutional neural network, deep learning, single-board computer, mobile system

Acknowledgements. This work was carried out with the financial support of Project no. 3.2.4.1 of the Technology-SG Union State Program.

For citation. Paulenka D. A., Kovalev V. A., Snezhko E. V., Liauchuk V. A., Pechkovsky E. I. Recognition of underlying surface using a convolutional neural network on a single-board computer. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 36–43 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-36-43>

Введение. Автоматическая классификация изображений подстилающей поверхности, а также поиск и распознавание объектов на видео- и фотоизображениях являются важными задачами современной обработки изображений. Автоматическое распознавание местности с использованием изображений подстилающей поверхности исключает длительный и утомительный просмотр видеоматериалов операторами наземных пунктов управления, сокращает время подготовки необходимых данных, повышает достоверность выбора, уменьшает потребление энергии от бортовых источников за счет автоматического отбора интересующих участков и уменьшает время задержки между поступившим сигналом и откликом на него.

Современные одноплатные микрокомпьютеры и смартфоны обладают достаточной вычислительной мощностью для размещения на них программного обеспечения (ПО) с целью автоматического нахождения и классификации изображений. Это позволяет проводить предварительную обработку информации непосредственно на самом принимающем устройстве без передачи большого объема информации на сервер.

Авторы статьи разработали микромодуль, который является программно-аппаратным комплексом и состоит из одноплатного микрокомпьютера с необходимым вспомогательным оборудованием, а также сверточной нейронной сети (СНС) на основе архитектуры MobileNetV2 для обработки полученной информации. При этом ставилась цель добиться классификации изображений в реальном времени на оборудовании с очень маленькой вычислительной способностью.

Основные функции микромодуля. Микромодуль является автономной системой для автоматического распознавания изображений подстилающей поверхности: лесов различных видов, промышленных сооружений, водоемов, дорог, полей, кустарников, дачных застроек, сельскохозяйственных угодий с растительностью, находящейся на различных стадиях роста, и т. д.

Конкретные целевые классы задаются в полетном задании с помощью СНС, которая разработана с использованием технологии глубокого обучения (Deep Learning). С помощью встроенной видеокамеры микромодуль получает изображения поверхности, которые затем классифицирует в соответствии с полетным заданием. При необходимости кадры видеопоследовательности могут сохраняться на внешнем носителе микромодуля для последующего анализа.

Взаимодействие между микромодулем и основным бортовым компьютером сводится к передаче в реальном времени выявленного класса текущего изображения подстилающей поверхности и значения вероятности его достоверного определения. Класс «ноль» означает, что текущее изображение не относится ни к одному из целевых классов, заданных в полетном задании. Решение о выполнении высококачественной съемки, записи и передачи изображений на наземный пункт управления принимается основным бортовым компьютером или на наземном пункте управления.

Компьютер микромодуля является вычислительной системой со всем необходимым ПО, средствами разработки программ и интерфейсным оборудованием. Реализация микромодуля с помощью схемотехнических решений из отдельных специализированных компонентов (микрочипов, цифровых сигнальных процессоров (DSP), чипсетов, систем на кристалле и др.) в данной статье не рассматривается.

Устройство аппаратной части микромодуля. Аппаратная часть микромодуля (рис. 1) состоит из защитного корпуса, одноплатного микрокомпьютера Raspberry Pi Zero Wireless, карты памяти microSDHC, камеры Raspberry Pi Zero V1.3 Mini Camera, Li-Po, аккумулятора типа ROBITON емкостью 720 мА·ч, платы зарядки аккумуляторной батареи и соединительных проводов.

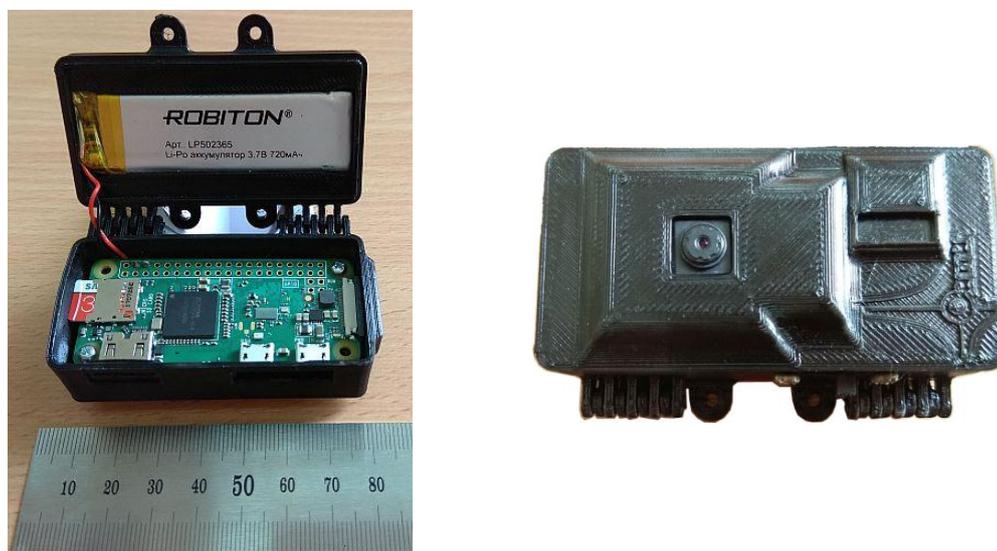


Рис. 1. Аппаратная часть микромодуля

Диапазон высот, на которых может применяться микромодуль, и разрешение обрабатываемых снимков зависят от полетного задания, т. е. от базы изображений, используемой при обучении искусственной нейронной сети. СНС может классифицировать только снимки, похожие на те, на которых она обучалась. Если предоставить нейронной сети снимки с текстурой или разрешением, на которых она не обучалась, то будут получены неверные результаты.

Рекомендуемые высоты для полетов микромодуля составляют от 300 до 600 м. Разрешение всего снимка зависит от камеры. Снимок разбивается сканирующим (скользящим) окном на мелкие изображения, которые ужимаются до размера 96×96 пикселей и обрабатываются искусственной нейронной сетью. При этом в сканирующее окно должны попадать более или менее однородные участки поверхности одного типа. Если в сканирующем окне будет несколько различных типов поверхностей, то лучше снизить высоту и обучить искусственную нейронную сеть на меньших высотах либо применить другую задачу мультиклассификации, когда на изображении находятся несколько типов поверхностей, а не один. Габариты микромодуля $5,2 \times 7,4 \times 3,1$ см, масса 52 г, максимальное энергопотребление при полезной нагрузке $1,75 \pm 0,25$ Вт.

Для сокращения времени на производство, снижения трудоемкости изготовления и себестоимости изделия корпус микромодуля изготовлен на 3D-принтере методом послойной экструзии расплавленной нити из поликарбоната. Целесообразность выбора оборудования, сравнительный анализ вычислительных микроплатформ и требования технического задания к программно-аппаратному комплексу подробно описаны в работе [1].

Устройство программной части микромодуля. ПО микромодуля состоит из полетной и наземной частей (рис. 2). Полетная часть предназначена для обработки изображений и видеопотока, отбора и сжатия информации, наземная – для создания базы изображений и формирования полетных заданий. Между наземной и полетной частями микромодуля налажена беспроводная связь Wi-Fi для старта, обмена данными и мониторинга работы ПО. В свою очередь, полетная часть микромодуля работает в двух режимах: обработки изображений и обработки видеопотока.

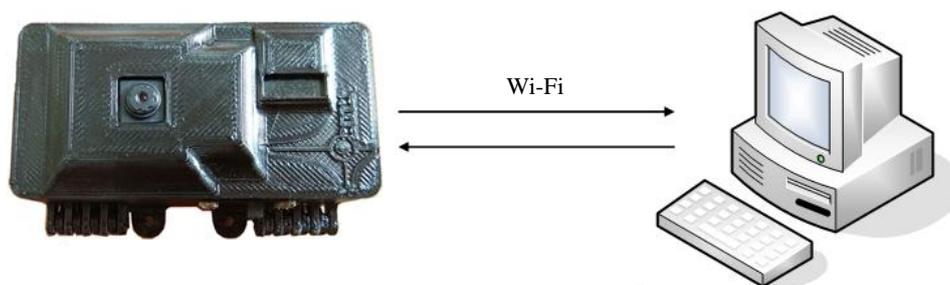


Рис. 2. Полетная и наземная части микромодуля

В режиме обработки изображений полетная часть микромодуля принимает на вход файлы изображений, с помощью сканирующего окна разбивает большое изображение на маленькие части, проводит оперативное распознавание, отбор и сжатие информации каждой маленькой части и возвращает только те типы подстилающей поверхности, которые требуется найти в соответствии с полетным заданием.

В режиме обработки видеопотока полетная часть микромодуля принимает на вход кадры видеопотока, проводит оперативное распознавание, отбор и сжатие видеoinформации и возвращает кадры с найденными на них типами подстилающей поверхности в соответствии с полетным заданием. В режиме обработки видеопотока обрабатывается весь кадр целиком. В режиме обработки изображений большое изображение разрезается на маленькие части, и каждая часть обрабатывается отдельно.

ПО написано на языках программирования Python и Си. Операционная система полетной части – Raspbian Jessie, наземной части – Ubuntu Linux.

На наземной части оператор формирует полетное задание и передает его на полетную часть. Полетная часть находится на борту квадрокоптера или беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Микромодуль прикрепляется к летательному средству. Во время полета микромодуль в режиме реального времени обрабатывает кадры видеопотока с камеры либо сканирует поступающие ему на вход по Wi-Fi снимки и выдает индексы и изображения найденных целевых классов в соответствии с полетным заданием. Для обработки изображений применяется СНС на основе архитектуры MobileNetV2 [2].

В настоящее время разработанное устройство не сопрягается с БПЛА и, соответственно, не влияет на процесс его полета. Однако можно предположить, что в случае необходимости получения обратной связи о полете БПЛА и автоматической его коррекции представленное устройство может быть успешно интегрировано с устройством управления БПЛА. В рамках данной статьи рассматривается вопрос обеспечения принципиальной возможности автономной обработки и анализа изображений (видеопоследовательностей) на борту БПЛА малыми вычислительными средствами. Результатом работы микромодуля является передача на наземную часть информации о классификации изображений. Каким образом полученная информация может быть использована для полета БПЛА, в статье не рассматривается.

Архитектура разработанной сверточной нейронной сети. Главная задача микромодуля – это оперативное распознавание изображений подстилающей поверхности, т. е. анализ кадров видеопоследовательности для режима обработки видеопотока или последовательности изображений, на которые разбивается большое изображение, для режима обработки изображений и отнесение их к одному из классов, указанных в полетном задании.

Малая скорость вычислений на одноядерном процессоре с архитектурой ARMv6 (1 ГГц) и небольшой размер оперативной памяти (512 Мб) микрокомпьютера не позволили применить ни одну из широко известных нейронных сетей (AlexNet, VGG16, GoogLeNet и т. д.), поэтому была реализована специализированная архитектура СНС на основе MobileNetV2 [2].

Разработанная СНС имеет 11 блоков (всего 106 слоев), таких же, как в MobileNetV2, и выходной блок, адаптированный для классификации изображений подстилающей поверхности Земли. Кроме сокращения количества основных блоков с 13 до 11, в работе используются следующие технические приемы реализации вычислений, которые учитывают особенности архитектуры аппаратного обеспечения микромодуля:

- предварительно выделяется память для всех внутренних буферов СНС при ее инициализации;
- адреса всех выделенных буферов в памяти выравниваются по значению 0xff;
- некоторые буферы выделяются локально в функциях для более быстрого доступа к данным;
- память для переменных выделяется по возможности локально в функциях, а адреса выравниваются по значению 0xff;
- значения переменных вычисляются предварительно для их повторного использования;
- используется минимально необходимое количество ветвлений;
- в некоторых местах ветвления заменяются на другие конструкции с эквивалентным результатом с целью сокращения промахов доступа к кешам данных и инструкций процессора;
- все циклы выполнения критически важных вычислений развертываются в секции линейного кода для возможности осуществления векторизованных операций (т. е. для одновременного выполнения однотипных операций над данными в соседних ячейках памяти с целью минимизации времени обработки, а также сокращения промахов доступа к кешам данных и инструкций).

При реализации различных типов свертки всегда важно, чтобы проход по буферам памяти, в которых хранятся данные и веса СНС, был последовательным. Это также позволяет сократить количество дорогостоящих промахов по кешам процессора.

Для каждого из типов сверток СНС, в особенности для наиболее используемых сверток в глубину и точечных сверток (с ядрами 1×1), были реализованы процедуры, которые учитывают характеристики их реализации и позволяют выполнять последовательный проход по буферам в памяти в наибольшем количестве случаев. Такие процедуры реализованы с помощью «отложенных» вычислений, когда результирующее значение в некоторой ячейке выходного тензора формируется как сумма вычислений, полученных при разнесенных по времени проходах.

Время работы точечной свертки с ядрами 1×1 зависит от размеров входного и выходного тензоров. Поэтому для тензоров, у которых высота и ширина больше шести, и тензоров, у которых эти измерения меньше либо равны шести, были реализованы две процедуры, отличающиеся между собой способами организации данных в памяти.

В целом применение техник по оптимизации СНС позволило сократить время получения выходного вектора от СНС для одних и тех же данных приблизительно в пять раз по сравнению с временем получения выходного вектора от оригинальной архитектуры MobileNetV2.

Процесс решения задачи распознавания состоит из двух этапов:

- тренировки (обучения) нейронной сети на выборке изображений целевых классов подстилающей поверхности, которая выполняется на наземной части ПО микро модуля;
- оперативного распознавания изображений на полетной части ПО микро модуля.

ПО формирования полетных заданий наземной части микро модуля разработано с использованием библиотеки Keras и выполняет обучение нейронной сети на мощной видеокарте. Результатом формирования полетного задания является обученная нейронная сеть, которая затем переносится на полетную часть микро модуля. Туда же переносится и файл, содержащий значения весов обученной сети.

Для оперативного распознавания типов подстилающих поверхностей на полетной части микро модуля на языке программирования С была разработана авторская библиотека функций для импорта весов СНС и вычисления значений выходного вектора по входным изображениям с последующим выводом результатов. При такой реализации скорость классификации одного трехканального изображения размером 96×96 пикселей на одноядерном процессоре с архитектурой ARMv6 и частотой 1 ГГц составляет в среднем 280 мс, или 3,5 кадра в секунду.

Оценка качества распознавания. Для обучения искусственной нейронной сети были подготовлены две базы изображений с различными типами подстилающей поверхности Земли (рис. 3).

Скачивание карт подстилающей поверхности было выполнено на бесплатном программном обеспечении SAS.Планета (SASPlanet, URL: <http://www.sasgis.org>), проекция карт – Mercator / Google Maps, масштаб карт – Z18.



Рис. 3. Примеры различных типов подстилающей поверхности Земли

Разметка карт и получение базы изображений с различными типами подстилающей поверхности производились на ПО Manual image annotation with polygons (URL: https://github.com/foobar167/junkyard/tree/master/manual_image_annotation1). Данная утилита разработана авторами статьи и является частью наземного ПО микромодуля.

Первая база изображений состоит из восьми типов подстилающей поверхности: озеро, город, поле, лес, шоссе, дорога, река, дачи. В формировании полетного задания задействовано 40 000 изображений размером 256×256 пикселей каждое. При обучении искусственной нейронной сети на вход микромодуля подаются изображения размером 256×256 пикселей, которые в процессе обработки сжимаются до 96×96 пикселей и затем классифицируются с помощью СНС. Для предотвращения эффекта переобучения изображения для обучающей выборки сделаны в окрестностях Минска, а для проверочной выборки – в окрестностях Бреста и оз. Нарочь. Результаты работы СНС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Матрица неточностей СНС для восьми типов подстилающей поверхности

Класс изображения	Озеро	Город	Поле	Лес	Шоссе	Дорога	Река	Дачи
Озеро	0,81	0,00	0,05	0,13	0,00	0,00	0,01	0,00
Город	0,03	0,60	0,04	0,01	0,07	0,01	0,01	0,23
Поле	0,04	0,00	0,95	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Лес	0,60	0,00	0,02	0,32	0,00	0,00	0,05	0,00
Шоссе	0,00	0,01	0,04	0,01	0,73	0,11	0,10	0,01
Дорога	0,00	0,00	0,01	0,00	0,05	0,91	0,04	0,00
Река	0,03	0,00	0,09	0,02	0,05	0,29	0,47	0,04
Дачи	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,06	0,00	0,92

Доля изображений, для которых вероятность принадлежности к одному из типов подстилающей поверхности превышает пороговое значение, составляет 0,86. Средняя точность классификации равна 0,71. В таблицах жирным шрифтом по диагонали матрицы выделены верные значения точности, а жирным курсивом отмечены самые большие значения ошибочных классификаций.

Из табл. 1 видно, что класс «город» программа часто путает с классом «дачи», потому что они похожи по текстуре. Класс «лес» часто ошибочно определяется как «озеро», возможно, из-за того, что «озеро» выделяется вместе с поросшими лесом берегами. Класс «река» путается с классом «дорога», возможно, из-за того, что проселочные дороги часто идут вдоль рек. Поэтому на изображениях реки выделены вместе с дорогами, т. е. на одном изображении находятся сразу несколько типов подстилающей поверхности.

Рассмотрим матрицу неточностей для популярной нейронной сети GoogLeNet (табл. 2). Из таблицы видно, что качество классификации у GoogLeNet для одной и той же базы изображений лишь незначительно лучше, чем у разработанной авторами искусственной нейронной сети.

Таблица 2

Матрица неточностей GoogLeNet для восьми типов подстилающей поверхности

Класс изображения	Озеро	Город	Поле	Лес	Шоссе	Дорога	Река	Дачи
Озеро	0,91	0,00	0,01	0,05	0,01	0,00	0,02	0,00
Город	0,10	0,60	0,00	0,00	0,15	0,01	0,01	0,13
Поле	0,04	0,00	0,94	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Лес	0,55	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00	0,01	0,00
Шоссе	0,01	0,00	0,05	0,00	0,73	0,07	0,13	0,00
Дорога	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,95	0,03	0,00
Река	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,11	0,87	0,00
Дачи	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,91

Доля изображений, для которых вероятность принадлежности к одному из классов превышает пороговое значение, составляет 0,88. Средняя точность классификации равна 0,79.

Вторая база изображений состоит из 11 классов: каньон, город, пустыня 1, пустыня 2 (другая текстура), поле, лес, озеро, горы, саванна, море, болото – всего 282 700 изображений каждое размером 256×256 пикселей (табл. 3).

Таблица 3

Матрица неточностей СНС 11 типов подстилающей поверхности

Класс изображения	Каньон	Город	Пустыня 1	Пустыня 2	Поле	Лес	Озеро	Горы	Саванна	Море	Болото
Каньон	9991	0	0	0	0	0	8	1	0	0	0
Город	0	8000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Пустыня 1	0	0	5967	33	0	0	0	0	0	0	0
Пустыня 2	0	0	0	5000	0	0	0	0	0	0	0
Поле	0	0	0	0	7500	0	0	0	0	0	0
Лес	0	0	0	0	0	6000	0	0	0	0	0
Озеро	0	0	0	0	0	0	6000	0	0	0	0
Горы	16	0	0	0	17	0	0	6959	0	0	4
Саванна	3	1	0	0	0	0	0	0	7984	0	0
Море	0	0	0	0	2	0	0	0	0	6998	0
Болото	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5500

Высокое качество распознавания для второй базы объясняется тем, что она специально была составлена из изображений, которые в отличие от изображений первой базы совершенно не похожи между собой и не содержат несколько типов подстилающей поверхности на одном изображении.

Был проведен сравнительный анализ качества распознавания между разработанной СНС и популярными архитектурами нейронных сетей: LeNet, AlexNet и GoogLeNet. Результаты сравнительного анализа [3] показывают, что представленная архитектура СНС сопоставима по качеству распознавания с популярными архитектурами глубоких сверточных сетей.

Заключение. В Объединенном институте проблем информатики НАН Беларуси разработан программно-аппаратный комплекс (микромодуль) по обнаружению и классификации изображений подстилающей поверхности Земли. Аппаратная часть микромодуля имеет низкое энергопотребление, малые размеры и массу. Стоимость комплектующих микромодуля не превышает 200 белорусских рублей.

Разработанная СНС отличается надежностью, которая сопоставима с популярными архитектурами глубоких сверточных сетей. Малое время обработки одного кадра позволяет устанавливать данную сеть на мобильные микроплатформы с небольшой вычислительной мощностью. Однако точность распознавания зависит от качества базы изображений, которая применяется для обучения нейронной сети.

При дальнейшей разработке программно-аппаратного комплекса авторы планируют перейти от задачи классификации изображений (image classification) к задаче поиска объектов на изображении (object detection), а также к мультиклассификации, когда на одном изображении находятся сразу несколько типов подстилающей поверхности.

Список использованных источников

1. Сравнительный анализ вычислительных платформ для бортового микро модуля предварительного распознавания изображений / В. А. Ковалев [и др.] // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 7–21.
2. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks / Sandler M. [et al.] // arXiv preprint. arXiv:1801.04381, 2018. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1801.04381>. – Date of access: 03.02.2020.
3. Интеллектуальная технология распознавания подстилающей поверхности Земли / С. В. Кругликов [и др.] // Радиоэлектронные технологии. – 2019. – № 1. – С. 90–94.

References

1. Kovalev V. A., Paulenka D. A., Snezhko E. V., Liauchuk V. A., Kalinovski A. A. Sravnitel'nyj analiz vychislitel'nyh platform dlja bortovogo mikromodulja predvaritel'nogo raspoznavaniya izobrazhenij [Comparative analysis of computing platforms for onboard micromodule of provisional image recognition]. *Informatika [Informatics]*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 7–21 (in Russian).
2. Sandler M., Howard A., Zhu M., Zhmoginov A., Chen L. C. *MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks*, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1801.04381> (accessed 03.02.2020).
3. Kruglikov S. V., Kovalev V. A., Paulenka D. A., Snezhko E. V., Liauchuk V. A. Intellektualnaya tekhnologiya raspoznavaniya podstilayushchey poverkhnosti Zemli [Intelligent technology for recognizing the underlying surface of the Earth]. *Radiojelektronnye tehnologii [Radioelectronic Technology]*, 2019, no. 1, pp. 90–94 (in Russian).

Информация об авторах

Павленко Дмитрий Анатольевич, инженер-программист, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: dmitri.pavlenko@gmail.com

Ковалев Василий Алексеевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией анализа биомедицинских изображений, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: vassili.kovalev@gmail.com

Снежко Эдуард Витальевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: eduard.snezhko@gmail.com

Левчук Виталий Андреевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: vitali.liauchuk@gmail.com

Печковский Евгений Игоревич, ведущий инженер-программист, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: zver927@gmail.com

Information about the authors

Dzmitry A. Paulenka, Software Engineer, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: dmitri.pavlenko@gmail.com

Vassili A. Kovalev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Biomedical Images Analysis, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: vassili.kovalev@gmail.com

Eduard V. Snezhko – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: eduard.snezhko@gmail.com

Vitali A. Liauchuk – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: vitali.liauchuk@gmail.com

Evgeniy I. Pechkovsky – Leading Software Engineer, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: zver927@gmail.com

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

ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
LOGICAL DESIGN

УДК 519.711
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-44-53>

Поступила в редакцию 06.05.2020
Received 06.05.2020

Принята к публикации 04.06.2020
Accepted 04.06.2020

**Эвристический метод алгебраической декомпозиции
частичных булевых функций**

Ю. В. Поттосин

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
E-mail: pott@newman.bas-net.by*

Аннотация. Задача декомпозиции булевой функции заключается в представлении заданной булевой функции в виде суперпозиции некоторых булевых функций, каждая из которых имеет меньшее число аргументов, чем исходная. Алгебраическая декомпозиция (в англоязычной литературе *bi-decomposition*) представляет заданную функцию в виде некоторой заданной операции алгебры логики над двумя булевыми функциями, и эта задача сводится к их определению. Предлагается эвристический метод алгебраической декомпозиции для не полностью определенных (частичных) булевых функций. Исходная булева функция задается двумя множествами, одно из которых представляет собой область булева пространства аргументов, где функция имеет значение 1, а другое – область булева пространства, где функция имеет значение 0. Рассматривается полный граф ортогональности булевых векторов, составляющих область определения заданной функции. В нем выделяются ребра, концы каждого ребра соответствуют элементам булева пространства, на которых функция имеет различные значения. Задача алгебраической декомпозиции сводится к задаче о двухблочном взвешенном покрытии множества выделенных ребер указанного графа его полными двудольными подграфами (бикликами). Каждой биклике приписывается определенным образом дизъюнктивная нормальная форма (ДНФ), и весом биклики считается пара некоторых параметров соответствующей ДНФ. По каждой из биклик полученного покрытия строится булева функция, аргументы которой – переменные из элементарной конъюнкции минимального ранга соответствующей ДНФ, что является решением задачи алгебраической декомпозиции. Предлагается методика получения указанного покрытия для двух видов выходной функции.

Ключевые слова: частичная булева функция, декомпозиция булевой функции, суперпозиция функций, операции алгебры логики, задача о покрытии, полный двудольный подграф графа, эвристический метод

Для цитирования. Поттосин, Ю. В. Эвристический метод алгебраической декомпозиции частичных булевых функций / Ю. В. Поттосин // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 44–53. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-44-53>

**A heuristic method for bi-decomposition of partial
Boolean functions**

Yuri V. Pottosin

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
E-mail: pott@newman.bas-net.by*

Abstract. The problem of decomposition of a Boolean function is to represent a given Boolean function in the form of a superposition of some Boolean functions whose number of arguments are less than the number of given function. The bi-decomposition represents a given function as a logic algebra operation, which is also

given, over two Boolean functions. The task is reduced to specification of those two functions. A method for bi-decomposition of incompletely specified (partial) Boolean function is suggested. The given Boolean function is specified by two sets, one of which is the part of the Boolean space of the arguments of the function where its value is 1, and the other set is the part of the space where the function has the value 0. The complete graph of orthogonality of Boolean vectors that constitute the definitional domain of the given function is considered. In the graph, the edges are picked out, any of which has its ends corresponding the elements of Boolean space where the given function has different values. The problem of bi-decomposition is reduced to the problem of a weighted two-block covering the set of picked out edges of considered graph by its complete bipartite subgraphs (bicliques). Every biclique is assigned with a disjunctive normal form (DNF) in definite way. The weight of a biclique is a pair of certain parameters of assigned DNF. According to each biclique of obtained cover, a Boolean function is constructed whose arguments are the variables from the term of minimal rank on the DNF. A technique for constructing the mentioned cover for two kinds of output function is described.

Keywords: partial Boolean function, Boolean function bi-decomposition, superposition of functions, logic algebra operations, covering problem, complete bipartite subgraph, heuristic method

For citation. Pottosin Yu. V. A heuristic method for bi-decomposition of partial Boolean functions. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 44–53 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-44-53>

Введение. Под декомпозицией булевой функции понимается ее представление в виде суперпозиции двух или более функций, каждая из которых в некотором смысле проще исходной. Задача декомпозиции булевых функций является одной из важных и сложных задач в области логического проектирования, успешное решение которой непосредственно влияет на качество и стоимость проектируемых цифровых устройств, а также дает возможность в ряде случаев заменить сложную задачу аппаратной реализации булевой функции от большого числа переменных на более простую задачу реализации нескольких функций с гораздо меньшим числом аргументов.

Существует довольно много различных видов декомпозиции булевой функции [1]. Одним из таких видов является алгебраическая декомпозиция (англ. bi-decomposition). Задача алгебраической декомпозиции ставится следующим образом. Для заданной булевой функции $y = f(\mathbf{x})$, где компонентами вектора $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ являются булевы переменные, составляющие множество X , требуется найти суперпозицию $f(\mathbf{x}) = \varphi(g_1(\mathbf{z}_1), g_2(\mathbf{z}_2))$, где компонентами векторов \mathbf{z}_1 и \mathbf{z}_2 являются переменные из множеств $Z_1 \subset X$ и $Z_2 \subset X$ соответственно. Вид функции φ от двух переменных также задан. Это может быть любая из десяти булевых функций, существенно зависящих от обеих переменных и представляемых операциями алгебры логики. Обычно множества Z_1 и Z_2 заданы и $Z_1 \cap Z_2 = \emptyset$. Такая декомпозиция называется *разделительной* в отличие от *неразделительной* декомпозиции, где условие $Z_1 \cap Z_2 = \emptyset$ необязательно, но при этом на мощности множеств Z_1 и Z_2 могут быть наложены ограничения.

Известны примеры применения методов алгебраической декомпозиции для повышения быстродействия схем [2, 3] и при синтезе схем на базе программируемой вентильной матрицы (FPGA) [4]. Задача алгебраической декомпозиции при функции φ , выражаемой операцией сложения по модулю 2, при заданном разбиении (Z_1, Z_2) рассматривается в работе [5], где для ее решения предлагается использовать логические уравнения. Вероятность существования какой-либо декомпозиции для полностью определенных булевых функций весьма низка, но по-другому дело обстоит, когда рассматриваемые функции являются не полностью определенными (частичными), особенно когда они определены только на небольшой части булева пространства аргументов. Такой случай разделительной алгебраической декомпозиции при заданном разбиении (Z_1, Z_2) подробно исследован в работе [6].

Далее рассматривается задача алгебраической декомпозиции не полностью определенной (частичной) булевой функции. В этом случае для заданной частичной булевой функции $y = f(\mathbf{x})$ надо найти суперпозицию $\varphi(g_1(\mathbf{z}_1), g_2(\mathbf{z}_2)) \succ f(\mathbf{x})$, где символ \succ обозначает отношение реализации. Функция φ , частичная или полностью определенная, реализует частичную функцию f , если значения функции φ совпадают со значениями функции f везде, где они определены. Так же, как в поставленной выше задаче, компонентами векторов \mathbf{z}_1 и \mathbf{z}_2 являются переменные из множеств $Z_1 \subset X$ и $Z_2 \subset X$ соответственно. Множества Z_1 и Z_2 не задаются и определяются в процес-

се решения задачи. Они могут пересекаться, но естественно потребовать, чтобы сумма их мощностей была минимальной. Существуют разнообразные методы решения как разделительной, так и неразделительной алгебраической декомпозиции [7–10]. В настоящей статье излагается метод алгебраической декомпозиции, использующий подход к решению задачи параллельной декомпозиции системы частичных булевых функций, предложенный в работе [11] и развитый в статье [12] применительно к задаче алгебраической декомпозиции. Более удобный метод для случая, когда функция f представляется операцией сложения по модулю 2, описан в статье [13]. Методы в статьях [12, 13] минимизируют мощности множеств Z_1 и Z_2 при полном переборе возможных ситуаций в процессе решения, что значительно ограничивает их практическое применение. Предлагаемый здесь метод не гарантирует абсолютного минимума этих мощностей, но позволяет решить задачу за более короткое время, поскольку не обращается к полному перебору.

Особого внимания заслуживает проблема существования нетривиальной декомпозиции, при которой мощность любого из множеств Z_1 и Z_2 меньше мощности множества X . Эта проблема довольно легко решается, когда разбиение (Z_1, Z_2) задано [1, 14]. Не при любом таком разбиении возможна нетривиальная декомпозиция заданной булевой функции. Вопрос определения множеств Z_1 и Z_2 , для которых она существует, вызывает естественный интерес. Среди работ, где рассматривается данный вопрос, можно назвать работы [1, 5, 15–18]. При этом используется полный перебор, но даются некоторые способы уменьшения объема вычислений при рассмотрении вариантов. В предлагаемой статье, как уже отмечалось, множества Z_1 и Z_2 определяются в процессе решения задачи: либо выдается решение, либо делается заключение, что декомпозиции не существует.

Предлагаемый подход. Положим, что не полностью определенная булева функция $f(\mathbf{x})$ задана двумя множествами: M^1 – область булева пространства, где функция имеет значение 1, и M^0 – область булева пространства, где она имеет значение 0. Эти множества будем представлять соответственно булевыми матрицами \mathbf{M}^1 и \mathbf{M}^0 . Область определения функции $f(\mathbf{x})$ обозначим символом M ($M = M^1 \cup M^0$). Рассмотрим полный граф $G = (V, E)$, у которого множество вершин V соответствует множеству M . Каждому ребру графа G припишем аргументы заданной функции из множества $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, по которым ортогональны строки матриц \mathbf{M}^1 и \mathbf{M}^0 , соответствующие концам данного ребра.

Полному двудольному подграфу, или *биклике*, графа G припишем множество переменных из X , взятых по одной из каждого ребра, принадлежащего данной биклике. Это множество определяется следующим образом. Пусть $\{x_i, x_j, \dots, x_k\}$ – множество переменных, по которым ортогональны два вектора из M , соответствующие концам ребра из множества E . Образует элементарную дизъюнкцию $x_i \vee x_j \vee \dots \vee x_k$ из этих переменных. Для биклики графа G получим конъюнктивную нормальную форму (КНФ), членами которой будут указанные дизъюнкции, взятые по всем ребрам, входящим в данную биклику. После удаления возможных поглощаемых элементарных дизъюнкций преобразуем полученную КНФ, раскрыв скобки, в дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ). Множество переменных, приписанных биклике, составят переменные, входящие в элементарную конъюнкцию минимального ранга полученной ДНФ.

Пусть требуется выразить заданную функцию $f(\mathbf{x})$ как $f(\mathbf{x}) \prec \varphi(g_1(\mathbf{z}_1), g_2(\mathbf{z}_2))$, где φ может быть любой булевой функцией от двух переменных, которые являются функциями соответственно от векторных переменных \mathbf{z}_1 и \mathbf{z}_2 , представляющих части вектора \mathbf{x} .

Построим функции g_1 и g_2 следующим образом. В графе G выделим две биклики $B_1 = (V_1^1, V_1^0, E_1)$ и $B_2 = (V_2^1, V_2^0, E_2)$ так, чтобы любое ребро графа G , которое связывает вершину, соответствующую элементу из множества M^1 , с вершиной, соответствующей элементу из множества M^0 , присутствовало хотя бы в одном из множеств E_1 или E_2 . Биклики достаточно задать парами множеств (V_1^1, V_1^0) и (V_2^1, V_2^0) , так как в бикликах каждая вершина из одной доли связана ребрами со всеми вершинами другой доли. Аргументами функции g_i ($i = 1, 2$) являются переменные, приписанные биклике B_i . Множество M_i^1 значений векторной переменной \mathbf{z}_i , где функция g_i имеет значение 1, составляют части векторов из M^1 или из M^0 , соответствующих вершинам из множества V_i^1 . Части этих векторов определяются переменными, приписанными биклике B_i , т. е. эти переменные являются компонентами вектора \mathbf{z}_i . Аналогично формируется

множество M_i^0 из частей векторов, соответствующих вершинам из множества V_i^0 . Таким образом, каждому вектору из M^1 или M^0 соответствует пара значений функций g_1 и g_2 . Если эта пара соответствует вектору из M^1 , то она является элементом множества M_φ^1 , где функция φ имеет значение 1. Если она соответствует вектору из M^0 , то она является элементом множества M_φ^0 . Так будет задана функция φ , если вид ее не задан заранее. Заметим, что пары (V_1^1, V_1^0) и (V_2^1, V_2^0) следует считать упорядоченными, поскольку они связаны со значениями функций g_1 и g_2 .

Таким образом, получение функций φ , g_1 и g_2 сводится к выделению в графе G пары биклик, покрывающих некоторые его ребра. Естественно потребовать, чтобы функции g_1 и g_2 имели как можно меньше аргументов. Для этого каждой биклике B_i ($i = 1, 2$) приписывается вес, представляемый упорядоченной парой (r_j, s_j) , где r_j – минимальный ранг элементарной конъюнкции, а s_j – число таких конъюнкций в соответствующей ДНФ. Получаемая пара биклик должна обладать как можно лучшим весом. Вес пары биклик B_1 и B_2 определяется как упорядоченная пара (R, S) , где $R = r_1 + r_2$ и $S = s_1 \times s_2$. Вес (R, S) считается лучшим, если R минимально, а среди весов, обладающих равным минимальным R , лучшим считается вес с наибольшим S . Ясно, что R должно быть минимальным, так как эта сумма равна для окончательно построенных биклик сумме чисел аргументов функций g_1 и g_2 , которую надо минимизировать. Чем больше элементарных конъюнкций минимального ранга в ДНФ, соответствующей строящейся биклике B_i , тем больше возможность, что этот ранг r_i увеличится на минимальную величину или останется прежним при добавлении ребер к биклике. Поэтому при нескольких вариантах с одинаковыми значениями R следует выбирать тот, для которого S максимально.

Задание вида функции φ осуществляется приданием строкам матриц M^1 и M^0 булевых или троичных двухкомпонентных векторов, представляющих возможные значения функций g_1 и g_2 . Например, если φ – сложение по модулю 2, то строкам матрицы M^1 приписываются векторы $(0, 1)$ и $(1, 0)$, а строкам матрицы M^0 – векторы $(0, 0)$ и $(1, 1)$. Если φ – стрелка Пирса (отрицание дизъюнкции), то строкам матрицы M^1 приписывается вектор $(0, 0)$, а строкам матрицы M^0 – векторы $(1, -)$ и $(-, 1)$.

Если вид функции φ задан, следует рассмотреть линейные и нелинейные функции по отдельности, как это сделано в работе [6], ввиду того, что в этих случаях множества рассматриваемых биклик имеют свои особенности. Из всех булевых функций, существенно зависящих от двух переменных, к линейным относятся функции, выражаемые операциями сложения по модулю 2, и эквиваленции, к нелинейным – все остальные.

В работах [12, 13] для получения решения используется полный перебор пар биклик. Как было отмечено выше, это значительно ограничивает практическое применение предлагаемой методики. В настоящей статье используется целенаправленный поиск подходящих пар биклик, избегающий полного перебора. Поэтому оптимальное решение не гарантировано, но близкое к нему во многих случаях удается получить за приемлемое время.

Алгебраическая декомпозиция с линейной функцией. В качестве линейной функции φ рассмотрим сложение по модулю 2, т. е. декомпозицию вида $f(\mathbf{x}) \prec g_1(\mathbf{z}_1) \oplus g_2(\mathbf{z}_2)$. Согласно значениям заданной функции f , как было указано выше, строкам матрицы M^1 припишем векторы $(0, 1)$ и $(1, 0)$, а строкам матрицы M^0 – векторы $(0, 0)$ и $(1, 1)$ в качестве возможных наборов значений функций g_1 и g_2 . В случае эквиваленции эти векторы меняются местами, и поэтому действия, используемые в ходе решения при сложении по модулю 2, применимы и в случае эквиваленции. Ход решения удобно пояснить на примере. Пусть не полностью определенная функция $f(\mathbf{x})$ задана следующими матрицами:

$$\mathbf{M}^1 = \begin{array}{cccccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 \\ \left[\begin{array}{cccccccc} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] & \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{array} \end{array}, \quad \mathbf{M}^0 = \begin{array}{cccccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 \\ \left[\begin{array}{cccccccc} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right] & \begin{array}{l} 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \end{array} \end{array}.$$

Для удобства дальнейшего изложения используем единую нумерацию строк матриц \mathbf{M}^1 и \mathbf{M}^0 . В этом случае нумерация вершин графа G совпадает с нумерацией соответствующих строк матриц. Множества переменных, приписываемых ребрам, перечислять не будем ввиду большого количества ребер графа G . Они легко определяются по строкам матриц \mathbf{M}^1 и \mathbf{M}^0 . Например, ребру v_1v_2 приписано множество $\{x_1, x_2, x_5, x_7\}$, а ребру $v_1v_{15} - \{x_2, x_4, x_8\}$.

На первом этапе получения искоемых биклик B_1 и B_2 выделяется ребро $v_i v_j$ с максимальным количеством приписанных переменных, оба конца которого присутствуют в множестве вершин графа G , соответствующем множеству M^1 . Таким ребром является $v_1 v_8$, и биклики на этом этапе приобретают значения $B_1 = (\{v_1\}, \{v_8\})$ и $B_2 = (\{v_8\}, \{v_1\})$ с элементарной дизъюнкцией $(x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_7)$.

Следующий этап – получение биклик с двумя ребрами путем добавления новых вершин с инцидентными им ребрами. Для каждой вершины v_i из множества, соответствующего множеству M^0 , формируются пары биклик $(V_1^1 \cup \{v_i\}, V_1^0)$ и $(V_2^1 \cup \{v_i\}, V_2^0)$. Из всех таких пар выбирается пара с наилучшим весом. Рассмотрим следующие варианты пар биклик с соответствующими КНФ и ДНФ, справа показано значение критерия (R, S) :

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_9\}, \{v_8\}) - x_2, \\ &(\{v_8, v_9\}, \{v_1\}) - x_1 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_7; \end{aligned} \quad 2, 5$$

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_{10}\}, \{v_8\}) - (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_7) (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_7 \vee x_8) = \\ &= x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_7 \vee x_5 x_8, \\ &(\{v_8, v_{10}\}, \{v_1\}) - (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_7) (x_5 \vee x_8) = \\ &= x_5 \vee x_1 x_8 \vee x_2 x_8 \vee x_3 x_8 \vee x_4 x_8 \vee x_7 x_8; \end{aligned} \quad 2, 5$$

...

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_{15}\}, \{v_8\}) - (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_7) (x_1 \vee x_3 \vee x_5 \vee x_7 \vee x_8) = \\ &= x_1 \vee x_3 \vee x_5 \vee x_7 \vee x_2 x_8 \vee x_4 x_8, \\ &(\{v_8, v_{15}\}, \{v_1\}) - (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_7) (x_2 \vee x_4 \vee x_8) = \\ &= x_2 \vee x_4 \vee x_1 x_8 \vee x_2 x_8 \vee x_5 x_8 \vee x_7 x_8. \end{aligned} \quad 2, 8$$

Первой в процессе перебора парой с наилучшим весом (2, 9) оказалась пара

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_{13}\}, \{v_8\}) - x_1 \vee x_5 \vee x_7, \\ &(\{v_8, v_{13}\}, \{v_1\}) - x_2 \vee x_3 \vee x_4. \end{aligned}$$

Переходим к последнему этапу построения пары биклик B_1 и B_2 , который состоит в последовательном внесении в множества $V_1^1, V_1^0, V_2^1, V_2^0$ оставшихся вершин с выбором варианта с наилучшим весом. При этом для вершины v_i из множества, соответствующего множеству M^0 , формируют пары биклик вида $(V_1^1 \cup \{v_i\}, V_1^0)$, $(V_2^1 \cup \{v_i\}, V_2^0)$ и $(V_1^1, V_1^0 \cup \{v_i\})$, $(V_2^1, V_2^0 \cup \{v_i\})$, а для вершины v_j из множества, соответствующего множеству M^1 , – пары вида $(V_1^1 \cup \{v_j\}, V_1^0)$, $(V_2^1, V_2^0 \cup \{v_j\})$ и $(V_1^1, V_1^0 \cup \{v_j\})$, $(V_2^1 \cup \{v_j\}, V_2^0)$. Так, для вершины v_2 получим пару

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_2, v_{13}\}, \{v_8\}) - (x_1 \vee x_5 \vee x_7) (x_3 \vee x_4) = x_1 x_3 \vee x_1 x_4 \vee x_3 x_5 \vee x_3 x_7 \vee x_4 x_5 \vee x_4 x_7, \\ &(\{v_8, v_{13}\}, \{v_1, v_2\}) - x_3 \vee x_4, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_{13}\}, \{v_2, v_8\}) - x_1 \vee x_5 \vee x_7, \\ &(\{v_2, v_8, v_{13}\}, \{v_1\}) - (x_2 \vee x_3 \vee x_4) (x_1 \vee x_2 \vee x_5 \vee x_7) = \\ &= x_1 x_3 \vee x_1 x_4 \vee x_2 \vee x_3 x_5 \vee x_3 x_7 \vee x_4 x_5 \vee x_4 x_7, \end{aligned}$$

а для вершины v_9 –

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_9, v_{13}\}, \{v_8\}) - x_2 (x_1 \vee x_5 \vee x_7) = x_1 x_2 \vee x_2 x_5 \vee x_2 x_7, \\ &(\{v_8, v_9, v_{13}\}, \{v_1\}) - (x_2 \vee x_3 \vee x_4) (x_1 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_7) = x_1 x_2 \vee x_2 x_5 \vee x_2 x_7 \vee x_3 \vee x_4, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_{13}\}, \{v_8, v_9\}) - x_1 \vee x_5 \vee x_7, \\ &(\{v_8, v_{13}\}, \{v_1, v_9\}) - x_2. \end{aligned}$$

Наилучшим вариантом по критерию (R, S) оказался вариант присоединения вершины v_5 , для которого $(R, S) = (2, 6)$:

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_{13}\}, \{v_5, v_8\}) - x_1 \vee x_5 \vee x_7, \\ &(\{v_5, v_8, v_{13}\}, \{v_1\}) - (x_2 \vee x_3 \vee x_4) (x_1 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_6 \vee x_7) = \\ &= x_1 x_2 \vee x_2 x_3 \vee x_2 x_5 \vee x_2 x_6 \vee x_2 x_7 \vee x_3 \vee x_4. \end{aligned}$$

Далее, перебирая все оставшиеся вершины, выбираем каждый раз ту из них, внесение которой в данные биклики дает лучший по критерию (R, S) результат. Окончательно получаем следующую пару биклик с их КНФ и ДНФ:

$$\begin{aligned} &(\{v_1, v_3, v_4, v_6, v_7, v_{10}, v_{11}, v_{13}, v_{14}\}, \{v_2, v_5, v_8, v_9, v_{12}, v_{15}\}) - (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_7) (x_1 \vee x_3 \vee x_6 \vee x_7) \wedge \\ &\wedge (x_1 \vee x_5) (x_2 \vee x_4 \vee x_5) (x_2 \vee x_4 \vee x_8) (x_2 \vee x_5 \vee x_7) (x_2 \vee x_6 \vee x_8) (x_3 \vee x_4 \vee x_7) (x_5 \vee x_6) (x_7 \vee x_8) = \\ &= (x_1 x_2 x_3 x_6 x_7 \vee x_1 x_2 x_3 x_6 x_8 \vee x_1 x_3 x_4 x_6 x_7 \vee x_2 x_3 x_5 x_7 \vee x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 \vee x_3 x_5 x_8), \\ &(\{v_2, v_5, v_8, v_{10}, v_{11}, v_{13}, v_{14}\}, \{v_1, v_3, v_4, v_6, v_7, v_9, v_{12}, v_{15}\}) - x_2 x_4 x_6 x_8. \end{aligned}$$

Биклика $B_1 = (\{v_1, v_3, v_4, v_6, v_7, v_{10}, v_{11}, v_{13}, v_{14}\}, \{v_2, v_5, v_8, v_9, v_{12}, v_{15}\})$ определяет функцию $g_1(x_3, x_5, x_8)$, поскольку минимальный ранг, равный трем, имеет элементарная конъюнкция $x_3 x_5 x_8$ соответствующей ДНФ. Матрица \mathbf{M}_1^1 из задания функции g_1 строится как конкатенация минора матрицы \mathbf{M}^1 , образованного строками 1, 3, 4, 6, 7 и столбцами x_3, x_5, x_8 , и минора матрицы \mathbf{M}^0 , образованного строками 10, 11, 13, 14 и столбцами x_3, x_5, x_8 . Аналогично строится матрица \mathbf{M}_1^0 из строк 2, 5, 8 матрицы \mathbf{M}^1 , строк 9, 12, 15 матрицы \mathbf{M}^0 и одноименных столбцов этих матриц. Переменная x_1 оказалась здесь несущественным аргументом.

Функция $g_2(x_2, x_4, x_6, x_8)$ определяется аналогично по биклике $B_2 = (\{v_2, v_5, v_8, v_{10}, v_{11}, v_{13}, v_{14}\}, \{v_1, v_3, v_4, v_6, v_7, v_9, v_{12}, v_{15}\})$ и соответствующей ДНФ. Таким образом, функции g_1 и g_2 представляются следующими матрицами:

$$\mathbf{M}_1^1 = \begin{matrix} x_3 & x_5 & x_8 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad \mathbf{M}_1^0 = \begin{matrix} x_3 & x_5 & x_8 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}; \quad \mathbf{M}_2^1 = \begin{matrix} x_2 & x_4 & x_6 & x_8 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad \mathbf{M}_2^0 = \begin{matrix} x_2 & x_4 & x_6 & x_8 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Удалив из матриц повторяемые строки, получим задание функций g_1 и g_2 :

$$\mathbf{M}_1^1 = \begin{matrix} x_3 & x_5 & x_8 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad \mathbf{M}_1^0 = \begin{matrix} x_3 & x_5 & x_8 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}; \quad \mathbf{M}_2^1 = \begin{matrix} x_2 & x_4 & x_6 & x_8 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad \mathbf{M}_2^0 = \begin{matrix} x_2 & x_4 & x_6 & x_8 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

После минимизации ДНФ получим выражение

$$g_1 = \bar{x}_3 \bar{x}_5 \vee x_3 x_5 \bar{x}_8 \vee \bar{x}_5 x_8, \quad g_2 = x_2 \bar{x}_4 \bar{x}_8 \vee \bar{x}_2 x_8 \vee x_6 x_8, \quad \Phi = g_1(x_3, x_5, x_8) \oplus g_2(x_2, x_4, x_6, x_8).$$

Алгебраическая декомпозиция с нелинейной функцией. Заметим, что при любой нелинейной функции φ строкам одной из матриц M^1 или M^0 приписывается один булев вектор возможных значений функций g_1 и g_2 , а строкам другой из них – два троичных вектора. Для нелинейных функций удобно вместо полного графа G рассматривать полный двудольный граф $B = (V^1, V^0, E_B)$, где вершины из множества V^1 соответствуют элементам булева пространства из множества M^1 , а вершины из множества V^0 – элементам из множества M^0 .

Пусть функцию φ представляет стрелка Пирса (отрицание дизъюнкции), т. е. рассмотрим декомпозицию вида $f(\mathbf{x}) \prec g_1(\mathbf{z}_1) \uparrow g_2(\mathbf{z}_2) = \overline{g_1 \vee g_2}$. Тогда в качестве возможных наборов значений функций g_1 и g_2 строкам матрицы M^1 приписывается вектор $(0, 0)$, а строкам матрицы M^0 – векторы $(1, -)$ и $(-, 1)$. Пусть задана та же функция $f(\mathbf{x})$, что и в предыдущем разделе. Ясно, что $V_1^0 = V_2^0 = V^1$.

На первом этапе формирования пары биклик (B_1, B_2) выбирается пара $(\{u\}, V_1^0), (\{v\}, V_2^0)$ с наилучшим весом, где $u, v \in V^0$ и $u \neq v$. Биклики такого вида с соответствующими КНФ и ДНФ для рассмотренного примера функции представлены ниже:

$$\begin{aligned} & (\{v_9\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - x_2 x_6 (x_1 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_7) (x_1 \vee x_3 \vee x_7 \vee x_8) = \\ & = x_1 x_2 x_6 \vee x_2 x_3 x_6 \vee x_2 x_6 x_7 \vee x_2 x_4 x_6 x_8 \vee x_2 x_5 x_6 x_8; \\ & (\{v_{10}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - x_4 (x_5 \vee x_8) (x_1 \vee x_2) = x_1 x_4 x_5 \vee x_1 x_4 x_8 \vee x_2 x_4 x_5 \vee x_2 x_4 x_8; \\ & (\{v_{11}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - (x_4 \vee x_6) (x_2 \vee x_3 \vee x_6 \vee x_8) (x_1 \vee x_3 \vee x_5 \vee x_7) (x_1 \vee x_5 \vee x_8) \wedge \\ & \wedge (x_5 \vee x_6 \vee x_8) = x_1 x_4 x_8 \vee x_1 x_6 \vee x_2 x_4 x_5 \vee x_2 x_4 x_7 x_8 \vee x_3 x_4 x_5 \vee x_3 x_4 x_8 \vee x_3 x_6 x_8 \vee \\ & \vee x_4 x_5 x_8 \vee x_5 x_6 \vee x_6 x_7; \\ & (\{v_{12}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - x_8 (x_3 \vee x_4 \vee x_7) (x_1 \vee x_3 \vee x_6 \vee x_7) (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_7) = \\ & = x_1 x_4 x_8 \vee x_2 x_4 x_6 x_8 \vee x_3 x_8 \vee x_7 x_8; \\ & (\{v_{13}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - x_8 (x_2 \vee x_3 \vee x_4) (x_1 \vee x_5 \vee x_7) = \\ & = (x_1 x_2 x_8 \vee x_1 x_3 x_8 \vee x_1 x_4 x_8 \vee x_2 x_5 x_8 \vee x_3 x_5 x_8 \vee x_4 x_5 x_8 \vee x_2 x_7 x_8 \vee x_3 x_7 x_8 \vee x_4 x_7 x_8); \\ & (\{v_{14}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_6) (x_1 \vee x_6 \vee x_8) (x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_6 \vee x_8) \wedge \\ & \wedge (x_2 \vee x_5 \vee x_7) (x_1 \vee x_3 \vee x_5 \vee x_8) (x_5 \vee x_6 \vee x_7) = x_1 x_2 x_6 \vee x_1 x_3 x_7 \vee x_1 x_4 x_7 \vee x_1 x_5 \vee x_1 x_6 x_7 \vee \\ & \vee x_1 x_7 x_8 \vee x_2 x_3 x_6 \vee x_2 x_5 x_8 \vee x_2 x_6 x_8 \vee x_2 x_7 x_8 \vee x_3 x_5 x_8 \vee x_3 x_6 x_7 \vee x_3 x_7 x_8 \vee x_4 x_5 x_8 \vee \\ & \vee x_4 x_7 x_8 \vee x_5 x_6 \vee x_6 x_7 x_8; \\ & (\{v_{15}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - x_3 (x_2 \vee x_4 \vee x_8) (x_1 \vee x_5) (x_5 \vee x_6) = \\ & = x_1 x_2 x_3 x_6 \vee x_1 x_3 x_4 x_6 \vee x_1 x_3 x_6 x_8 \vee x_2 x_3 x_5 \vee x_3 x_4 x_5 \vee x_3 x_5 x_8. \end{aligned}$$

Из них выбираем следующую пару биклик с весом $(R, S) = (4, 4)$:

$$\begin{aligned} & (\{v_{12}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - x_8 (x_3 \vee x_4 \vee x_7) (x_1 \vee x_3 \vee x_6 \vee x_7) (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_7) = \\ & = x_1 x_4 x_8 \vee x_2 x_4 x_6 x_8 \vee x_3 x_8 \vee x_7 x_8, \\ & (\{v_{14}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4 \vee x_6) (x_1 \vee x_6 \vee x_8) (x_3 \vee x_4 \vee x_5 \vee x_6 \vee x_8) \wedge \\ & \wedge (x_2 \vee x_5 \vee x_7) (x_1 \vee x_3 \vee x_5 \vee x_8) (x_5 \vee x_6 \vee x_7) = x_1 x_2 x_6 \vee x_1 x_3 x_7 \vee x_1 x_4 x_7 \vee x_1 x_5 \vee x_1 x_6 x_7 \vee \\ & \vee x_1 x_7 x_8 \vee x_2 x_3 x_6 \vee x_2 x_5 x_8 \vee x_2 x_6 x_8 \vee x_2 x_7 x_8 \vee x_3 x_5 x_8 \vee x_3 x_6 x_7 \vee x_3 x_7 x_8 \vee x_4 x_5 x_8 \vee \\ & \vee x_4 x_7 x_8 \vee x_5 x_6 \vee x_6 x_7 x_8. \end{aligned}$$

Далее выполняется многошаговый процесс, на каждом шаге которого выбирается вершина, не присутствующая в бикликах, и вносится в какую-либо из них. Выбирается тот вариант внесения вершины, который дает лучший результат по критерию (R, S) . На первом шаге выбираем вершину v_{11} и получаем следующую пару биклик:

$$\begin{aligned} & (\{v_{12}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - x_8 (x_3 \vee x_4 \vee x_7) (x_1 \vee x_3 \vee x_6 \vee x_7) (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_7) = \\ & = x_1 x_4 x_8 \vee x_2 x_4 x_6 x_8 \vee x_3 x_8 \vee x_7 x_8, \\ & (\{v_{11}, v_{14}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - (x_1 \vee x_6 \vee x_8) (x_2 \vee x_5 \vee x_7) (x_5 \vee x_6 \vee x_7) (x_4 \vee x_6) \wedge \\ & \wedge (x_2 \vee x_3 \vee x_6 \vee x_8) (x_1 \vee x_3 \vee x_5 \vee x_7) (x_1 \vee x_5 \vee x_8) (x_5 \vee x_6 \vee x_8) = \\ & = x_1 x_2 x_4 x_5 \vee x_1 x_2 x_6 \vee x_1 x_3 x_4 x_5 \vee x_1 x_6 x_7 \vee x_2 x_3 x_6 x_8 \vee x_4 x_5 x_8 \vee x_4 x_7 x_8 \vee x_5 x_6 \vee x_6 x_7 x_8. \end{aligned}$$

Остальные вершины вносятся в порядке $v_{13}, v_{10}, v_9, v_{15}$, и окончательно получаем пару библик с соответствующими КНФ и ДНФ:

$$\begin{aligned} & (\{v_{10}, v_{12}, v_{13}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - x_8 (x_1 \vee x_3 \vee x_6 \vee x_7) (x_1 \vee x_5 \vee x_7) x_4 (x_1 \vee x_2) = \\ & = x_1 x_4 x_8 \vee x_2 x_4 x_5 x_6 x_8 \vee x_2 x_3 x_4 x_5 x_8 \vee x_2 x_4 x_7 x_8, \\ & (\{v_9, v_{11}, v_{14}, v_{15}\}, \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}) - x_2 x_6 x_3 (x_1 \vee x_5) = x_1 x_2 x_3 x_6 \vee x_2 x_3 x_5 x_6. \end{aligned}$$

Функции g_1 и g_2 строятся точно так же, как это делалось в предыдущем разделе. Можно рассматривать два варианта функции g_2 с различными множествами аргументов: $g_2(x_1, x_2, x_3, x_6)$ и $g_2(x_2, x_3, x_5, x_6)$. Если выбрать вариант разделительной декомпозиции, то после удаления из матриц повторяемых строк, получим следующее задание функций g_1 и g_2 :

$$\mathbf{M}_1^1 = \begin{bmatrix} x_1 & x_4 & x_8 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_1^0 = \begin{bmatrix} x_1 & x_4 & x_8 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}_2^1 = \begin{bmatrix} x_2 & x_3 & x_5 & x_6 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_2^0 = \begin{bmatrix} x_2 & x_3 & x_5 & x_6 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

После минимизации ДНФ имеем следующие выражения для полученных функций:

$$g_1 = x_1 x_4 \bar{x}_8 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_4 \bar{x}_8 \vee \bar{x}_1 x_4 x_8, \quad g_2 = x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_6 \vee \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_5 \vee \bar{x}_5 x_6, \quad \varphi = g_1(x_1, x_4, x_8) \uparrow g_2(x_2, x_3, x_5, x_6).$$

Заключение. Описанный способ алгебраической декомпозиции отличается от многих известных методов прежде всего тем, что не требует задания разбиения множества аргументов исходной функции. Представленный в статье [12] подход может послужить указанием направления ускоренного поиска решения рассматриваемой задачи. Данный метод использует такой подход. Оптимальным решением задачи являются функции g_1 и g_2 с минимальной суммой чисел их аргументов. Метод не гарантирует такого минимума, но во многих случаях позволяет получить решение, близкое или совпадающее с решением, получаемым точным методом.

Список использованных источников

1. Perkowski, M. A. A Survey of Literature on Functional Decomposition, Version IV (Technical Report) / M. A. Perkowski, S. Grygiel. – Portland, USA : Portland State University, Department of Electrical Engineering, 1995. – 188 p.
2. Cortadella, J. Timing-driven logic bi-decomposition / J. Cortadella // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2003. – Vol. 22, no. 6. – P. 675–685.
3. Mishchenko, A. An algorithm for bi-decomposition of logic functions / A. Mishchenko, B. Steinbach, M. Perkowski // Proc. of the 38th Annual Design Automation Conf. (DAC'2001), 18–22 June 2001, Las Vegas, USA. – Las Vegas, 2001. – P. 103–108.
4. Chang, S.-C. Technology mapping for TLU FPGA's based on decomposition of binary decision diagrams / S.-C. Chang, M. Marek-Sadowska, T. Hwang // IEEE Trans. Computer-Aided Design. – 1996. – Vol. 15, no. 10. – P. 1226–1235.
5. Бибило, П. Н. Декомпозиция булевых функций на основе решения логических уравнений / П. Н. Бибило. – Минск : Беларус. навука, 2009. – 211 с.
6. Zakrevskij, A. D. On a special kind decomposition of weakly specified Boolean functions / A. D. Zakrevskij // Second Intern. Conf. on Computer-Aided Design of Discrete Devices (CAD DD'97), 12–14 Nov. 1997, Minsk, Belarus / National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Engineering Cybernetics. – Minsk, 1997. – Vol. 1. – P. 36–41.
7. Cheng, D. Bi-decomposition of logical mappings via semi-tensor product of matrices / D. Cheng, X. Xu // Automatica. – 2013. – Vol. 49, no. 7. – P. 1979–1985.

8. Choudhury, M. Bi-decomposition of large Boolean functions using blocking edge graphs / M. Choudhury, K. Mohanram // 2010 IEEE/ACM Intern. Conf. on Computer-Aided Design (ICCAD'2010). – San Jose : IEEE Press, 2010. – P. 586–591.
9. Fišer, P. Small but nasty logic synthesis examples / P. Fišer, J. Schmidt ; ed. by B. Steinbach // Proc. of the 8th Intern. Workshop on Boolean Problems (IWSBP'8), Freiberg, Germany, 18–19 Sept. 2008. – Freiberg, 2008. – P. 183–190.
10. Steinbach, B. Vectorial bi-decomposition for lattices of Boolean functions / B. Steinbach, C. Posthoff ; ed. by B. Steinbach // Further Improvements in the Boolean Domain. – Cambridge Scholars Publishing, 2018. – P. 175–198.
11. Поттосин, Ю. В. Декомпозиция системы частичных булевых функций с помощью покрытия графа полными двудольными подграфами / Ю. В. Поттосин, Е. А. Шестаков // Новые информационные технологии в исследовании дискретных структур : докл. Второй Всерос. конф., Екатеринбург, 2–5 нояб. 1998. – Екатеринбург : УрО РАН, 1998. – С. 185–189.
12. Поттосин, Ю. В. Метод бидекомпозиции частичных булевых функций / Ю. В. Поттосин // Информатика. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 77–87.
13. Pottosin, Yu. V. A method for bi-decomposition of partial Boolean functions / Yu. V. Pottosin // Прикладная дискретная математика. – 2020. – № 47. – С. 108–116.
14. Kravets, V. N. Sequential logic synthesis using symbolic bi-decomposition / V. N. Kravets, A. Mishchenko // Advanced Techniques in Logic Synthesis, Optimizations and Applications. – New York, Dordrecht, Heidelberg, London : Springer, 2011. – P. 31–46.
15. Józwiak, L. An effective and efficient method for functional decomposition of Boolean functions based on information relationship measures / L. Józwiak, A. Chojnacki // Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems: Proc. of 3rd DDECS Workshop, Smolenice castle, Slovakia, 5–7 April 2000. – Bratislava : Institute of Informatics, Slovak Academy of Sciences, 2000. – P. 242–249.
16. Закревский, А. Д. Декомпозиция частичных булевых функций – проверка на разделимость по заданному разбиению / А. Д. Закревский // Информатика. – 2007. – № 1(13). – С. 16–21.
17. Поттосин, Ю. В. Применение аппарата покрытий троичных матриц для поиска разбиения множества аргументов при декомпозиции булевых функций / Ю. В. Поттосин, Е. А. Шестаков // Вестник Томского гос. университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 3(16). – P. 100–107.
18. Taghavi Afshord, S. An input variable partitioning algorithm for functional decomposition of a system of Boolean functions based on the tabular method / S. Taghavi Afshord, Yu. V. Pottosin, B. Arasteh // Discrete Applied Mathematics. – 2015. – Vol. 185. – P. 208–219.

References

1. Perkowski M. A., Grygiel S. *A Survey of Literature on Functional Decomposition, Version IV (Technical Report)*. Portland, USA, Portland State University, Department of Electrical Engineering, 1995, 188 p.
2. Cortadella J. Timing-driven logic bi-decomposition. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2003, vol. 22, no. 6, pp. 675–685.
3. Mishchenko A., Steinbach B., Perkowski M. An algorithm for bi-decomposition of logic functions. *Proceedings of the 38th Annual Design Automation Conference (DAC'2001), 18–22 June 2001, Las Vegas, USA*. Las Vegas, 2001, pp. 103–108.
4. Chang S.-C., Marek-Sadowska M., Hwang T. Technology mapping for TLU FPGA's based on decomposition of binary decision diagrams. *IEEE Transactions Computer-Aided Design*, 1996, vol. 15, no. 10, pp. 1226–1235.
5. Bibilo P. N. Dekompozicija bulevykh funktsij na osnove reshenija logicheskikh uravnenij. *Decomposition of Boolean functions on the base of solving logical equations*. Minsk, Belaruskaja navuka, 2009, 211 p. (in Russian).
6. Zakrevskij A. D. On a special kind decomposition of weakly specified Boolean functions. *Second International Conference on Computer-Aided Design of Discrete Devices (CAD DD'97), Minsk, Belarus, 12–14 November 1997*. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Engineering Cybernetics, Minsk, 1997, vol. 1, pp. 36–41.
7. Cheng D., Xu X. Bi-decomposition of logical mappings via semi-tensor product of matrices. *Automatica*, 2013, vol. 49, no. 7, pp. 1979–1985.
8. Choudhury M., Mohanram K. Bi-decomposition of large Boolean functions using blocking edge graphs. *2010 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD'2010)*. San Jose, IEEE Press, 2010, pp. 586–591.

9. Fišer P., Schmidt J. Small but nasty logic synthesis examples. *Proceedings of the 8th International Workshop on Boolean Problems (IWSBP'8), Freiberg, Germany, 18–19 September 2008*. Freiberg, 2008, pp. 183–190.
10. Steinbach B., Posthoff C. Vectorial bi-decomposition for lattices of Boolean functions. *Further Improvements in the Boolean Domain*, in B. Steinbach (ed.). Cambridge Scholars Publishing, 2018, pp. 175–198.
11. Pottosin Yu. V., Shestakov E. A. Dekompozicija sistemy chastichnyh bulevykh funkcyj s pomoshch'ju pokrytij grafa polnymi dvudol'nymi podgrafami [Decomposition of a system of partial Boolean functions using covering graph with bipartite complete subgraphs]. *Doklady Vtoroj Vserossijskoj konferencii "Novye informacionnye tehnologii v issledovanii diskretnykh struktur" [Proceedings of the Second All-Russian Conference "Novel Information Technologies in the research of Discrete Structures"]*. Ekaterinburg, Ural'skoe otdelenie Rossijskoj akademii nauk, 1998, pp. 185–189 (in Russian).
12. Pottosin Yu. V. Metod bidekompozicii chastichnyh bulevykh funkcyj [A method for bi-decomposition of partial Boolean functions]. *Informatika [Informatics]*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 77–87 (in Russian).
13. Pottosin Yu. V. A method for bi-decomposition of partial Boolean functions. *Prikladnaja diskretnaja matematika [Applied Discrete Mathematics]*, 2020, no. 47, pp. 108–116.
14. Kravets V. N., Mishchenko A. Sequential logic synthesis using symbolic bi-decomposition. *Advanced Techniques in Logic Synthesis, Optimizations and Applications*. New York, Dordrecht, Heidelberg, London, Springer, 2011, pp. 31–46.
15. Jóźwiak L., Chojnacki A. An effective and efficient method for functional decomposition of Boolean functions based on information relationship measures. *Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems: Proceedings of 3rd DDECS Workshop, Smolenice castle, Slovakia, 5–7 April 2000*. Bratislava, Institute of Informatics, Slovak Academy of Sciences, 2000, pp. 242–249.
16. Zakrevskij A. D. Dekompozicija chastichnyh bulevykh funkcyj – proverka na razdielimosť po zadannomu razbieniu [Decomposition of partial Boolean functions: checking decomposability at a given partition]. *Informatika [Informatics]*, 2007, no. 1(13), pp. 16–21 (in Russian).
17. Pottosin Yu. V., Shestakov E. A. Primjenjenje apparata pokrytij troichnyh matric dlja poiska razbienia mnozhestva argumentov pri dekompozicii buljebyh funkcyj [Application of the apparatus of covering ternary matrices for searching partition of argument set at decomposition of Boolean functions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universitjeta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]*, 2011, no. 3(16), pp. 100–107 (in Russian).
18. Taghavi Afshord S., Pottosin Yu. V., Arasteh B. An input variable partitioning algorithm for functional decomposition of a system of Boolean functions based on the tabular method. *Discrete Applied Mathematics*, 2015, vol. 185, pp. 208–219.

Информация об авторе

Поттосин Юрий Васильевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: pott@newman.bas-net.by

Information about the author

Yuri V. Pottosin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: pott@newman.bas-net.by

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

УДК 681.325
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-54-63>

Поступила в редакцию 06.06.2020
Received 06.06.2020

Принята к публикации 13.07.2020
Accepted 13.07.2020

Алгоритмы разбиения логических схем на подсхемы

Н. А. Кириенко

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
E-mail: natalia.kirienko@tut.by*

Аннотация. Рассматривается задача разбиения логической схемы на подсхемы, имеющая большое значение при выполнении оптимизационных преобразований в процессе синтеза схемы. Приводится краткий обзор методов и алгоритмов разбиения, выделяются две группы алгоритмов: конструктивные и итеративные. Представляется интерпретация логической схемы в виде графа, формулируется задача разбиения в теоретико-графовой модели и предлагается набор алгоритмов для ее решения. Функционирование логической схемы задается системой логических уравнений. Алгоритмы осуществляют разбиение системы логических уравнений на подсистемы с выполнением ограничений по числу входных и выходных переменных. Рассматриваются структуры данных, необходимых для выполнения алгоритмов. Описываются различные виды взаимосвязей уравнений, определяющих получение оптимальных решений. Исследуются вопросы применения алгоритмов разбиения для улучшения качества схемы на этапе технологически независимой оптимизации. Результаты экспериментального исследования, выполненного с помощью процедуры BDD-оптимизации функционального описания схемы и промышленного синтезатора LeonardoSpectrum подтверждают эффективность разработанных алгоритмов. Алгоритмы реализуются в виде набора процедур разбиения схемы в рамках экспериментальной системы логического проектирования FLC.

Ключевые слова: логическая схема, разбиение логической схемы, системы булевых функций, конструктивные алгоритмы, технологически независимая оптимизация, синтез логических схем

Для цитирования. Кириенко, Н. А. Алгоритмы разбиения логических схем на подсхемы / Н. А. Кириенко // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 54–63. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-54-63>

Algorithms for partitioning logical circuits into subcircuits

Natalia A. Kirienko

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
E-mail: natalia.kirienko@tut.by*

Abstract. The problem of partitioning a logical circuit into subcircuits is considered. It is of great importance when performing optimization transformations in the process of circuit synthesis. The brief review of partitioning methods and algorithms is given, and two groups of algorithms are identified: constructive and iterative one. The interpretation of a logical circuit in the form of a graph is presented. The problem of partitioning in terms of a graph-theoretic model is defined and some algorithms for solving the partitioning problem are proposed. Logic circuit functions are defined by a system of logical equations. Algorithms perform the partitioning the system of logical equations into subsystems with the restrictions of the number of input and output variables. The data structures to execute the algorithms are defined. Various types of equations connections, obtaining better solutions for partitioning are described. The problems of the use of partitioning algorithms to improve the quality of the circuit at the stage of technology-independent optimization are investigated. The results of an experimental study carried out by the BDD optimization procedure for the functional description of the circuit and LeonardoSpectrum synthesis confirm the effectiveness of the developed

algorithms. The algorithms are implemented as partitioning circuit procedures in the experimental FLC system for logical design.

Keywords: logical circuit, logical circuit partitioning, systems of Boolean functions, constructive algorithms, technology-independent optimization, synthesis of logical circuits

For citation. Kirienko N. A. Algorithms for partitioning logical circuits into subcircuits. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 54–63 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-54-63>

Введение. Задача разбиения логической схемы на подсхемы заключается в преобразовании исходного описания схемы в результирующее описание, содержащее множество подсхем (блоков), связанных между собой. На описание подсхемы накладываются ограничения, например, по числу входов и выходов, по размерам подсхемы и др. Исходное и результирующее описания должны быть функционально эквивалентны. Целью разбиения логических схем на подсхемы является решение задач, возникающих при проектировании цифровых устройств.

Задача разбиения логических схем на подсхемы является важным аспектом процесса проектирования цифровых устройств [1] по многим причинам. Она встречается при размещении устройства на отдельных конструктивных компонентах [2–5], таких как печатные платы, микросхемы, и состоит в том, чтобы разбить схему на части (блоки) с учетом ограничений на число элементов в блоках, число внешних выводов блоков, суммарную площадь, занимаемую элементами и соединениями, и др. Основными критериями для данного разбиения являются число образующихся блоков, число внешних выводов на блоках, задержки в распространении сигналов, электромагнитная и тепловая совместимость элементов и т. д.

Задача разбиения часто используется при реализации алгоритмов оптимизации, синтеза, размещения в процессе проектирования устройств [6–11]. В рассматриваемом случае оценка стоимости разбиения варьируется, но часто минимизируется сложность блоков разбиения и количество связей между ними.

Микросхема может содержать десятки миллионов транзисторов, а оптимизирующие преобразования потребуют большого количества времени даже при современном уровне развития вычислительных средств. Большинство задач, возникающих при проектировании, являются NP-полными, время их выполнения резко возрастает с увеличением размера схемы. Понижение размерности схемы служит хорошим способом решения задачи сокращения времени выполнения процедур оптимизации.

Целью настоящего исследования является решение задачи понижения размерности логической схемы путем разбиения на блоки меньшей размерности, разработка алгоритмов разбиения и экспериментальная оценка их эффективности.

Задача разбиения схемы на подсхемы. Под разбиением будем понимать процесс разложения логической схемы на более мелкие подсхемы, которые называются блоками. Процедура разбиения используется в процессе технологически независимой оптимизации схемы, выполняемой перед процедурой технологического отображения в процессе синтеза схемы, и позволяет существенно сократить время процедур оптимизации, которые работают значительно быстрее на блоках меньшего размера.

Задача разбиения может быть выражена в терминах теории графов. Текущим представлением логической схемы является взвешенный ориентированный граф $G = (V, E)$, каждая вершина которого рассматривается как логический компонент, а дуги представляют связи между компонентами. Задачу разбиения можно представить как задачу распределения множества V вершин графа G в множестве непересекающихся подмножеств вершин $\{V_1, \dots, V_p\}$ графа (блоков), таких, что $V_i \subset V$, $V_i \neq \emptyset$, $V_i \cap V_j = \emptyset$, $\bigcup_{i=1}^p V_i = V$ для $i, j \in \{1, \dots, p\}$, $i \neq j$. Вершины графа имеют весовые характеристики, например сложности описания соответствующих компонентов.

Ограничения и целевые функции для задачи разбиения варьируются для каждого уровня применения задачи и этапа проектирования. Наиболее распространенной целевой функцией является минимизация числа ребер в разрезе между блоками (проблема mincut):

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p c_{ij} \rightarrow \min, i \neq j, \quad (1)$$

где c_{ij} – количество дуг между блоками V_i и V_j .

Возможны ограничения на число блоков разбиения, число входов и выходов каждого блока, задержку схемы, площадь каждого блока и др. Исходя из ограничений, для решения задачи разбиения строится соответствующая целевая функция.

Классификация алгоритмов разбиения. Алгоритмы разбиения по принципу работы делятся на две большие группы: конструктивные и итерационные. Конструктивные алгоритмы [4, 5] обычно используются для формирования некоторого начального разбиения, которое может быть улучшено с помощью других алгоритмов. Они выполняют построение разбиения по заранее заданным правилам присоединения вершин к блоку. Процесс характеризуется последовательным построением блоков. Конструктивные алгоритмы обладают высоким быстродействием.

Итерационные алгоритмы первоначально используют разбиение графа на заданное число блоков произвольным образом либо с помощью конструктивного алгоритма. Затем по определенным правилам производится перестановка вершин из одной части в другую с целью минимизации числа дуг между блоками. Оптимизация разбиения достигается парными или групповыми перестановками вершин графа между различными блоками.

Итерационные алгоритмы принимают в качестве исходных данных множество блоков и список дуг между ними и генерируют улучшенный набор блоков с измененным списком дуг. К итерационным относятся алгоритмы групповой миграции [6–9], алгоритмы моделирования отжига [3, 10], генетические алгоритмы [11] и др.

Алгоритмы групповой миграции можно отнести к наиболее ранним разработкам. Они принадлежат к классу алгоритмов итеративного улучшения. Целью таких алгоритмов является уменьшение (или увеличение) некоторой целевой функции. Алгоритмы групповой миграции начинаются с некоторых начальных разбиений, обычно генерируемых случайным образом. Затем к полученному разбиению применяются некоторые локальные изменения, чтобы уменьшить значение целевой функции. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто допустимое качество решения. Наиболее яркими представителями этих алгоритмов являются KL [7], FM [8], hMETIS [9].

Алгоритмы, рассматриваемые в настоящей работе, можно отнести к группе конструктивных алгоритмов. Они позволяют выполнять процедуры оптимизации исходных описаний для логических схем практической размерности.

Разбиение логической схемы на подсхемы. Среди различных способов задания функционирования логической схемы важное место занимает описание ее поведения с помощью системы логических уравнений. В работе рассматриваются системы логических уравнений, представленных в алгебраической форме.

Дана система логических уравнений

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ y_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\dots, \\ y_m &= f_m(x_1, x_2, \dots, x_n), \end{aligned} \quad (2)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – входные булевы переменные; y_1, y_2, \dots, y_m – выходные булевы переменные; f_1, f_2, \dots, f_m – булевы функции.

Требуется разбить систему (2) на подсистемы $S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_p$ так, чтобы число входных и выходных переменных не превышало заданных ограничений n и m и число блоков разбиения p было минимальным.

Основная идея алгоритма разбиения. Подсистемы формируются последовательно в два этапа:

1. Выбор стартового уравнения для подсистемы.
2. Включение уравнений системы в подсистему с проверкой ограничений.

На первом этапе возможны различные варианты выбора стартового уравнения:

- с максимальным числом переменных;
- описывающее выходную переменную (от выхода);
- содержащее максимальное число входных переменных (от входа).

Действия на втором этапе условно можно разделить на две группы:

- выбор уравнения для включения в подсистему;
- проверка выполнения ограничений.

На каждом шаге второго этапа в подсистему включается только одно уравнение. Выбор уравнения для включения в подсистему осуществляется исходя из следующих соображений (приводятся в порядке предпочтения):

- поскольку алгоритм направлен на устранение промежуточных переменных, в первую очередь выбираются уравнения, позволяющие удалять промежуточные переменные, т. е. связанные с подсистемой по входам или выходам;
- выбираются уравнения, добавляющие минимальное число новых входных переменных в подсистему.

Выбранное уравнение включается в текущую подсистему S_k (рис. 1), которая подвергается процедуре элиминации (устранения промежуточных переменных). Если полученная подсистема удовлетворяет заданным ограничениям, выбирается очередное уравнение для подсоединения.

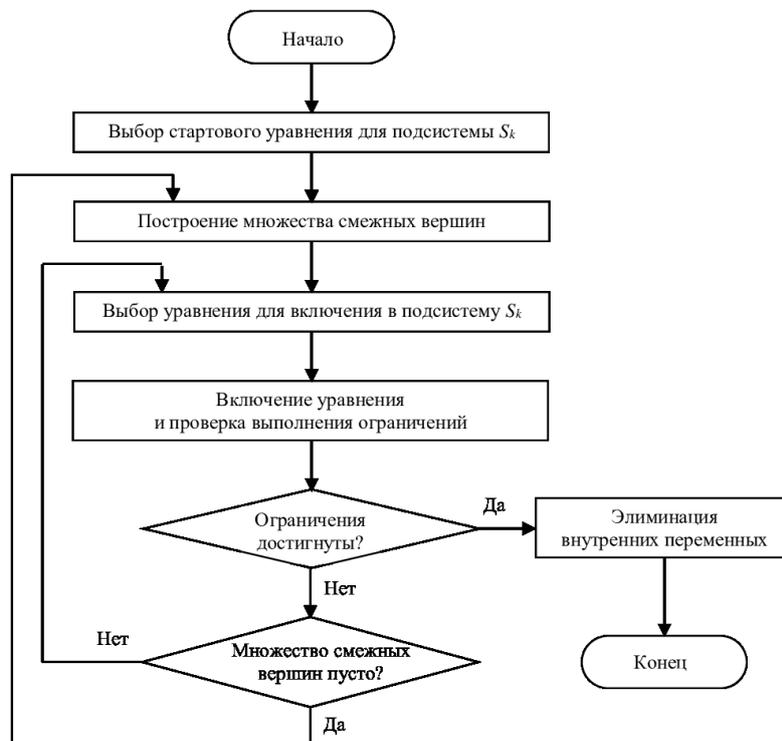


Рис. 1. Алгоритм формирования подсистемы S_k

Возможны следующие варианты процедуры элиминации для подсистемы логических уравнений:

- выполнять серию шагов по включению уравнений в подсистему, пока не будут достигнуты ограничения на число входов и выходов, затем выполнить элиминацию;
- выполнять элиминацию при включении каждого уравнения в подсистему.

Второй вариант требует больших временных затрат, но позволяет получить более качественное решение.

Если ни одно из оставшихся уравнений исходной системы не может быть включено в подсистему (без нарушения ограничений), то формирование подсистемы S_k считается законченным и выполняется переход к формированию следующей подсистемы.

Если все уравнения уже включены в подсистемы, то алгоритм заканчивает работу.

Этап включения уравнений системы в подсистему с проверкой ограничений. Для включения уравнения в подсистему строится множество смежных вершин для текущего состояния подсистемы, в которое помещаются уравнения из исходной системы, содержащие в качестве входных переменных выходные переменные подсистемы или в качестве выходных переменных – входные переменные подсистемы, т. е. вершины, связанные с подсистемой по входам или выходам. В дальнейшем изложении для обозначения уравнения используется термин «вершина» в тех случаях, когда система уравнений представлена в виде графа.

Далее выполняется перебор уравнений из множества смежных вершин и делается попытка включения каждого из них (по очереди) в подсистему. При включении каждого уравнения в подсистему осуществляется проверка ограничений. Если в результате получается подсистема, не удовлетворяющая ограничениям на число входных и выходных переменных, то уравнение не включается в подсистему и рассматривается следующее уравнение из множества смежных вершин. Если множество смежных вершин на данном шаге оказывается пустым, то строится новое множество смежных вершин для текущего состояния подсистемы S_k .

После того как будут достигнуты ограничения и закончится формирование подсистемы, выполняется процедура элиминации внутренних переменных, заключающаяся в подстановке выражений для внутренних переменных в уравнения подсистемы. При этом осуществляются действия по упрощению подсистемы, в результате которых может сократиться число уравнений и элементарных конъюнкций в подсистеме.

Построение множества смежных вершин. На каждом шаге формирования очередного блока разбиения строится множество смежных вершин для текущего состояния подсистемы. В это множество помещаются уравнения, которые позволяют эффективно выполнить процедуру элиминации промежуточных переменных подсистемы.

На рис. 2 показаны простые связи уравнения с подсистемой, когда выходная переменная подсистемы является входной переменной уравнения (рис. 2, а) и когда выходная переменная уравнения является входной переменной для подсистемы (рис. 2, б).

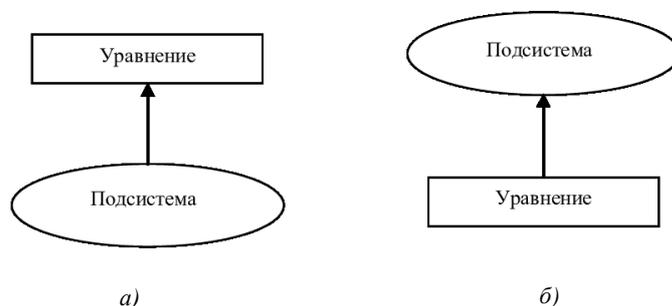


Рис. 2. Простые связи уравнения с подсистемой по выходу (а) и входу (б)

На рис. 3 изображены связи уравнения с подсистемой в виде разветвления, когда выходная переменная подсистемы имеется в качестве входной переменной в нескольких уравнениях (рис. 3, а) и когда выходная переменная уравнения имеется в качестве входной переменной подсистемы и нескольких уравнений исходной системы уравнений (рис. 3, б).

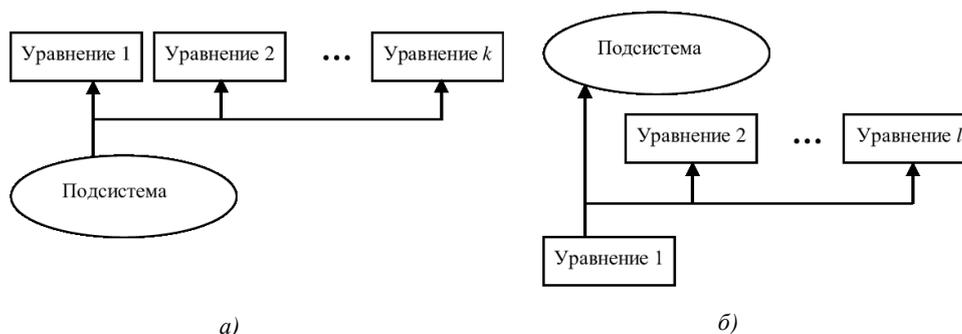


Рис. 3. Примеры разветвлений при формировании подсистем логических уравнений по выходу (а) и входу (б)

В случае разветвлений в алгоритме возникают новые критерии при включении очередного уравнения в подсистему. Необходимо включать или все уравнения разветвления, или ни одного, так как включение одного уравнения разветвления не позволит сократить число внутренних переменных подсистемы. Процедура включения очередного уравнения в подсистему является ключевой в алгоритме, от нее зависит качество получаемого разбиения.

В множестве смежных вершин различают два типа вершин. Вершину, которая связана по входу или выходу только с уравнениями подсистемы, назовем вершиной типа А (рис. 2). Она может быть выходной (рис. 2, а) или входной (рис. 2, б).

Вершину, на вход которой поступает выходная переменная подсистемы и эта же выходная переменная поступает на вход других вершин в сети (рис. 3, а), назовем выходной вершиной типа В. Вершину, выход которой поступает на вход подсистемы и, кроме этого, на вход других вершин в сети (рис. 3, б), назовем входной вершиной типа В.

Множество смежных вершин разделяется на группы, которые перечислены ниже в порядке предпочтения просмотра:

- 1) выходные вершины типа В на предмет включения всего разветвления с элиминацией;
- 2) выходные вершины типа В на предмет включения всего разветвления без элиминации;
- 3) выходные вершины типа А с элиминацией;
- 4) входные вершины типа А с элиминацией;
- 5) выходные вершины типа А без элиминации;
- 6) входные вершины типа А без элиминации;
- 7) выходные вершины типа В на предмет включения каждой вершины без элиминации;
- 8) входные вершины типа В на предмет включения каждой вершины без элиминации.

Предлагается множество смежных вершин просматривать несколько раз для выбора очередной вершины и включения ее в подсистему. В каждом просмотре выбираются вершины одной группы.

Алгоритмы модулей. Алгоритм процедуры разбиения логической схемы на подсистемы реализуется с помощью набора модулей, каждый из которых выполняет определенные функции.

Для построения множеств смежных вершин используются следующие модули:

b_out – модуль построения множества смежных вершин **AB_Out**. В него входят выходные вершины типа А (рис. 2, а) и В (рис. 3, а);

b_in – модуль построения двух множеств смежных вершин: **A_inp**, в которое входят входные вершины типа А (рис. 2, б), и **B_inp**, в которое входят входные вершины типа В (рис. 3, б);

b_all – модуль построения множества вершин **All**, не смежных с формируемой подсистемой. В него входят все уравнения исходной системы, которые еще не подключены в сформированные подсистемы и не смежные с формируемой подсистемой.

Для включения уравнений из множеств смежных вершин в формируемую подсистему используются следующие модули:

proc_out – модуль включения уравнений из множества **AB_Out**;

proc_in – модуль включения уравнений из множеств **A_inp**, **pB_inp**;

proc_all – модуль включения уравнений из множества **All**.

В множество уравнений **Equations** первоначально помещаются все уравнения исходной системы, при включении уравнений в формируемую подсистему они удаляются из этого множества.

Алгоритм build_k процедуры построения k-го блока разбиения. Алгоритм построения k-го блока разбиения (см. рис. 1) содержит шаги по построению множеств смежных вершин (уравнений) для текущего состояния k-й подсистемы (**AB_Out**, **A_Inp**, **B_Inp**, **All**) и шаги по включению уравнений из этих множеств в формируемую подсистему.

При описании алгоритма используется следующее обозначение: **include** – количество подключенных уравнений в подсистему (на очередном шаге алгоритма).

Шаги алгоритма **build_k**:

1. Найти в множестве **Equations** уравнение с максимальным числом входных переменных.
2. **include = 0**.
3. Выполнить модуль **b_out**.
4. Выполнить модуль **proc_out** (формируется значение **include**).

5. Если $include \neq 0$, переход на шаг 2.
6. $include = 0$.
7. Выполнить модуль b_in .
8. Выполнить модуль $proc_in$ (формируется значение $include$).
9. Если $include \neq 0$, переход на шаг 6.
10. $include = 0$.
11. Выполнить модуль b_all .
12. Выполнить модуль $proc_all$ (формируется значение $include$).
13. Если $include \neq 0$, переход на шаг 10.
14. Элиминация внутренних переменных.
15. Конец построения k -го блока разбиения.

Алгоритм partopt процедуры разбиения системы уравнений на блоки с ограничением на число входов и выходов. При описании алгоритма используются следующие обозначения:

$inpr$ – ограничение на число входов подсистемы;

out – ограничение на число выходов подсистемы;

num_eq – количество уравнений в множестве Equations, еще не подключенных в уже сформированные блоки;

k – номер формируемого блока;

$Block_k$ – множество уравнений, входящих в формируемую подсистему (k -й блок).

Шаги алгоритма partopt:

1. Сформировать множество уравнений Equations, поместив в него все уравнения исходной системы.
2. $k = 0$.
3. Определить num_eq .
4. Если $num_eq = 0$, переход на шаг 9.
5. Сформировать пустое множество $Block_k$.
6. Выполнить процедуру $build_k$.
7. Сформировать SF-описание для блока $Block_k$.
8. $k = k + 1$, переход на шаг 3.
9. Конец.

Результаты исследования алгоритмов. Рассмотренные алгоритмы были использованы при разработке процедур разбиения логических схем на подсхемы. Процедуры включены в ряд экспериментальных систем логического проектирования FLC [12], ЭЛС [13], CMOSLD [14], разработанных в лаборатории логического проектирования ОИПИ НАН Беларуси.

Были исследованы три процедуры разбиения. Основной идеей эксперимента являлось использование для преобразования схемы сочетания процедур разбиения схемы на блоки и дальнейшей логической оптимизации блоков. В качестве средства логической оптимизации выбрана процедура BDD-оптимизации функционального описания систем полностью определенных булевых функций с минимизацией числа коэффициентов разложений Шеннона с точностью до инверсий [15]. Выполнение процедуры разбиения на блоки позволило понизить размерность задачи для оптимизационных преобразований (что хорошо сказалось на времени выполнения), а также получить функциональные описания, схемная реализация которых даст лучшие характеристики.

Исследование проведено на примерах известной серии для оценки алгоритмов (URL: <http://www1.cs.columbia.edu/~cs6861/sis>). Для каждого примера синтезировалась схема в базе библиотеки проектирования КМОП-элементов с помощью промышленной системы синтеза LeonardoSpectrum [16]. После завершения синтеза система LeonardoSpectrum позволяла оценить характеристики полученной схемы: площадь кристалла (число транзисторов синтезированного описания) и количество базовых ячеек. В эксперименте рассматривалась только площадь схемы.

В процессе исследования для каждого примера были построены пять вариантов схемы с помощью синтезатора LeonardoSpectrum. Варианты различались применением различных процедур разбиения схем, выполненных перед этапами оптимизации и синтеза. Два варианта не ис-

пользовали процедуры разбиения логических схем на блоки, а три варианта использовали различные процедуры разбиения.

Результаты исследования представлены в таблице. Для каждого примера приведены параметры схемы: n – число входных переменных; m – число выходных переменных; S1, S2, S3, S4, S5 – значения площадей схемы (выраженных в числе транзисторов) по разным вариантам синтеза. Для каждой схемы определены: t_1 – время выполнения BDD-оптимизации функционального описания, не разбитого на блоки; t_2 – время выполнения BDD-оптимизации функционального описания, разбитого на блоки.

Для сравнительной оценки получены следующие варианты решений без разбиения схемы на блоки:

1. Исходная схема синтезировалась без предварительной оптимизации. Площадь полученной схемы S1.

2. Исходная схема синтезировалась с предварительной оптимизацией с помощью процедуры BDD-оптимизации. Площадь полученной схемы S2, время выполнения BDD-оптимизации t_1 .

Результаты исследования алгоритмов разбиения

Пример	Параметры схемы		Синтез по исходному описанию	Синтез с оптими- зацией BDD	Время оптими- зации BDD, с	Синтез схемы, полученной путем разбиения на блоки и BDD-оптимизации блоков			
						Процедура part1	Процедура partopt без элими- нации	Процеду- ра partopt с элими- нацией	Время оптими- зации BDD, с
	n	m	S1	S2	t_1	S3	S4	S5	t_2
Арехб	135	94	1830	2110	156	1816	1862	1858	9
C8	28	18	312	324	1,5	310	320	316	1
Chт	47	36	680	670	1,5	656	668	668	0,7
Count	35	168	256	256	4	256	256	256	1,2
Dalu	75	16	1834	1396	266	2070	1876	1886	25
X3	135	99	3462	3788	2079	3446	3514	3342	25
term1	34	10	1044	3086	32	1034	908	1090	12
x4	94	71	1544	2892	23	1424	1528	1488	9
ttt2	24	21	698	766	20	658	666	654	3
example2	85	63	850	996	8	836	848	826	3
Кол-во лучших решений по площади			–	1		8			

Для оценки эффективности процедуры разбиения получены три варианта синтезированной схемы:

1. Процедура part1 выполняла построение блоков, наполняя их уравнениями в произвольном порядке, например в порядке следования в исходном описании. Далее следовали BDD-оптимизация каждого блока, процедура устранения иерархии описания и синтез. Площадь полученной схемы S3.

2. Процедура partopt_w выполняла построение блоков, наполняя их уравнениями, связанными между собой по входам или выходам. Далее следовали BDD-оптимизация каждого блока, процедура устранения иерархии описания и синтез. Площадь полученной схемы S4.

3. Процедура partopt выполняла построение блоков, наполняя их уравнениями, связанными между собой по входам или выходам. Для каждого блока осуществлялась процедура ликвидации внутренних переменных (элиминации) в полученной системе булевых уравнений. Далее следовали BDD-оптимизация каждого блока, процедура устранения иерархии описания и синтез. Площадь полученной схемы S5.

Время t_2 BDD-оптимизации для схем, разбитых на блоки, для процедур 1–3 различается незначительно (в таблице представлено среднее значение).

Заключение. Результаты эксперимента показывают, что процедуры разбиения улучшают площадь синтезированных схем в восьми случаях из десяти. В одном случае лучшее решение получено при применении BDD-оптимизации к исходной схеме без использования процедуры

разбиения на блоки (Dalu). Один пример (Count) дает абсолютно одинаковые результаты для любых методов оптимизации. Для всех примеров получен выигрыш по времени оптимизации, разбиение на блоки для примера X3 позволило получить выигрыш по времени в 83 раза. Процедуры разбиения схемы на блоки в большинстве случаев повышают эффективность выполнения дальнейших оптимизационных преобразований схемы, сокращают время выполнения процедур оптимизации и позволяют решать оптимизационные задачи для схем большой размерности за приемлемое время. Полученные схемные решения выигрывают по качеству.

Разработанные алгоритмы были реализованы в виде набора процедур разбиения схемы в рамках экспериментальной системы логического проектирования FLC [12].

Список использованных источников

1. Рабаи, Ж. М. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования / Ж. М. Рабаи, А. Чандракасан, Б. Николич. – М. : Вильямс, 2007. – 912 с.
2. Partitioning-based methods / ed.: C. J. Alpert, D. P. Mehta, S. S. Sapatnekar // Handbook of Algorithms for Physical design Automation. – CRC Press, 2009. – P. 290–308.
3. Global and detailed placement / A. B. Kahng [et al.] // VLSI physical design: Graph Partitioning to Timing Closure. – Springer, 2011. – P. 95–122.
4. Bibilo, P. Block synthesis of combinational circuits / P. Bibilo, N. Kirienko // Design of Embedded Control Systems. – Springer, 2004 – P. 189–196.
5. Базилевич, Р. П. Алгоритмические и программные средства для размещения разногабаритных элементов на конструктиве / Р. П. Базилевич, И. Ф. Щербюк // Автоматизация проектирования дискретных систем : материалы Шестой Междунар. конф. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2007. – С. 157–164.
6. Breuer, M. A. Fundamental CAD algorithms / M. A. Breuer, M. Sarrafzadeh, F. Somenzi // IEEE Trans. Computer-Aided Design. – 2000. – Vol. 19, no. 12. – P. 1449–1475.
7. Kernighan, B. W. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs / B. W. Kernighan, S. Lin. // Bell Labs Technical J. – 1970. – Vol. 49. – P. 291–307.
8. Fiduccia, C. M. A linear time heuristic for improving network partitions / C. M. Fiduccia, R. M. Mattheyses // Proc. IEEE-ACM Design Automation Conf., Las Vegas, Nevada, USA, 14–16 June 1982. – Las Vegas, 1982. – P. 175–181.
9. Karypis, G. Multilevel k-way hypergraph partitioning / G. Karypis, V. Kumar // Proc. IEEE-ACM Design Automation Conf., New Orleans, USA, 21–25 June 1999. – New Orleans, 1999. – P. 343–348.
10. Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation; part I, graph partitioning / D. S. Johnson [et al.] // Operations Research. – 1989. – Vol. 37. – P. 865–892.
11. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик ; под ред. В. М. Курейчика. – М. : Физматлит, 2006. – 320 с.
12. Бибило, П. Н. Логическое проектирование дискретных устройств с использованием производственно-фреймворковой модели представления знаний / П. Н. Бибило, В. И. Романов. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 279 с.
13. Автоматизация логического синтеза КМОП-схем с пониженным энергопотреблением / П. Н. Бибило [и др.] // Программная инженерия. – 2013. – № 8. – С. 35–41.
14. A system for logical design of custom CMOS VLSI functional blocks with reduced power consumption / P. N. Bibilo [et al.] // Russian Microelectronics. – 2018. – Vol. 47, no. 1. – P. 65–81.
15. Бибило, П. Н. Логическая оптимизация многоуровневых представлений систем булевых функций на основе блочного разбиения и разложения Шеннона / П. Н. Бибило, Н. А. Кириенко, Ю. Ю. Ланкевич // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 56–70.
16. Бибило, П. Н. Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum / П. Н. Бибило. – М. : Солон-Пресс, 2005. – 384 с.

References

1. Rabaey Jan M. *Digital Integrated Circuits: A Design Perspective*. Prentice Hall, 1995, 702 p.
2. Alpert C. J., Mehta D. P., Sapatnekar S. S. (eds.). Partitioning-based methods. *Handbook of Algorithms for Physical design Automation*. CRC Press, 2009, pp. 290–308.
3. Kahng A. B., Liening J., Markov I. L., Hu J. Global and detailed placement. *VLSI physical design: Graph Partitioning to Timing Closure*. Springer, 2011, pp. 95–122.
4. Bibilo P., Kirienko N. Block synthesis of combinational circuits. *Design of Embedded Control Systems*. Springer, 2004, pp. 189–196.

5. Bazilevich R. P., Shcherbyuk I. F. Algoritmicheskie i programmnye sredstva dlya razmeshcheniya raznogabaritnyh elementov na konstruktive [Algorithmic and software tools for placing oversized elements on a construct]. *Avtomatizatsiya proektirovaniya diskretnykh sistem: materialy Shestoy Mezhdunarodnoj konferencii [Computer-Aided Design of Discrete Devices: Proceedings of the Sixth International Conference]*. Minsk, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, 2007, pp. 157–164 (in Russian).
6. Breuer M. A., Sarrafzadeh M., Somenzi F. Fundamental CAD algorithms. *IEEE Transactions Computer-Aided Design*, 2000, vol. 19, no. 12, pp. 1449–1475.
7. Kernighan B. W., Lin S. An efficient heuristic procedure for partitioning graphs. *Bell Labs Technical Journal*, 1970, vol. 49, pp. 291–307.
8. Fiduccia C. M., Mattheyses R. M. A linear time heuristic for improving network partitions. *Proceedings IEEE-ACM Design Automation Conference, Las Vegas, Nevada, USA, 14–16 June 1982*. Las Vegas, 1982, pp. 175–181.
9. Karypis G., Kumar V. Multilevel k-way hypergraph partitioning. *Proceedings IEEE-ACM Design Automation Conference, New Orleans, USA, 21–25 June 1999*. New Orleans, 1999, pp. 343–348.
10. Johnson D. S., Aragon C. R., McGeoch L. A., Schevon C. Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation; part I, graph partitioning. *Operations Research*, 1989, vol. 37, pp. 865–892.
11. Gladkov L. A., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. (ed.) *Geneticheskie algoritmy. Genetic Algorithms*. Moscow, Fizmatlit, 2006, 320 p. (in Russian).
12. Bibilo P. N., Romanov V. I. Logicheskoe proektirovanie diskretnykh ustrojstv s ispol'zovaniem produkcionno-frejmovoj modeli predstavlenija znaniy. *Logical Design of Discrete Devices with Use of Productional and Frame Model of Representation of Knowledge*. Minsk, Belaruskaja navuka, 2011, 279 p. (in Russian).
13. Bibilo P. N., Cheremisinova L. D., Kardash S. N., Kirienko N. A., Romanov V. I., Cheremisinov D. I. Avtomatizatsiya logicheskogo sinteza KMOP-skhem s ponizhennym energopotrebleniem [Low-power logical synthesis of cmos circuits automation]. *Programmnyaya inzheneriya [Software Engineering]*, 2013, no. 8, pp. 35–41 (in Russian).
14. Bibilo P. N., Avdeev N. A., Kardash S. N., Kirienko N. A., Lankevich Yu. Yu., ..., Cheremisinova L. D. A system for logical design of custom CMOS VLSI functional blocks with reduced power consumption. *Russian Microelectronics*, 2018, vol. 47, no. 1, pp. 65–81.
15. Bibilo P. N., Kirienko N. A., Lankevich Yu. Yu. Logicheskaya optimizatsiya mnogourovnevnykh predstavlenij sistem bulevykh funkciy na osnove blochnogo razbieniya i razlozheniya Shennona [Logical optimization the multilevel representations of systems of Boolean functions based on partitioning into blocks and Shannon decomposition]. *Informatika [Informatics]*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 56–70 (in Russian).
16. Bibilo P. N. Sistemy proektirovaniya integral'nyh skhem na osnove yazyka VHDL. *StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum. Integrated Circuit Design Systems Based on VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum*. Moscow, Solon-Press, 2005, 384 p. (in Russian).

Информация об авторе

Кириенко Наталья Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: natalia.kirienko@tut.by

Information about the author

Natalia A. Kirienko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: natalia.kirienko@tut.by

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

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ INFORMATION PROTECTION

УДК 004
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-64-71>

Поступила в редакцию 04.05.2020
Received 04.05.2020

Принята к публикации 14.07.2020
Accepted 14.07.2020

Стойкость механизмов аутентификации в инфокоммуникационных сетях

М. Н. Бобов[✉], А. В. Курилович

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь*
[✉]E-mail: bobov@bsuir.by

Аннотация. Рассмотрены распределенные инфокоммуникационные сети, в которых осуществляется взаимодействие пользователей, серверов приложений и баз данных для обеспечения реализации различных прикладных задач. При доступе к инфокоммуникационной сети первой процедурой является установление подлинности взаимодействующих субъектов посредством их аутентификации на основе использования механизма паролей. Показано, что для социальных сетей с большим числом пользователей широко применяемая оценка безопасности парольных систем на основе расчета вероятности его подбора недостаточна. Приведены графики вероятности появления одинаковых паролей у двух пользователей при длине пароля 6, 7 и 8 знаков, объеме алфавита 36, 42 и 57 знаков и количестве пользователей не более 10^7 . Дана оценка стойкости парольных систем аутентификации инфокоммуникационных сетей на основе критерия «парадокс дней рождения». Определено, что известные социальные сети, имеющие число пользователей, сравнимое с числом используемых паролей, являются нестойкими к атакам «дней рождения». Показано, что для таких систем стойкость парольной системы к взлому должна оцениваться исходя из критерия $m = A^{n/2}$.

Ключевые слова: аутентификация, стойкость парольной системы, инфокоммуникационная сеть, удаленный доступ, парадокс дней рождения, критерий стойкости сети к атакам «дней рождения»

Для цитирования. Бобов, М. Н. Стойкость механизмов аутентификации в инфокоммуникационных сетях / М. Н. Бобов, А. В. Курилович // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 64–71. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-64-71>

Stability of password authentication in infocommunication networks

Mikhail N. Bobov[✉], Andrei V. Kurylovich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus
[✉]E-mail: bobov@bsuir.by

Abstract. The article discusses distributed infocommunication networks, in which the interaction of users, application servers and databases is carried out. When accessing an infocommunication network, the first procedure is to authenticate the agents through their authentication by password mechanism. It is shown that for social networks with a large number of users, widely used assessment of the security of password systems based on the calculation of the determination probability is not sufficient. The probability of the same passwords for two users with a password length of 6, 7 and 8 characters with alphabet size of 36, 42 and 57 characters and the number of users no more than 10 million is shown. An assessment of the strength of password authentication

systems for info-communication networks based on the "birthday paradox" criterion is given. It has been determined that well-known social networks with a number of users comparable to the number of passwords used are not resistant to "birthday attacks". It is shown that for such systems the resistance of the password system to cracking should be assessed by $m = A^{n/2}$ criterion.

Keywords: password authentication, password system stability, infocommunication networks, remote access, the "birthday paradox", networks strength criteria of password authentication

For citation. Bobov M. N., Kurylovich A. V. Stability of password authentication in infocommunication networks. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 64–71 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-64-71>

Введение. Целью функционирования инфокоммуникационных сетей является реализация информационных процессов с заданными характеристиками, направленных на обеспечение различных прикладных задач пользователей. Для их решения в системе осуществляются взаимодействия пользователей между собой, пользователей с серверами приложений и баз данных, между серверами приложений и баз данных. Краеугольным вопросом при организации таких взаимодействий является установление подлинности субъектов, пытающихся получить доступ к ресурсам системы. Данная проблема решается путем использования средств и методов аутентификации, которые по месту приложения можно разделить на локальные и удаленные. При локальной аутентификации вся система, включая механизм аутентификации и управления доступом, размещается внутри одного физического периметра безопасности. Владелец системы и (или) пользователь ведут и обновляют базу аутентификационных данных внутри этого периметра. Аутентификация предполагает непосредственное взаимодействие субъекта с устройством проверки подлинности при входе в систему.

Удаленная аутентификация используется при взаимодействии пользователей с информационными ресурсами сети или другими пользователями в интерактивном режиме, содержит несколько точек обслуживания, которые требуют управления доступом и могут размещаться в различных местах. Владелец ведет и поддерживает актуальной единую базу аутентификационных данных для всей системы [1].

В настоящее время широкое распространение получили распределенные информационные сети, созданные для обеспечения потребностей широкого круга пользователей и имеющие условное наименование «социальные сети». Каждый пользователь для получения доступа к подобной сети на первом этапе проходит процедуру регистрации, в процессе которой сообщает системе свои учетное имя и пароль, а также другие персональные данные. В дальнейшем при обращении к сети для получения ее услуг пользователь вводит учетное имя и пароль и при их совпадении с именем и паролем, введенными при регистрации, получает доступ к сети.

Являясь средствами защиты каналов доступа к инфокоммуникационным системам, механизмы аутентификации должны обладать рядом специфических качеств, обеспечивающих их стойкость к взлому, который может происходить путем подбора пароля, компрометации пароля или кражи файла паролей. Вероятность подбора пароля зависит в основном от двух параметров: длины пароля и объема алфавита, и если пароль выбирается случайно и равновероятно, то для ее оценки используются формулы, широко применяемые для локальных парольных механизмов [2]:

– вероятность подбора пароля с первой попытки

$$P_{П1} = \frac{1}{A^S},$$

где A – объем алфавита, S – длина пароля;

– вероятность подбора пароля с i -й попытки

$$P_{Пi} = \frac{1}{A^S + 1 - i};$$

– вероятность подбора пароля за k попыток

$$P_{Пk} = \frac{k}{A^S};$$

– вероятность подбора пароля в период его безопасного времени действия

$$P_{T_B} = \frac{3600 \cdot T_B}{A^s \cdot t_{\Pi}},$$

где T_B – безопасное время действия; t_{Π} – время набора пароля.

Вместе с тем широко известные современные социальные сети объединяют огромное количество пользователей, и поэтому оценки стойкости используемых в них парольных систем аутентификации к атакам подбора пароля, компрометации пароля и краже файла паролей недостаточно. В рассматриваемом случае парольные системы аутентификации необходимо оценивать на стойкость к атакам «дней рождения». Атака «дней рождения» – используемое в криптоанализе название для метода взлома шифров или поиска коллизий хеш-функций на основе парадокса дней рождения [3]. Парадокс дней рождения – положение, утверждающее, что если дана группа из 23 или более человек, то вероятность того, что хотя бы у двух из них дни рождения (число и месяц) совпадут, превышает 50 %. Для группы из 60 или более человек вероятность совпадения дней рождения хотя бы у двух ее членов составляет более 99 %, хотя 100 % она достигает, только когда в группе находится не менее 367 человек (с учетом високосных лет).

Определим вид формального выражения для расчета вероятности совпадения хотя бы двух паролей размерности n в группе из m пользователей. Рассчитаем сначала вероятность $p(m)$ того, что в группе из m пользователей все их пароли будут различными. Если $N > m$ ($N = A^n$), то в силу принципа Дирихле вероятность равна нулю. Если же $N \leq m$, то будем рассуждать следующим образом. Возьмем наугад одного пользователя из группы и запомним его пароль. Затем возьмем наугад второго пользователя, при этом вероятность того, что его пароль не совпадет с паролем первого пользователя, равна $1 - 1/N$. После этого возьмем третьего пользователя, при этом вероятность того, что его пароль не совпадет с паролями первых двух, равна $1 - 2/N$. Рассуждая по аналогии, дойдем до последнего пользователя, для которого вероятность несовпадения его пароля со всеми предыдущими будет равна $1 - (m - 1)/N$. Перемножая эти вероятности, получим вероятность того, что все пароли в группе будут различными:

$$\begin{aligned} p(m) &= 1 \cdot (1 - 1/N) \cdot (1 - 2/N) \cdot \dots \cdot (1 - (m - 1)/N) = \\ &= \frac{N \cdot (N - 1) \cdot \dots \cdot (N - m + 1)}{N^m} = \frac{N!}{(N - m)! \cdot N^m}. \end{aligned} \quad (1)$$

Тогда вероятность того, что по крайней мере один пользователь имеет тот же пароль, что и любой другой пользователь из группы m , определяется выражением

$$P(m) = 1 - \frac{N!}{(N - m)! \cdot N^m}. \quad (2)$$

Воспользуемся формулой Стирлинга для приближенного вычисления значения факториала $n! \approx \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$ для расчета полученной функции:

$$\begin{aligned} P(m) &= 1 - \frac{N!}{(N - m)! \cdot N^m} \approx 1 - \frac{\sqrt{2\pi N} \left(\frac{N}{e}\right)^N}{N^m \cdot \sqrt{2\pi(N - m)} \left(\frac{N - m}{e}\right)^{(N - m)}} = \\ &= 1 - \sqrt{\frac{N}{N - m}} \cdot \frac{1}{e^m} \cdot \left(\frac{N}{N - m}\right)^{(N - m)}. \end{aligned}$$

Таким образом, получим формулу

$$P(m) \approx 1 - \sqrt{\frac{N}{N - m}} \cdot \frac{1}{e^m} \cdot \left(\frac{N}{N - m}\right)^{(N - m)}. \quad (3)$$

На рис. 1 изображены графики вероятности появления одинаковых паролей у двух пользователей из предположения, что пароли выбираются случайно и равновероятно. Расчет выполнен в программе Mathematica для следующих исходных условий: количество знаков в алфавите $N = 36, 42, 57$; длина пароля $n = 6, 7, 8$; количество пользователей $m = 1 - 1,7 \cdot 10^7$.

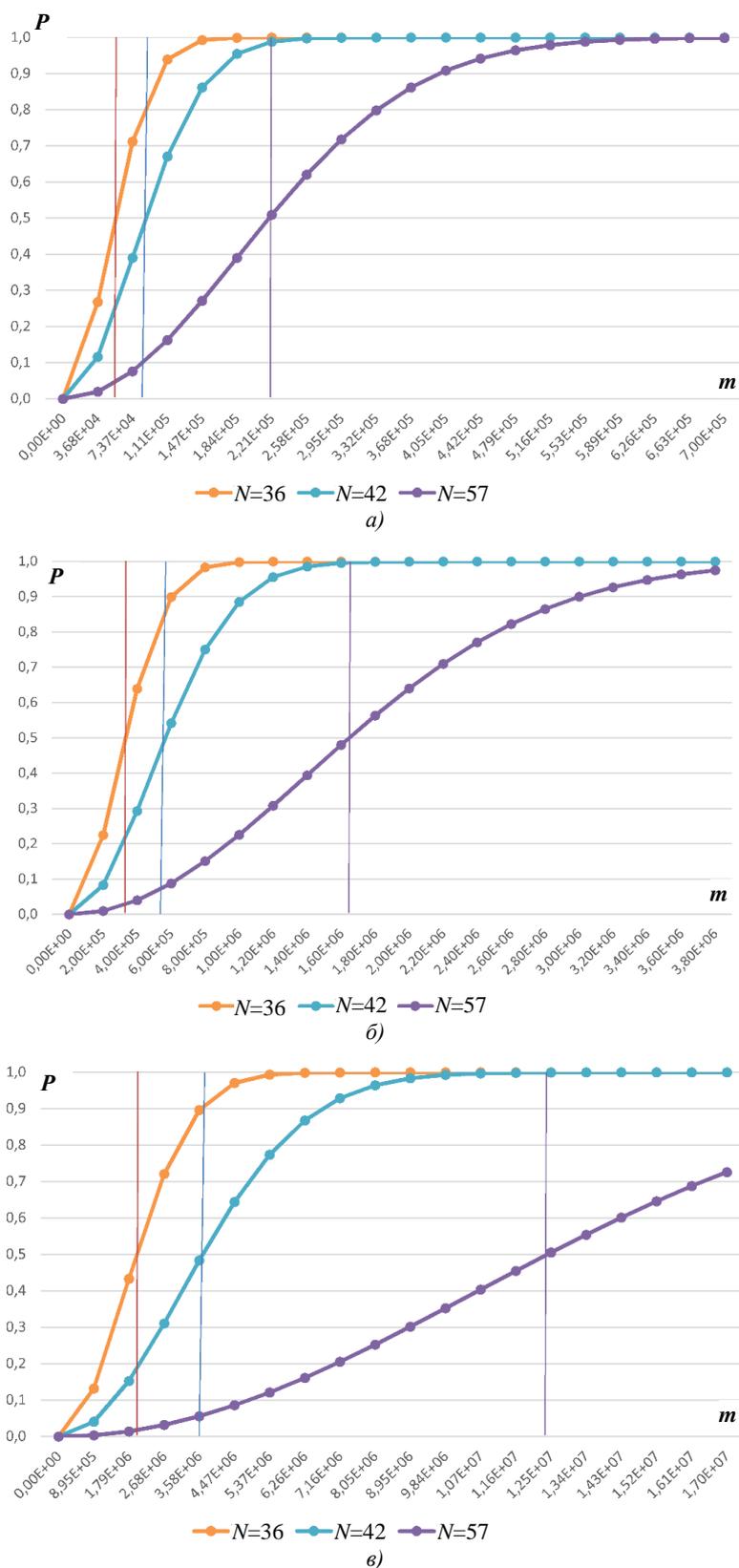


Рис. 1. Графики вероятности $P(m)$ при длине пароля $n = 6$ (а); $n = 7$ (б) и $n = 8$ (в)

По отношению к атаке «дней рождения» сформулируем следующий критерий стойкости парольной системы аутентификации. Парольная система аутентификации считается стойкой, если величина вероятности совпадения двух назначаемых в ней паролей меньше 0,5, т. е. верно неравенство

$$P(m) < 0,5. \quad (4)$$

Другими словами, парольная система аутентификации считается нестойкой, если величина вероятности совпадения двух назначаемых в ней паролей $P(m) \geq 0,5$. Данные о количестве пользователей, соответствующем принятому критерию (на рис. 1 отмечены вертикальными линиями), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размер алфавита	$P(m) = 0,5$			$P(m) = 0,9$		
	$n = 6$	$n = 7$	$n = 8$	$n = 6$	$n = 7$	$n = 8$
36	$3,7 \cdot 10^4$	$4,0 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^5$	$6,0 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^6$
42	$9,5 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	$7,2 \cdot 10^6$
57	$2,2 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^6$	$\sim 10^9$

Для указанных параметров системы с числом пользователей, расположенным слева от прямых на рис. 1, являются нестойкими. В качестве примера оценим стойкость наиболее распространенных социальных сетей, сведения по которым приводятся в исследовании компании WebCanape, проведенном в январе 2019 г. (рис. 2) (URL: <https://www.web-canape.ru/business/vsya-statistika-interneta-na-2019-god-v-mire-i-v-rossii>).

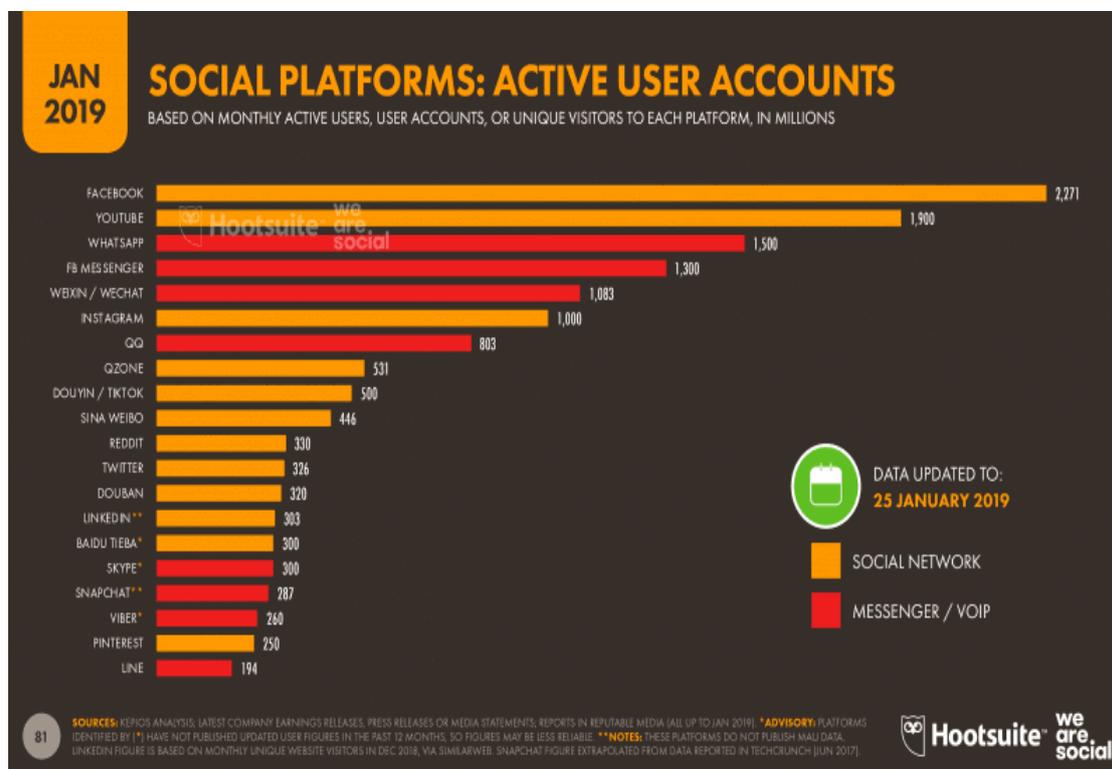


Рис. 2. Данные о количестве пользователей, зарегистрированных в наиболее популярных сетях

Количество учетных записей пользователей наиболее распространенных социальных сетей приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сеть	Количество пользователей
Facebook	2,27 млрд ($2,27 \cdot 10^9$)
YouTube	1,9 млрд ($1,9 \cdot 10^9$)
Instagram	1,0 млрд ($1,0 \cdot 10^9$)
Ozone	536 млн ($5,31 \cdot 10^8$)
Twitter	326 млн ($3,26 \cdot 10^8$)
LinkedIn	303 млн ($3,03 \cdot 10^8$)

При регистрации социальные сети предъявляют к паролям различные требования (рис. 3).

а)

б)

в)

Рис. 3. Регистрация в Facebook (а); YouTube (б) и Instagram (в)

Минимально необходимые параметры парольных систем аутентификации, используемые в распространенных социальных сетях, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сеть	Количество пользователей	Алфавит A	Длина пароля n	$P_{П1}$
Facebook	$2,27 \cdot 10^9$	42	6	$5,5 \cdot 10^9$
YouTube	$1,9 \cdot 10^9$	42	8	$9,6 \cdot 10^{12}$
Instagram	$1,0 \cdot 10^9$	62	15	$4,8 \cdot 10^{28}$
Ozone	$5,31 \cdot 10^8$	36	6	$2,1 \cdot 10^9$
Twitter	$3,26 \cdot 10^8$	36	6	$2,1 \cdot 10^9$
LinkedIn	$3,03 \cdot 10^8$	36	6	$2,1 \cdot 10^9$

Сравнительные данные по существующему и допустимому числу пользователей в анализируемых социальных сетях, использующих парольные системы аутентификации с указанными при регистрации параметрами, в соответствии с критерием стойкости к атаке «дней рождения» приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сеть	Количество пользователей	Количество пользователей по критерию $P(m) = 0,5$	$P_{П1}$	Оценка
Facebook	$2,27 \cdot 10^9$	$9,5 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^9$	–
YouTube	$1,9 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^6$	$9,6 \cdot 10^{12}$	–
Instagram	$1,0 \cdot 10^9$	$\sim 10^{12}$	$4,8 \cdot 10^{28}$	Соответствует
Ozone	$5,31 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^9$	–
Twitter	$3,26 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^9$	–
LinkedIn	$3,03 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^9$	–

Как следует из данных табл. 4, среди анализируемых социальных сетей только Instagram является стойкой к атаке «дней рождения».

Определим теперь аналитическое выражение для практического расчета стойкости сети к атаке «дней рождения» [4]. Используя выражение (1), найдем показатель

$$\begin{aligned}
 P(m) &= 1 - 1 \cdot (1 - 1/N) \cdot (1 - 2/N) \cdot \dots \cdot (1 - (m - 1)/N) = \\
 &= 1 - \prod_{i=1}^{m-1} \left(1 - \frac{i}{N}\right) \approx 1 - \prod_{i=1}^{m-1} \left(e^{-\frac{i}{N}}\right) = 1 - e^{-\frac{m(m-1)}{N}}.
 \end{aligned}$$

Согласно критерию (4)

$$1 - e^{-\frac{m(m-1)}{N}} = \frac{1}{2}, \quad 2 = e^{\frac{m(m-1)}{2N}}, \quad \ln 2 = \frac{m(m-1)}{2N}.$$

Принимая $m(m-1) \approx m^2$, получим выражение

$$m = \sqrt{2N \cdot \ln 2} = 1,17\sqrt{N} = \sqrt{A^n} = A^{\frac{n}{2}}.$$

Таким образом, парольные системы аутентификации, применяемые в больших распределенных сетях, в которых число пользователей m сравнимо или больше возможного количества вы-

бираемых ими для доступа к услугам аутентификаторов N , должны оцениваться на стойкость к атаке «дней рождения» в соответствии с критерием $m = A^{n/2}$.

Список использованных источников

1. Бобов, М. Н. Основы аутентификации в телекоммуникационных системах : учеб. пособие / М. Н. Бобов, В. К. Конопелько. – Минск : БГУИР, 2008. – 130 с.
2. Смит, Р. Э. Аутентификация: от паролей до открытых ключей : пер. с англ. / Р. Э. Смит. – М. : Вильямс, 2002. – 432 с.
3. Математические и компьютерные основы криптологии / Ю. С. Харин [и др.]. – Минск : Новое знание, 2003. – 382 с.
4. Мао, В. Современная криптография: теория и практика : пер. с англ. / В. Мао. – М. : Вильямс, 2005. – 768 с.

References

1. Bobov M. N., Konopelko V. K. *Osnovy autentifikatsii v telekommunikatsionnykh sistemakh. Basics of Authentication in Telecommunication Systems*. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki, 2008, 130 p. (in Russian).
2. Smith R. E. *Authentication: from Passwords to Public Keys*. Boston, Addison Wesley, 2002, 549 p.
3. Kharin Y. S., Bernik V. I., Matveyev G. V., Agiyevich S. V. *Matematicheskiye i komp'yuternyye osnovy kriptologii. Mathematical and Computer Foundations of Cryptology*. Minsk, Novoye znaniye, 2003, 382 p. (in Russian).
4. Mao W. *Modern Cryptography: Theory and Practice*. New Jersey, Prentice Hall PTR, 2003, 648 p.

Информация об авторах

Бобов Михаил Никитич, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.
E-mail: bobov@bsuir.by

Курилович Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.
E-mail: kurilovich@bsuir.by

Information about the authors

Mikhail N. Bobov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.
E-mail: bobov@bsuir.by

Andrei V. Kurylovich, Senior Lecturer of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.
E-mail: kurilovich@bsuir.by

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

УДК 004.738.52
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-72-77>

Поступила в редакцию 01.04.2020
Received 01.04.2020

Принята к публикации 29.04.2020
Accepted 29.04.2020

Анализ защищенности веб-ресурсов на основе метрики CVSS

Ш. Р. Давлатов^{1✉}, П. В. Кучинский²

¹Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь
✉E-mail: shohrukh.92@gmail.com

²Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем
имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

Аннотация. На основе анализа данных об уязвимостях веб-ресурсов и метрики CVSS (Common Vulnerability Scoring System) изучено распределение усредненной величины оценки по стандарту CVSS для расчета числового показателя уязвимости по десятибалльной шкале для сайтов Республики Беларусь. Проведена проверка гипотезы о распределении оценки уязвимостей CVSS по закону Пуассона методом критерия хи-квадрат. Установлено, что около 10 % веб-ресурсов из исходной генеральной выборки размером 19 000 имеют критическую усредненную оценку уязвимости. В рамках проведенного исследования создана универсальная система для сбора технической информации об активных веб-ресурсах в сети Интернет из общедоступных каталогов и реестров. Разработаны специальные шаблоны поиска с помощью RegExp-выражений языка программирования JavaScript для точного определения версий технологий, которые были использованы для создания веб-сайтов. На базе полученных данных установлены процентные соотношения используемых технологий, доменов верхнего уровня и географическое расположение серверов, которые обслуживают веб-ресурсы. Предлагаемая система может быть адаптирована под любые уникальные требования, необходимые специалистам по защите информации для проведения аудита безопасности веб-ресурсов.

Ключевые слова: информационная безопасность, оценка защищенности, веб-сайт, веб-сервер, метрика CVSS, язык программирования JavaScript

Для цитирования. Давлатов, Ш. Р. Анализ защищенности веб-ресурсов на основе метрики CVSS / Ш. Р. Давлатов, П. В. Кучинский // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 72–77. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-72-77>

Web resource security analysis based on CVSS metrics

Shohrukh R. Davlatov^{1✉}, Pyotr V. Kuchinsky²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus
✉E-mail: shohrukh.92@gmail.com

²A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,
Minsk, Belarus

Abstract. Based on the analysis of vulnerability data for web resources and the CVSS metric, the distribution of the average CVSS (Common Vulnerability Scoring System standard for calculating a numerical vulnerability score on a ten-point scale) score for the websites of the Republic of Belarus was studied. The hypothesis on the distribution of the CVSS vulnerability assessment according to Poisson's law was tested by chi-square criteria. It was found that about 10% of web resources from the original general of samples of 19000 size have a critical averaged assessment level of vulnerability. As part of this work an universal system for collecting technical information about active web resources on the Internet from public directories and registries has been developed. Specific search templates have been developed using RegExp JavaScript expressions to detect the versions of

technologies that were used to create websites. Based on this data the percentage distribution of used technologies, top-level domains and the geographical location of the servers were calculated. Proposed system can be adapted to any unique conditions required by information security specialists to conduct a security audit of web resources.

Keywords: information security, security assessment, website, web server, CVSS metric, programming language JavaScript

For citation. Davlatov Sh. R., Kuchinsky P. V. Web resource security analysis based on CVSS metrics. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 72–77 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-72-77>

Введение. С развитием веб-технологий растет и число потенциальных уязвимостей в онлайн-ресурсах. Наличие большого набора инструментов для реализации угроз безопасности информации в сети Интернет определяет актуальность использования систем для анализа безопасности веб-ресурсов. Специалисты по защите информации широко применяют объективные количественные показатели защищенности, которые вычисляются на основе метрик открытой системы оценки CVSS [1]. Существуют открытые базы данных, в которых хранится информация об уязвимостях определенных версий технологий в формате *<название технологии, версия, оценка CVSS>*. Метрика CVSS предлагает простой инструментарий для расчета числового показателя по десятибалльной шкале, который позволяет оперативно принимать решения о том, как реагировать на ту или иную уязвимость [2]. Чем выше значение метрики, тем более оперативная реакция требуется. Например, язык программирования (ЯП) PHP версии 5.4.0 имеет 67 опубликованных уязвимостей в базе <https://www.cvedetails.com> со средней оценкой CVSS порядка семи.

В рамках настоящей работы была создана универсальная система для автоматического сбора из общедоступных каталогов и реестров технической информации об активных интернет-ресурсах Беларуси, такой как канонические имена доменов, IP-адреса, открытые порты, географическое расположение серверов, уязвимости технологий, версии операционных систем серверов и других программных обеспечений, которые были использованы для разработки и обслуживания веб-ресурсов. На основе полученных данных из открытых источников построено эмпирическое распределение оценок уязвимостей сайтов, предложена новая методика вычисления усредненной оценки уязвимостей веб-ресурсов на базе метрики CVSS, с помощью критерия хи-квадрат проверена гипотеза о том, что случайная величина X (усредненная оценка уязвимостей веб-ресурсов) распределена по закону Пуассона.

Сбор данных и методы исследования. Архитектура разработанной системы основана на шаблоне проектирования «цепочка обязанностей». Данный паттерн позволяет структурировать модули системы таким образом, чтобы запросы передавались последовательно по цепочке обработчиков. Каждый последующий модуль определяет возможность самостоятельной обработки запроса и необходимость ее последующей передачи по цепи. Первое звено цепочки состоит из модуля для получения и первичной обработки списка исходных доменов. С помощью разработанных NodeJS-скриптов автоматически была собрана информация о веб-ресурсах из открытых источников в сети Интернет (URL: <https://www.shodan.io> и <https://censys.io>). В результате процесса сканирования удалось собрать данные более 19 000 наиболее популярных веб-ресурсов Беларуси, которые были распределены по следующим категориям:

- работа, бизнес, компании, маркетинг, промышленность, банки и финансы;
- новости, веб-сервисы, онлайн-магазины, торговые площадки, объявления;
- семья, спорт, медицина, здоровье, отдых, досуг, культура и искусство;
- компьютерная техника, электроника, оргтехника, бытовые товары, авто- и мототехника;
- общество, политика, городские сайты, каталоги, образование и наука.

Для каждого отдельного домена параллельно запускается процесс для отправки GET-запроса и получения дополнительной технической информации: IP-адресов, открытых портов, географического расположения веб-серверов и заголовков ответов HTTP. Далее с помощью RegExp-выражений ЯП JavaScript определяются версии технологий, на базе которых были созданы веб-ресурсы. Для решения поставленной задачи достаточно получить исходный код страницы веб-сайта в формате HTML и заголовки ответов сервера [3]. С помощью Fetch API-интерфейса JavaScript были получены ответы на HTTP-запросы всех доменов исходной

выборки. Результаты запросов и заголовки ответов сервера были сохранены в локальной базе данных для последующих процессов обработки и анализа данных. Разработанный скрипт также может обнаруживать типы систем управления контентом, платформы электронной коммерции, версии веб-фреймворков, серверное программное обеспечение и аналитические инструменты. Последним этапом является проверка безопасности каждого веб-ресурса по отдельности на базе публичных программных интерфейсов API [4, 5]. В исследовании в качестве открытых баз данных об уязвимостях технологий были использованы общедоступные сервисы <https://vulners.com> и <https://www.cvedetails.com>, которые интегрировались в разрабатываемую систему с помощью API-интерфейса.

Результаты исследования и их обсуждение. На основе полученных данных о версиях технологий была создана диаграмма, показывающая процентное соотношение используемых для разработки веб-ресурсов технологий в семи категориях (рис. 1). Полученные результаты выявили, что наиболее популярными технологиями в своих категориях являются Windows Server – линейка серверных операционных систем от компании Microsoft (37 %), Nginx – веб-сервер и почтовый прокси-сервер (80 %), MooTools – модульный объектно-ориентированный JavaScript-фреймворк для разработки кроссбраузерных веб-приложений (46 %), jQuery – JavaScript-библиотека, фокусирующаяся на взаимодействии JavaScript и HTML (70 %), Google Analytics – сервис для создания детальной статистики посетителей веб-сайтов (44 %), Google AdSense – сервис контекстной рекламы (53 %), WordPress – система управления содержимым сайта с открытым исходным кодом, написанная на ЯП PHP (44 %).

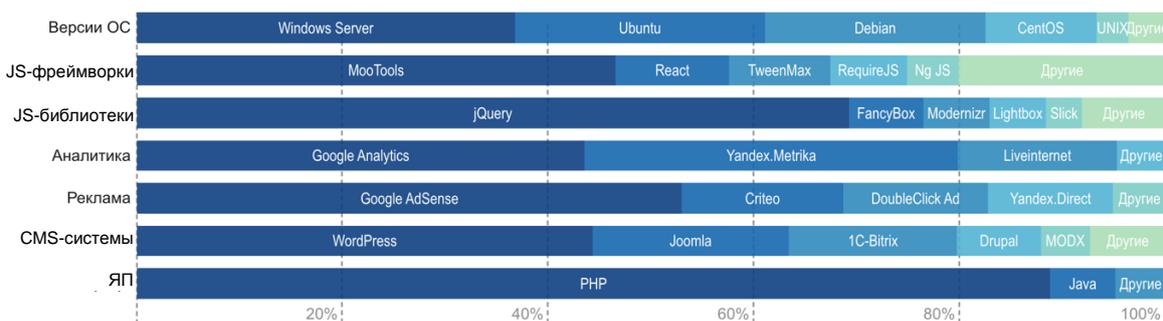


Рис. 1. Процентное соотношение используемых технологий

Данные о географических расположениях серверов, обслуживающих веб-ресурсы из исходной выборки, представлены в виде диаграммы (рис. 2). На горизонтальной оси расположены названия стран, где сосредоточено наибольшее количество веб-серверов: Беларусь, Россия, США, Германия и др. (Нидерланды, Польша, Украина и Великобритания). Каждый столбец показывает количество серверов, которые обслуживают веб-ресурсы определенной категории в той или иной стране. Как видно из рис. 2, примерно 68 % серверов находятся на территории Беларуси. Отметим, что категории веб-сайтов «работа», «бизнес», «новости», «онлайн-магазины», «объявления» являются наиболее популярными.



Рис. 2. Распределение веб-ресурсов по категориям и странам расположения серверов

Процентное соотношение доменов верхнего уровня показано на рис. 3 в виде круговой диаграммы. Данные были получены из исходной выборки веб-ресурсов путем приведения доменных имен к «каноническому» виду. Из рисунка видно, что домены BY составляют примерно 75 % из всех имеющихся записей в базе данных, а домены COM и RU – 8,8 и 8,2 % соответственно. Следует отметить, что все остальные домены (NET, БЕЛ, ORG и др.) были объединены в одну категорию с процентной долей 7,5 %.

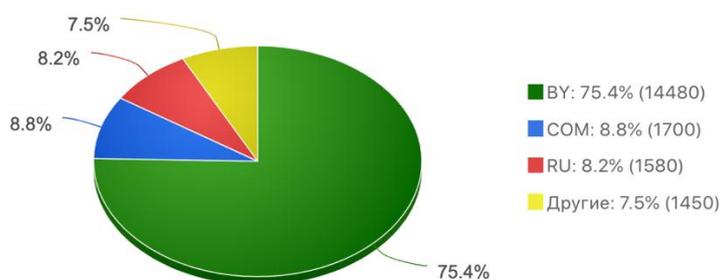


Рис. 3. Процентное соотношение доменов верхнего уровня

Рассмотрим предложенную методику оценки безопасности веб-ресурсов на базе метрики CVSS. Для каждого ресурса из исходной выборки используется усредненная оценка CVSS, рассчитанная по формуле

$$S_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^m A_j\right)}{m}, 1 \leq i \leq n,$$

где n – количество элементов в выборке; m – количество распознанных версий технологий и ЯП для заданного веб-ресурса; A_j – оценка уязвимости определенной версии технологии.

Для вычисления значения A_j была выбрана функция максимума по всем известным оценкам CVSS:

$$A_j = \max_{1 \leq k \leq r} C_k,$$

где r – количество найденных уязвимостей для определенной версии технологии в общедоступной базе <https://vulners.com>. Целесообразность выбора функции максимума объясняется тем, что злоумышленники, как правило, направляют вектор атаки на наиболее уязвимые части системы. Следовательно, имеет смысл включать в общую усредненную оценку системы максимальные значения метрики CVSS по каждой из версий технологий. Для исследования распределения была создана случайная выборка из исходной базы данных веб-ресурсов, состоящая из $N = 2000$ элементов (около 10 % записей). На основе этих данных была построена диаграмма эмпирического распределения усредненной оценки уязвимости S_k веб-ресурсов (рис. 4).

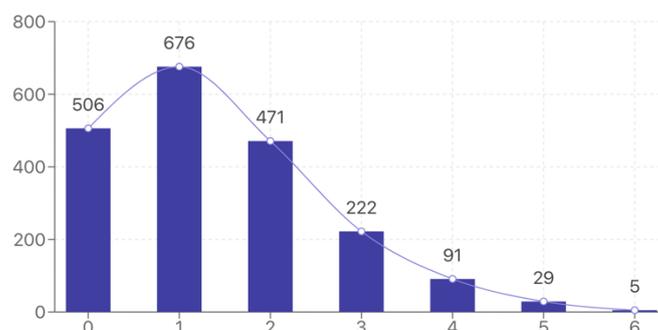


Рис. 4. Диаграмма эмпирического распределения оценок уязвимостей веб-ресурсов

По виду гистограммы распределения можно предположить, что оно подчиняется закону Пуассона. Заметим, что число наблюдений для интервала оценки S_6 равно пяти, поэтому имеет смысл объединить его с предыдущим интервалом S_5 . Далее с помощью критерия хи-квадрат при уровне значимости $\alpha = 0,05$ проверяем гипотезу о том, что случайная величина X (усредненная оценка CVSS уязвимости веб-ресурса) распределена по закону Пуассона. Данное распределение имеет единственный параметр λ , являющийся математическим ожиданием случайной величины X . Заменяем параметр λ наилучшей оценкой по выборке – выборочной средней: $\lambda = \frac{(\sum S_k O_k)}{N} \approx 1,41$.

Проверяем нулевую гипотезу H_0 (средняя оценка уязвимости веб-ресурса распределена по закону Пуассона) при уровне значимости $\alpha = 0,05$, т. е. $p_k = P(X = k) = \frac{(\lambda^k e^{-\lambda})}{k!}$, где $1 \leq k \leq 6$ (максимальное значение усредненной оценки CVSS в рассматриваемой выборке). Находим теоретические вероятности p_k и теоретические частоты $E_k = p_k \times N = p_k \times 2000$, результаты вычислений заносим в таблицу.

Эмпирические и теоретические частоты

k	Оценки CVSS, S_k	Эмпирические частоты, O_k	Теоретические частоты, E_k	$\frac{(O_k - E_k)^2}{E_k}$
1	0	506	488,287	0,643
2	1	676	688,484	0,226
3	2	471	485,381	0,426
4	3	222	228,129	0,165
5	4	91	80,416	1,393
6	5–6	34	22,677	5,654
Σ		2000	1998,695	$\chi^2 = 8,506$

Из расчетной таблицы находим наблюдаемое значение критерия Пирсона: $\chi^2 = \sum \frac{(O_k - E_k)^2}{E_k} \approx 8,5$. Так как новое число интервалов (с учетом объединения) $m = 6$, а закон распределения Пуассона определяется параметром $r = 1$, то число степеней свободы $q = m - r - 1 = 4$. Соответствующее критическое значение статистики χ^2 для уровня значимости 0,05 при количестве степеней свободы $q = 4$ равно 9,5. В связи с тем что наблюдаемое значение критерия 8,5 меньше критического значения 9,5 (по таблице критических значений распределения хи-квадрат), следует принять нулевую гипотезу о распределении генеральной совокупности по закону Пуассона.

Отметим, что в исходной генеральной совокупности почти 90 % веб-ресурсов имеют значение усредненной оценки CVSS в интервале [0, 5]. Было выявлено, что остальные 10 % ресурсов имеют высокую критическую оценку уязвимости из-за использования устаревших версий таких технологий, как CMS WordPress, ЯП PHP, веб-сервер nginx и JavaScript-библиотека jQuery.

Заключение. В работе представлена методика оценки безопасности веб-ресурсов на базе метрики CVSS. Установлено, что около 10 % веб-ресурсов Беларуси из исходной генеральной выборки (19 000 доменов) имеют критическую усредненную оценку уязвимости. На основе полученных данных об уязвимостях построено эмпирическое распределение оценки CVSS. С помощью критерия хи-квадрат проверена гипотеза о том, что данное распределение подчиняется закону Пуассона. В рамках проведенного исследования были также разработаны RegExp-выражения на ЯП JavaScript для точного определения версий технологий, которые были использованы для создания веб-сайтов. Установлены процентные соотношения применяемых технологий, доменов верхнего уровня и географическое расположение серверов, которые обслуживают данные веб-ресурсы.

Список использованных источников

1. Дойникова, Е. В. Оценка защищенности компьютерных сетей на основе метрик CVSS / Е. В. Дойникова, А. А. Чечулин, И. В. Котенко // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 6. – С. 76–87. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.6.76>
2. Li, H. Study on the distribution of CVSS environmental score / H. Li, R. Xi, L. Zhao // 5th Intern. Conf. on Electronics Information and Emergency Communication, Beijing, China, 14–16 May 2015. – Beijing, 2015. – P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICEIEC.2015.7284502>
3. Exploring the intersections of web science and accessibility [Electronic resource] / T. Bostic [et al.] // The MITRE Corporation Scientific Journal. – 2019. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1908.02804>. – Date of access: 12.03.2020.
4. Likarish, P. A targeted web crawling for building malicious javascript collection / P. Likarish, E. Jung // Proc. of the ACM First Intern. Workshop on Data-Intensive Software Management and Mining, Hong Kong, China, Nov. 2009. – Hong Kong, 2009. – P. 23–26. <https://doi.org/10.1145/1651309.165131>
5. A quantitative evaluation model for network security / D. Man [et al.] // Proc. of the 2007 Intern. Conf. on Computational Intelligence and Security, Harbin, China, 15–19 Dec. 2007. – Harbin, 2007. – P. 773–777.

References

1. Dojnikova E. V., Chechulin A. A., Kotenko I. V. Ocenka zashhishennosti komp'yuternyh setej na osnove metrik CVSS [Security assessment of computer networks based on CVSS metrics]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy* [Management Information Systems], 2019, no. 6, pp. 76–87 (in Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.6.76>
2. Li H., Xi R., Zhao L. Study on the distribution of CVSS environmental score. *5th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication, Beijing, China, 14–16 May 2015*. Beijing, 2015, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICEIEC.2015.7284502>
3. Bostic T., Stanley J., Higgins J., Chudnov D., Montgomery B., Brunell J. Exploring the intersections of web science and accessibility. *The MITRE Corporation Scientific Journal*, 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1908.02804> (accessed 12.03.2020).
4. Likarish P., Jung E. A targeted web crawling for building malicious javascript collection. *Proceedings of the ACM First International Workshop on Data-Intensive Software Management and Mining, Hong Kong, China, November 2009*. Hong Kong, 2009, pp. 23–26. <https://doi.org/10.1145/1651309.165131>
5. Man D., Yang W., Yang Y., Wang W., Zhang L. A quantitative evaluation model for network security. *Proceedings of the 2007 International Conference on Computational Intelligence and Security, Harbin, China, 15–19 December 2007*. Harbin, 2007, pp. 773–777.

Информация об авторах

Давлатов Шохрух Рустамович, аспирант кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.
E-mail: shohrukh.92@gmail.com

Кучинский Петр Васильевич, доктор физико-математических наук, директор, научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.

Information about the authors

Shohrukh R. Davlatov, Postgraduate Student of the Department Information Security, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.
E-mail: shohrukh.92@gmail.com

Petr V. Kuchinsky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director, A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus.

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

УДК 004.492.3
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-78-86>

Поступила в редакцию 26.02.2020
Received 26.02.2020

Принята к публикации 25.05.2020
Accepted 25.05.2020

Текстовый анализ DNS-запросов для защиты компьютерных сетей от эксфильтрации данных

Я. В. Бубнов[✉], Н. Н. Иванов

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь
[✉]E-mail: girokompass@gmail.com

Аннотация. Предлагается эффективный способ защиты компьютерных сетей от эксфильтрации данных через систему доменных имен (англ. Domain Name System, DNS), которая представляет собой способ сокрытия передачи конфиденциальной информации удаленному злоумышленнику путем инкапсуляции данных в запрашиваемое доменное имя. Рассматриваются DNS-запросы, в которых передается украденная информация, с зараженного вредоносной программой узла на внешний узел, управляемый злоумышленником. Описывается подход для обнаружения подобных запросов с помощью текстовой классификации доменных имен сверточной нейронной сетью. Эффективность подхода базируется на предположении, что доменные имена, используемые для эксфильтрации данных, отличаются от доменных имен, сформированных из слов естественного языка. Для классификации запросов в сверточной нейронной сети предлагается использовать символьное встраивание с целью представления строки доменного имени. Производится оценка качества распознавания эксфильтрации данных через DNS с помощью ROC-анализа для обученной нейронной сети.

Демонстрируется архитектура программного обеспечения для развертывания обученной нейронной сети в существующую инфраструктуру DNS с целью практической защиты компьютерных сетей от эксфильтрации данных. Архитектура подразумевает формирование зон с политикой ответов для блокировки отдельных запросов, классифицируемых как вредоносные.

Ключевые слова: система доменных имен, защита компьютерных сетей, эксфильтрация данных, текстовая классификация, сверточная нейронная сеть

Для цитирования. Бубнов, Я. В. Текстовый анализ DNS-запросов для защиты компьютерных сетей от эксфильтрации данных / Я. В. Бубнов, Н. Н. Иванов // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 78–86. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-78-86>

Text analysis of DNS queries for data exfiltration protection of computer networks

Yakov V. Bubnov[✉], Nick N. Ivanov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus
[✉]E-mail: girokompass@gmail.com

Abstract. The paper proposes effective method of computer network protection from data exfiltration by the system of domain names. Data exfiltration by Domain Name System (DNS) is an approach to conceal the transfer of confidential data to remote adversary using data encapsulation into the requesting domain name. The DNS requests that transfer stolen information from a host infected by malicious software to an external host controlled by a malefactor are considered. The paper proposes a method of detecting such DNS requests based on text classification of domain names by convolutional neural network. The efficiency of the method is based on assumption that domain names exploited for data exfiltration differ from domain names formed from words of natural language. To classify the requests in convolutional neural network the use of character

embedding for representing the string of a domain name is proposed. Quality evaluation of the trained neural network used for recognition of data exfiltration through domain name system using ROC-analysis is performed.

The paper presents the software architecture used for deployment of trained neural network into existing infrastructure of the domain name system targeting practical computer networks protection from data exfiltration. The architecture implies creation of response policy zones for blocking of individual requests, classified as malicious.

Keywords: domain name system, computer network security, data exfiltration, text classification, convolutional neural network

For citation. Bubnov Ya. V., Ivanov N. N. Text analysis of DNS queries for data exfiltration protection of computer networks. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 78–86 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-78-86>

Введение. Уязвимости инфраструктуры компьютерной сети могут стать фатальной угрозой для конфиденциальной информации организаций, а следовательно, привести к потере конкурентного преимущества из-за кражи секретных документов, утрате доверия пользователей или даже снижению рыночной капитализации компании. Целевые кибератаки действуют на жертву продолжительное время и эксплуатируют подобные уязвимости как для сокрытия проникновения, так и непосредственно для кражи данных. Одним из способов сокрытия кибератаки служит инкапсуляция протоколов различных уровней модели OSI (Open System Interconnection) в доменное имя DNS-запроса. DNS – это фундаментальная система сети Интернет, которая предоставляет сервис получения информации о доменных именах. Наиболее распространенным вариантом использования DNS является получение сетевого адреса узла в компьютерной сети по его доменному имени. Помимо этого, протокол обмена информацией о доменных именах разработан с учетом возможности будущего расширения. Гибкость протокола DNS позволяет встраивать произвольную информацию в качестве доменного имени, из-за чего возникают трудности в различении вредоносных и безопасных запросов.

Методика встраивания произвольной информации в запросы DNS называется DNS-туннелированием, так как подразумевает создание логического соединения между двумя конечными точками сети. Самый распространенный способ передачи информации через DNS-туннель – кодирование данных с помощью алфавитного кодировщика отправляющей стороной в дочерние домены некоторого делегированного домена. Таким образом корпоративный DNS-сервер с включенным механизмом рекурсивной обработки запроса инициирует запрос авторитативному DNS-серверу, который в случае DNS-туннелирования управляется злоумышленником. Благодаря тому, что данный протокол не блокируется межсетевыми экранами, DNS-туннелирование широко используется как для передачи команд управления зараженному узлу, так и для кражи данных.

В последние годы были обнаружены по меньшей мере два вида сетевых червей: *Morto* [1] и *Federbot* [2], применяющих DNS-туннелирование для передачи команд управления зараженным узлом. Вместе с тем специалистами кибербезопасности обнаружено вредоносное программное обеспечение *BernhardPOS* [3] и *FrameworkPOS* (URL: <https://www.gdatasoftware.com/blog/2014/10/23942-new-frameworkpos-variant-exfiltrates-data-via-dns-requests>), использующее DNS-туннелирование для кражи информации о кредитных картах с платежных терминалов.

Таким образом, под термином «экспертиза данных» в широком смысле понимается неавторизованная передача произвольной информации, которая рассматривается как форма кражи данных. В статье рассматривается экспертиза данных в узком смысле, т. е. злонамеренная кража корпоративных секретов, интеллектуальной собственности и других ценных для владельца данных с помощью техники DNS-туннелирования. Для решения проблемы экспертизы данных с помощью протокола DNS предлагается метод, основанный на использовании бинарного классификатора. Бинарная классификация представляет собой метод разделения множества, в данном контексте множества DNS-запросов, на два класса: безопасные и небезопасные DNS-запросы. Класс небезопасных DNS-запросов состоит из запросов, используемых при туннелировании системы доменных имен, все остальные запросы относятся к безопасным.

Предлагаемый классификатор представляет собой сверточную нейронную сеть, обученную на доменных именах из репозитория OpenDNS и доменных именах, используемых при DNS-туннелировании [4]. Эффективность предлагаемого в статье подхода основана на предположении, что безопасные доменные имена представляют подмножество слов естественного языка, в то время как доменные имена, используемые для DNS-туннелирования, таким свойством не обладают.

Существующие методы обнаружения эксфильтрации данных. В работах [5, 6] рассматривается метод обнаружения DNS-туннелей, основанный на частотном анализе биграмм доменного имени, и выдвигается гипотеза, что безопасные доменные имена распределены в соответствии с законом Ципфа, в то время как доменные имена, используемые для туннелирования, соответствуют равномерному распределению. Исходя из этого предположения предлагается оценивать каждое доменное имя по частоте встречаемости биграмм в естественном языке. Для этого применяется предварительно рассчитанная частотная таблица биграмм, на основании которой оценивается каждое доменное имя. Если оценка не превышает некоторый заданный порог, алгоритм относит доменное имя к классу небезопасных имен. Данный подход позволил авторам добиться точности детектирования DNS-туннелей, равной 98,74 %. Несмотря на высокую точность результатов, этот подход обладает рядом недостатков. Во-первых, существует необходимость построения таблицы частот биграмм для каждого естественного языка, что на практике невыполнимо. Во-вторых, анализ производился исключительно на доменных именах, созданных программой туннелирования DNSCat, которая является одной из многих открытых программ для установления DNS-туннелей.

Альтернативный способ обнаружения DNS-туннелирования базируется на гипотезе, что статистические характеристики некоторых численных параметров DNS-запросов при туннелировании отличаются от соответствующих характеристик безопасных запросов. Например, А. Надлер и др. в работе [7] и независимо А. Берг и Д. Форсберг в работе [8] рассматривают энтропию доменного имени, объем трафика к домену, соотношение длины доменного имени к субдомену и иные параметры. Авторы предлагают применять алгоритм изолирующего леса (isolation forest) для поиска аномалий, а также подчеркивают эффективность данного метода обнаружения DNS-туннелирования и высокую точность классификации. Однако проблема такого подхода состоит в его прикладном использовании. Так, в случае применения подобного детектора провайдером DNS, предоставляющим услуги разыменования доменных имен, для вычисления суммарного трафика к вредоносному домену необходим сбор параметров со всех резольверов DNS. Для этого требуется хранение распределенной таблицы частот обращений, что не всегда выполнимо на практике ввиду инженерной сложности задачи и финансовой стоимости обслуживания такой инфраструктуры.

Среди прикладных способов обнаружения эксфильтрации данных через DNS-туннелирование выделяют анализ длины доменного имени [9]. Автор публикации подчеркивает, что длина субдомена в реальности редко превышает 30 символов, а значит, можно установить соответствующие правила для блокировки запросов, превышающих заданный порог. В действительности программы для создания IPv4-туннелей через DNS, например Iodine, позволяют установить значение максимальной единицы передачи (англ. Maximum Transmission Unit, MTU) и тем самым с легкостью обойти подобные ограничения, а учитывая, что DNS-туннель всегда двухточечный, можно полностью избавиться от накладных расходов заголовка IPv4, составляющего 20 байтов, и передавать данные напрямую.

Сверточная нейронная сеть для классификации DNS-запросов. Сформулируем задачу обнаружения DNS-туннеля следующим образом: пусть $\mathbf{X} = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ – запрашиваемое доменное имя, с которым ассоциирована метка $y \in Y$ с вероятностью p_y . Тогда стоит задача нахождения функции

$$y: \mathbf{X} \rightarrow Y. \quad (1)$$

Пусть дан алфавит символов \mathbf{A} , из которого состоит доменное имя, такое, что $x_i \in \mathbf{A}$, а само доменное имя представляет собой подмножество размещений алфавита $\mathbf{X} \subset \mathbf{A}^k$, где $k = |\mathbf{X}| = 256$ – максимальная длина доменного имени, установленного в спецификации прото-

кола DNS [10]. Таким образом, необходимо решить задачу отнесения слов некоторого заданного алфавита к одному из классов множества Y .

Для поиска функции y воспользуемся методом, предложенным в работе [11], где в качестве классификатора используется сверточная нейронная сеть.

Так как входы нейронной сети представляют собой вектор действительных чисел, требуется определить отображение символьного множества \mathbf{X} в пространство \mathbf{R}^k . Для этого применим модифицированный механизм встраивания слов (англ. word embedding), предложенный в статье [12], где вместо словаря слов используется алфавит символов. Пусть дана функция I , которая ставит каждому элементу из \mathbf{A} в соответствие некоторый индекс. Тогда встраивание – это преобразование вектора символов в вектор целых чисел, где каждому символу в соответствие поставлен индекс из алфавита \mathbf{A} :

$$I: \mathbf{A} \rightarrow \{0, \dots, |\mathbf{A}|\}, \text{cemb}(\mathbf{X}) = I^{-1}(\mathbf{X}) = \mathbf{E}. \quad (2)$$

Очевидно, что полученный массив \mathbf{E} будет разреженным, так как длина большинства доменных имен редко составляет 256 символов. Чтобы сократить количество нулевых элементов в \mathbf{E} , воспользуемся методикой встраивания из работы [13]:

$$E_{k \rightarrow k/2}: \mathbf{R}^k \rightarrow \mathbf{R}^{k/2}, \mathbf{Q} = E_{k \rightarrow k/2}(\mathbf{E}). \quad (3)$$

После уменьшения размерности входного вектора применим сверточную фильтрацию

$$\text{conv1d}(\mathbf{Q}; \mathbf{H}, w) = \langle \mathbf{Q}_{i:i+w}, \mathbf{H} \rangle, \mathbf{h}_i = \text{conv1d}(\mathbf{Q}; \mathbf{H}, w) + b, \quad (4)$$

где \mathbf{H} – ядро свертки, w – размер ядра свертки, \mathbf{Q} – встраивание символьного представления доменного имени $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^{k/2}$ в пространство действительных чисел размерности $k/2$. Для простоты дальнейшего изложения обозначим функцию активации сверточного слоя i равенством

$$a_{\text{conv1d}}(\mathbf{h}^{(i)}) = \tanh(\mathbf{h}^{(i)}). \quad (5)$$

За каждым сверточным слоем расположим слой субдискретизации, позволяющий существенно снизить пространственный объем числового представления доменного имени путем выбора построчного максимального значения из предыдущего сверточного слоя:

$$a_{\text{max pool}}(\mathbf{z}^{(i)}) = \max(\mathbf{z}^{(i)}), \quad (6)$$

где $\mathbf{z}^{(i)} = \mathbf{W}^{(i)}\mathbf{x}^{(i)} + \mathbf{b}^{(i)}$. Идея заключается в том, что на сверточном слое уже выявлены некоторые признаки, характеризующие доменное имя, поэтому подробная детализация и дальнейшая обработка большого объема данных не представляются необходимыми.

Дополнительно определим слой, используемый для самонормализации сверточной сети [14]:

$$\text{selu}(x; \alpha) = \lambda \begin{cases} x, & x > 0; \\ \alpha e^x - \alpha, & x \leq 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$a_{\text{selu}}(\mathbf{z}^{(i)}) = \text{selu}(\mathbf{z}^{(i)}).$$

Описанный подход позволяет простым способом добиться нормализации выходов сверточного слоя нейронной сети, т. е. сохранения математического ожидания и дисперсии выходов слоя в заданном диапазоне значений.

Определим механизм регуляризации скрытых слоев нейронной сети с помощью оператора прореживания. Пусть R – случайная дискретная величина, принимающая значения из множества $\{0,1\}$, а p – наперед заданная константа, лежащая в диапазоне $[0,1]$. Тогда закон распределения случайной величины R имеет вид

$$F_R = \begin{cases} p, & R=1; \\ 1-p, & R=0, \end{cases} \quad (8)$$

а функция прореживания определяется выражением

$$\mathbf{d} = \mathbf{J}_{1,n} * \mathbf{r}_p, \quad D_p(\mathbf{Z}) = \mathbf{Z} * \mathbf{d}^T, \quad (9)$$

где $\mathbf{r}_p \in \mathbf{R}^n$ – вектор случайных величин, \mathbf{J} – вектор единиц, $*$ – произведение Адамара.

Так как задача нейронной сети задействована в определении вероятностей отнесения доменного имени к каждому классу из Y , требуется, чтобы сумма всех вероятностей составляла единицу. Данное требование выполняется при применении функции softmax к выходному слою сети:

$$\text{softmax}(\mathbf{x})_i = \frac{e^{x_i}}{\sum_{j=1}^{|\mathbf{x}|} e^{x_j}}, \quad a^{(i)}_{\text{softmax}} = \text{softmax}(\mathbf{z}^{(i)}). \quad (10)$$

Следовательно, архитектура нейронной сети, используемой для классификации символьной строки доменного имени, представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}^{(1)} &= E_{k \rightarrow k/2}(\mathbf{E}), \quad \mathbf{h}^{(2)} = [a_{\text{conv1d}(\mathbf{Q};\mathbf{H},10)} \circ a_{\text{max pool}}](\mathbf{h}^{(1)}), \\ \mathbf{h}^{(3)} &= [a_{\text{conv1d}(\mathbf{Q};\mathbf{H},7)} \circ a_{\text{max pool}}](\mathbf{h}^{(2)}), \quad \mathbf{h}^{(4)} = [a_{\text{conv1d}(\mathbf{Q};\mathbf{H},5)} \circ a_{\text{max pool}}](\mathbf{h}^{(3)}), \\ \mathbf{h}^{(5)} &= [a_{\text{conv1d}(\mathbf{Q};\mathbf{H},3)} \circ a_{\text{max pool}}](\mathbf{h}^{(4)}), \quad \mathbf{z}^{(6)} = a_{\text{selu}}(\mathbf{h}^{(5)}), \\ \mathbf{z}^{(7)} &= D_{0,1}(\mathbf{z}^{(6)}), \quad \hat{y}(\mathbf{E}) = a_{\text{softmax}}(\mathbf{h}^{(5)} * \mathbf{z}^{(6)} * \mathbf{z}^{(7)}). \end{aligned} \quad (11)$$

Отметим, что классификатор \hat{y} определен относительно встраивания символьного представления \mathbf{E} вместо доменного имени \mathbf{X} . Приведем конечный вид классификатора:

$$y^* = \hat{y}(\text{cemb}(\mathbf{X})). \quad (12)$$

Для обучения предложенной нейронной сети в качестве функции потерь будем использовать перекрестную энтропию, а в качестве алгоритма оптимизации – adam [15], базирующийся на вычислении градиента, так как сходимость данного алгоритма по сравнению с классическим алгоритмом стохастического градиентного спуска выше.

Оценка результатов обучения сверточной нейронной сети. Для обучения нейронной сети применялся эталонный набор [5], состоящий как из доменных имен распространенных сервисов сети Интернет, так и из доменных имен, созданных наиболее известными программами для DNS-туннелирования: tuns, iodine и т. д. Каждому доменному имени поставлена в соответствие метка класса, к которому оно относится (безопасное или небезопасное DNS-имя). Эталонный набор разбит на два непересекающихся подмножества: обучающее и валидационное. Обучающий набор используется непосредственно для процесса поиска искомой функции, а валидационный набор – для предотвращения переобучения и обеспечения высокой обобщающей способности нейронной сети. Распределение примеров в каждом наборе по классам неравномерно и находится в соотношении 1:3 (рис. 1).

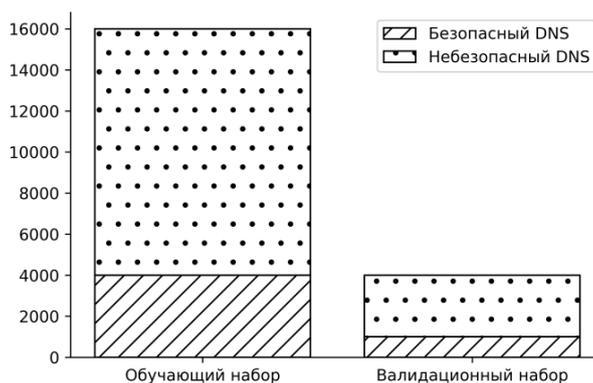


Рис. 1. Распределение классов в обучающем и валидационном наборах

Непосредственно обучение нейронной сети ограничено 10 итерациями, где на каждой итерации производится корректировка весов нейронной сети по всему обучающему набору данных. Ограничение по итерациям также является механизмом регуляризации. График изменения значения функции потерь после каждой итерации представлен на рис. 2. Он демонстрирует необходимость использования валидационного набора для корректировки весов скрытых слоев нейронной сети. Несмотря на то что ошибка обучения уже на второй итерации практически сравнялась с нулем для обучающего набора, ошибка обучения на валидационном наборе возрастает вплоть до третьей итерации. Данные наблюдения свидетельствуют о необходимости использования двух наборов с целью предотвращения переобучения нейронной сети.

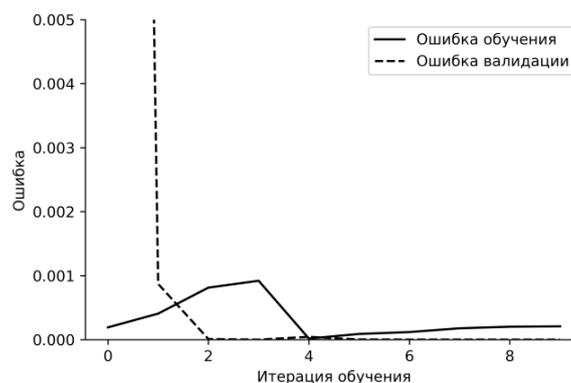


Рис. 2. Изменение функции потерь на этапах обучения и валидации в зависимости от количества итераций обучения нейронной сети

Для оценки точности классификации использовались ROC-кривые, показывающие зависимость между ложно- и истинно положительными результатами нейронной сети. На рис. 3 AUC (area under ROC curve) – это площадь под ROC-кривой, представляющая собой количественную характеристику качества классификации модели. Чем выше AUC, тем качественнее классификатор. Также на рис. 3 диагональной штриховой линией изображен график модели, для которой классификация является процессом случайного гадания, т. е. событие отнесения DNS-запроса к одному из классов равновероятно. Близость к этому графику говорит о непригодности метода для классификации. Максимально возможная удаленность ROC-кривой нейросетевой модели от графика гадания демонстрирует высокое качество классификации DNS-запросов.

На рис. 3 видно, что точность модели близка к идеальной. Это подтверждает начальную гипотезу об отличии доменных имен, применяемых в туннелировании, от слов естественного языка, образующих безопасные доменные имена. В противном случае обученная модель не смогла бы различить доменные имена разных классов.

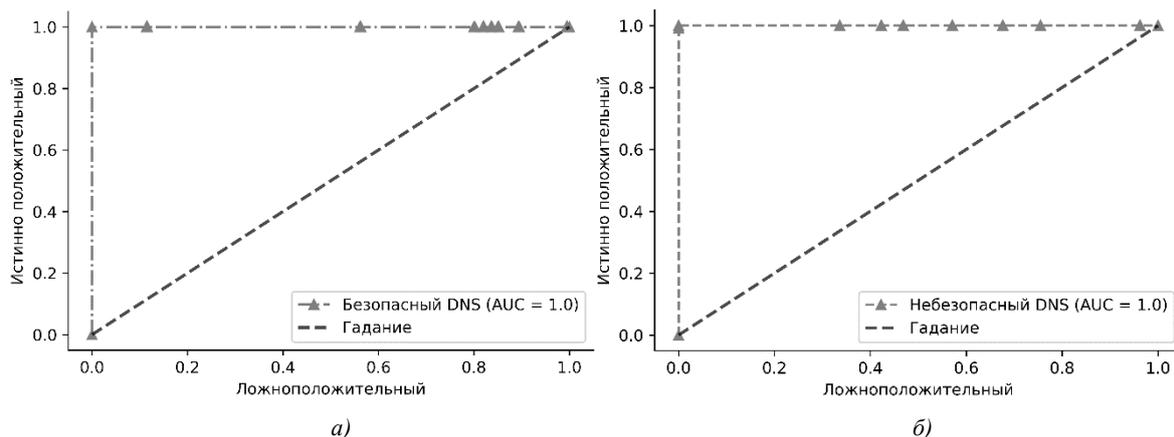


Рис. 3. ROC-кривые классификации DNS-запросов с помощью обученной нейронной сети:
 а) кривая, соответствующая безопасным DNS-запросам; б) небезопасным DNS-запросам

Дополнительно стоит отметить, что полученные высокие результаты могут быть связаны с отсутствием в тестовом наборе доменных имен, используемых в сетях дистрибуции содержимого (content delivery network). Доменные имена в таких сетях генерируются и, как правило, также отличаются от слов естественного языка [16].

Практическое использование для защиты компьютерных сетей. Защита компьютерной сети от эксфильтрации данных состоит в блокировке DNS-запросов, организованных для скрытой передачи информации. Разработанный классификатор позволяет определить, к какому классу относится доменное имя в анализируемом запросе, и, таким образом, принять решение о блокировке DNS-запроса.

На практике блокировка доменных имен осуществляется с помощью зон с политикой ответов (англ. Response Policy Zone, RPZ). Такие зоны либо конфигурируются вручную, если требуется ограничить доступ передаваемых запросов, либо определяются динамически, если список запрещенных зон заранее неизвестен.

Исходя из этих условий, разработан модуль (URL: <https://github.com/netrack/dnstun>) для CoreDNS – одного из популярных DNS-серверов, используемых как в облачных инфраструктурах (например, Kubernetes), так и в виде самостоятельного сервера. Модуль организует процесс разыменования доменного имени с дополнительным анализом на наличие туннелирования (рис. 4).

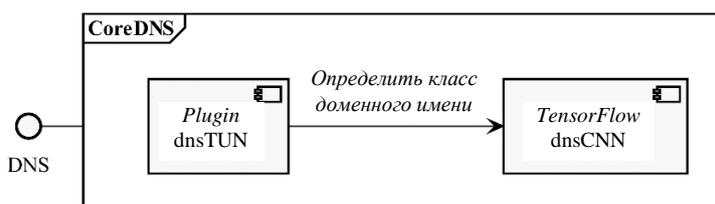


Рис. 4. Архитектура DNS-сервера CoreDNS с функцией защиты от DNS-туннелирования

На рис. 4 показаны два компонента: dnsTUN, отвечающий за создание встраивания символического представления доменных имен, и dnsCNN, осуществляющий классификацию представлений. Классификатор использует TensorFlow в качестве среды для выполнения вычислительного графа обученной сверточной нейронной сети.

Заключение. Метод обнаружения DNS-туннелирования с помощью текстового анализа доменных имен обладает преимуществом перед статистическими методами, так как не требует полного анализа содержимого запроса DNS, включая анализ различных временных характеристик, а также времени для накопления исторических данных о конкретной компьютерной сети. Дополнительно текстовый анализ доменных имен демонстрирует преимущество перед анализом биграмм, так как не использует построение таблицы частот для каждого естественного

языка. Описанный метод позволяет осуществлять фоновое обучение детектора и прозрачный перенос в случае изменения конфигурации компьютерной сети.

В настоящей статье сделан только шаг к решению проблемы защиты компьютерных сетей от эксфильтрации данных. Поэтому дальнейшая работа будет направлена на анализ доменных имен из CDN-сетей и поиск эффективных способов практического использования разработанного детектора в реальных сетях.

Список использованных источников

1. Zhong, X. Stealthy malware traffic – not as innocent as it looks / X. Zhong, Y. Fu, R. Brooks // *Malicious and Unwanted Software (MALWARE) : 10th Intern. Conf., Fajardo, 20–22 Oct. 2015.* – Fajardo, 2015. – P. 110–116.
2. On botnets that use DNS for command and control / C. Deitrich [et al.] // *Computer Network Defense : 7th European Conf. on Computer Network Defense, Gotheburg, 6–7 Sept. 2011.* – Gotheburg, 2011. – P. 9–16.
3. Valenzuela, I. Game changer: identifying and defending against data exfiltration attempts [Electronic resource] // *SANS Cyber Security Summit Archive.* – 2015. – Mode of access: <https://www.sans.org/cyber-security-summit/archives/file/summit-archive-1493840468.pdf>. – Date of access: 15.02.2020.
4. Bubnov, Y. DNS tunneling queries for binary classification [Electronic resource] / Y. Bubnov // *Mendeley Data.* – N. Y., 2019. – Vol. 1. – Mode of access: <https://data.mendeley.com/datasets/mzn9hvdxcg/1>. – Date of access: 15.02.2020.
5. A bigram based real time DNS tunnel detection approach / C. Qi [et al.] // *Procedia Computer Science.* – 2013. – Vol. 17. – P. 852–860.
6. Born, K. Detecting DNS tunneling using character frequency analysis / K. Born, D. Gustafson // *Proc. of the 9th Annual Security Conf., Las Vegas, 7–8 Apr. 2010.* – Las Vegas, 2010. – P. 2–3.
7. Nadler, A. Detection of malicious and low throughput data exfiltration over the DNS protocol / A. Nadler, A. Aminov, A. Shabtai. – 2018. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1709.08395>. – Date of access: 15.02.2020.
8. Berg, A. Identifying DNS-tunneled Traffic with Predictive Models [Electronic resource] / A. Berg, D. Forsberg. – 2019. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1906.11246>. – Date of access: 12.01.2020.
9. Лукацкий, А. Об утечках через DNS, которые не ловит ни одна DLP [Электронный ресурс] / А. Лукацкий // *Бизнес без опасности.* – 2018. – Режим доступа: https://www.securitylab.ru/blog/personal/Business_without_danger/343229.php. – Дата доступа: 07.05.2020.
10. Mockapetris, P. Domain names – implementation and specification [Electronic resource] / P. Mockapetris // *Internet Standard, ISI.* – 1987. – Mode of access: <https://tools.ietf.org/html/rfc1035>. – Date of access: 15.02.2020.
11. Character-aware Neural Language Models [Electronic resource] / Y. Kim [et al.]. – 2016. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1508.06615>. – Date of access: 12.01.2020.
12. Watson, D. Utilizing Character and Word Embedding for Text Normalization with Sequence-to-Sequence Models [Electronic resource] / D. Watson, N. Zalmout, N. Habash. – 2019. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1809.01534>. – Date of access: 12.01.2020.
13. Gal, Y. A Theoretically Grounded Application of Dropout in Recurrent Neural Networks [Electronic resource] / Y. Gal, Z. Ghahraamni. – 2016. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1512.05287>. – Date of access: 12.01.2020.
14. Self-normalizing Neural Networks [Electronic resource] / G. Klambauer [et al.] – 2017. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1706.02515>. – Date of access: 12.01.2020.
15. Kingma, D. Adam: a method for stochastic optimization / D. Kingma, J. Ba // *3rd Intern. Conf. for Learning Representations, San Diego, 7–9 May 2015.* – San Diego, 2015. – 15 p.
16. Nygren, E. The Akami network: a platform for high-performance internet applications / E. Nygren, R. Sitaraman, J. Sun // *ACM SIGOPS Operating Systems Review.* – 2010. – Vol. 44, iss. 3. – P. 2–19.

References

1. Zhong X., Fu Y., Brooks R. Stealthy malware traffic – not as innocent as it looks. *Malicious and Unwanted Software (MALWARE) : 10th International Conference, Fajardo, 20–22 October 2015.* Fajardo, 2015, pp. 110–116.
2. Deitrich C., Rossow C., Freiling F., Bos H., van Steen M., Pohlman N. On botnets that use DNS for command and control. *Computer Network Defense : 7th European Conference on Computer Network Defense, Gotheburg, 6–7 September 2011.* Gotheburg, 2011, pp. 9–16.

3. Valenzuela I. Game changer: identifying and defending against data exfiltration attempts. *SANS Cyber Security Summit Archive*, 2015. Available at: <https://www.sans.org/cyber-security-summit/archives/file/summit-archive-1493840468.pdf> (accessed 15.02.2020).
4. Bubnov Y. DNS tunneling queries for binary classification. *Mendeley Data*. N. Y., 2019, vol. 1. Available at: <https://data.mendeley.com/datasets/mzn9hvdcxg/1> (accessed 15.02.2020).
5. Qi C., Chen X., Xu C., Shi J., Liu P. A bigram based real time DNS tunnel detection approach. *Procedia Computer Science*, 2013, vol. 17, pp. 852–860.
6. Born K., Gustafson D. Detecting DNS tunneling using character frequency analysis. *Proceedings of the 9th Annual Security Conference, Las Vegas, 7–8 April 2010*. Las Vegas, 2010, pp. 2–3.
7. Nadler A., Aminov A., Shabtai A. *Detection of Malicious and Low Throughput Data Exfiltration over the DNS Protocol*, 2018. Available at: <https://arxiv.org/abs/1709.08395> (accessed 15.02.2020).
8. Berg A., Forsberg D. *Identifying DNS-tunneled Traffic with Predictive Models*, 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1906.11246> (accessed 12.01.2020).
9. Lukatski A. Ob utechkah cherez DNS, kotorye ne lovit ni odna DLP [About leaks through DNS, which are not captured by any DLP]. *Biznes bez opasnosti [Business without Danger]*, 2018. Available at: https://www.securitylab.ru/blog/personal/Business_without_danger/343229.php. (accessed 07.05.2020).
10. Mockapetris P. Domain names – implementation and specification. *Internet Standard, ISI*, 1987. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc1035> (accessed 15.02.2020).
11. Kim Y., Jernite Y., Sontag D., Rush A. *Character-aware Neural Language Models*, 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1508.06615> (accessed 12.01.2020).
12. Watson D., Zalmout N., Habash N. *Utilizing Character and Word Embedding for Text Normalization with Sequence-to-Sequence Models*, 2019. Available at: <https://arxiv.org/abs/1809.01534> (accessed 12.01.2020).
13. Gal Y., Ghahraamni Z. *A Theoretically Grounded Application of Dropout in Recurrent Neural Networks*, 2016. Available at: <https://arxiv.org/abs/1512.05287> (accessed 12.01.2020).
14. Klambauer G., Unterthiner T., Mayr A., Hochreiter S. *Self-normalizing Neural Networks*, 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1706.02515> (accessed 12.01.2020).
15. Kingma D., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization. *3rd International Conference for Learning Representations, San Diego, 7–9 May 2015*. San Diego, 2015, 15 p.
16. Nygren E., Sitaraman R., Sun J. The Akami network: a platform for high-performance internet applications. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*. 2010, vol. 44, iss. 3, pp. 2–19.

Информация об авторах

Бубнов Яков Васильевич, магистр технических наук, аспирант кафедры электронных вычислительных машин, факультет компьютерных систем и сетей, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.
E-mail: girokompass@gmail.com

Иванов Николай Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электронных вычислительных машин, факультет компьютерных систем и сетей, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь.
E-mail: ivanovnn@gmail.com

Information about the authors

Yakov V. Bubnov, M. Sci. (Eng.), Postgraduate Student of Department of Electronic Computing Machines, Faculty of Computer Systems and Networks, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.
E-mail: girokompass@gmail.com

Nick N. Ivanov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of Department of Electronic Computing Machines, Faculty of Computer Systems and Networks, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus.
E-mail: ivanovnn@gmail.com

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION TECHNOLOGY

УДК 20.15.05
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-87-94>

Поступила в редакцию 07.02.2019
Received 07.02.2019

Принята к публикации 20.05.2020
Accepted 20.05.2020

О количественных характеристиках информационных ресурсов

Л. И. Точицкий

*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
E-mail: Leonard.Tochicki@tut.by*

Аннотация. Предлагаются количественные характеристики информационных ресурсов автоматизированных информационных систем (АИС). Рассматриваются сущности, представляемые в АИС отображением информационного объекта, и их составные части (информационная единица, информационный элемент). Обосновывается состав информационного пространства такой системы, которое представляет собой всю обрабатываемую в ней информацию, вспомогательные информационные средства информационных ресурсов и сведения о системе и ее пользователях. Применение количественных значений к характеристикам информационных ресурсов создаваемых систем, учитывающих смысловые свойства отображаемых в АИС информационных объектов, позволит повысить качество проектных решений по АИС и их эксплуатационные показатели на стадиях создания и эксплуатации в течение жизненного цикла.

Ключевые слова: информационный ресурс, информационный объект, отображение информационного объекта, информационная единица, информационный элемент, информационное пространство системы

Для цитирования. Точицкий Л. И. О количественных характеристиках информационных ресурсов / Л. И. Точицкий // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 87–94. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-87-94>

On quantitative characteristics of information resources

Leonard I. Tochicki

*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
E-mail: Leonard.Tochicki@tut.by*

Abstract. The quantitative characteristics of information resources for automated information systems (AIS) are proposed in the paper. The entities represented in the AIS by the information object mappings and their components (information unit and information element) are considered. The composition of the system information space is substantiated, which represents the whole amount of information being processed in the system, auxiliary information resources and all data of the system and its users. Application of the quantitative values to AIS information resources characteristics, taking into account the sense properties of information objects being mapped in AIS, will make it possible to raise the design decision making quality of AIS and its performance within the lifecycle.

Keywords: information resource, information object, representation of information object, information unit, information element, information space of the system

For citation. Tochicki L. I. On quantitative characteristics of information resources. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 87–94 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-87-94>

Введение. Оценка эффективности функционирования АИС сложна, так как количество характеристик (параметров), определяющих качество ее функционирования, весьма велико. Показатели эффективности функционирования АИС в значительной степени зависят от характеристик ее информационных ресурсов (ИР). В настоящее время используется так называемая объемная система характеристик ИР АИС – объем памяти, занятой и зарезервированной для ИР на серверах АИС.

В статье рассматриваются основные положения о количественных характеристиках ИР, применение которых позволит повысить обоснованность проектных решений по их конфигурации в течение жизненного цикла АИС.

Парадоксальным свойством ИР, которые представляют собой организованную совокупность документированной информации, включающей базы данных, или совокупность взаимосвязанной информации в информационных системах [1], является присущее им увеличение объемов на протяжении всего времени использования в отличие от природных, материальных, трудовых, финансовых и других видов ресурсов, объемы которых уменьшаются по мере их потребления.

В течение жизненного цикла информации некоторая ее часть теряет смысл и становится неактуальной. Однако есть определенная часть информации, которая содержит документированные результаты научно-технической, общественно-политической, исторической и культурной деятельности. Поэтому жизненный цикл этой информации не имеет конечного срока хранения и, соответственно, ИР, где размещаются такие сведения, должны функционировать постоянно.

Общеизвестные виды размещаемой на ИР информации:

- текстовая (буквенная; числовая, отображающая количественную меру сущностей) и символьная специальная (символы математические, технические и т. п.);
- графическая (картины (рисунки), графики, чертежи, схемы и графические изображения);
- звуковая (речевая, музыкальная, сигнальная);
- видеoinформация (мультимедийная);
- комбинированная (объединяющая несколько видов информации).

Применение количественных значений к характеристикам ИР. Характеристики ИР определяются назначением АИС и алгоритмами выполняемых на ее ресурсах процессов. На стадии эксплуатации назначение АИС может изменяться (могут расширяться виды работ и т. п.), соответственно, будут меняться и требования к ИР.

Для описания объектов ИР предлагается использовать следующие понятия.

Информационный объект (ИО) – сущность внешней среды, рассматриваемая и используемая в информационной системе. Внешней средой системы (ИР) являются объекты, не принадлежащие ей, но оказывающие на нее влияние и воспринимающие от нее воздействия.

В ГОСТ 33707-2016 дается и другое определение: «Информационный объект: Совокупность данных и программного кода, обладающая свойствами (атрибутами) и методами, позволяющими определенным образом обрабатывать данные. Самостоятельная единица применения и хранения в интеллектуальной информационной системе (ИИС)» (URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200139532>). Это определение является частным, так как не всегда в ИО имеются в наличии методы, позволяющие обусловленным образом обрабатывать данные.

Содержанием ИР являются отображения ИО ($O_{ИО}$). В ИР хранятся первичные и реплицированные (вторичные) $O_{ИО}$.

Количество первичных $O_{ИО}$ ($O_{ИО\text{ перв}}$), размещаемых на ИР АИС и занесенных в реестр ИР, определяется выражением

$$| O_{ИО\text{ перв. АИС}} | = N, \quad (1)$$

где $| O_{ИО\text{ перв. АИС}} |$ – количество элементов конечного множества $O_{ИО\text{ перв. АИС}}$; N – количество $O_{ИО\text{ перв}}$, представленных в ИР.

Количество вторичных $O_{ИО}$ ($O_{ИО\text{ вт}}$), которые являются также составной частью ИР АИС, определяется стратегией управления конфигурацией ИР, точками ввода запросов информации пользователями и ее вывода и местами размещения используемых приложений.

Информационная единица (ИЕ) – запись, непосредственно представляющая описание ИО или его части и содержащая логически законченную информацию.

$O_{ИО}$ могут быть простыми, содержащими одну ИЕ, и составными, содержащими две и более ИЕ. Состав ИР АИС с помощью термина «информационная единица» $O_{ИО}$ предлагается определять как сумму первичных и реплицированных ИЕ. $O_{ИО}$ представлено в ИР совокупностью ИЕ, которая устанавливает различные аспекты отображаемого ИО:

$$\sum_1^n ИЕ_{O_{ИО}} \subseteq O_{ИО}, \quad (2)$$

где n – количество $ИЕ_{O_{ИО}}$ в $O_{ИО}$, \subseteq – функция принадлежности подмножества (объединения элементов в одно целое).

Состав ИР ($C_{ИР\ АИС}$), образованный первичными ИЕ, представим выражением

$$C_{ИР\ АИС} = \sum_1^n ИЕ_{O_{ИО1}} + \sum_1^n ИЕ_{O_{ИОi}} + \sum_1^n ИЕ_{O_{ИОn}}, \quad (3)$$

где $ИЕ_{O_{ИО}}$ – ИЕ соответствующего $O_{ИО}$, n – количество ИЕ в соответствующем $O_{ИО}$.

ИЕ в ИР предлагается определять следующими свойствами: идентификатором, параметрами связанности с другими ИЕ, семантическими характеристиками, правилами доступа и изменения.

Идентификатор ИЕ – уникальная последовательность символов (знаков), присваиваемая ИЕ, которая формируется по обусловленным правилам. Он является одной из информационно-поисковых характеристик ИЕ и однозначно определяет ее в системе. Параметры связанности ИЕ с другими единицами устанавливают виды ее связей (представление составной части ИО, общей темы, общей первопричины формирования и т. д.). Семантическая характеристика описывает смысловое содержание ИЕ. Правила доступа и изменения обозначают права пользователя на доступ к ИЕ, ее изменения, а также порядок работы с ИЕ. В свою очередь, ИЕ может содержать один или более информационных элементов.

Информационный элемент (ИЭ) – единица информации, подлежащей обработке, хранению и предоставлению пользователю ИР [2]:

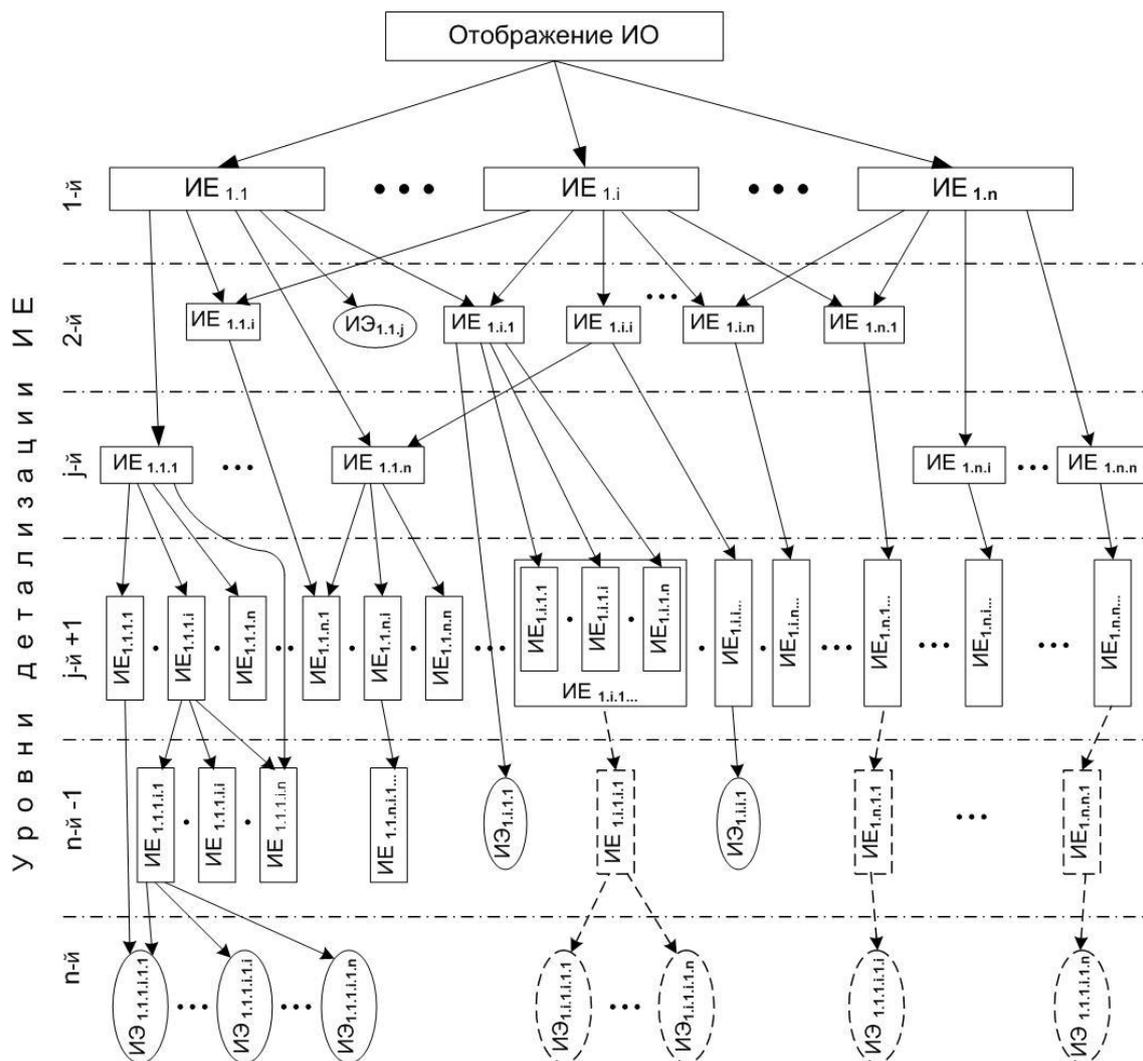
$$ИЕ_{O_{ИО}} = \sum_1^n ИЭ_{ИЕ}, \quad (4)$$

где $ИЭ_{ИЕ}$ – информационный элемент ИЕ; n – количество ИЭ, составляющих $ИЕ_{O_{ИО}}$.

ИЭ является неделимой структурной частью ИЕ. Существует и другое определение данного термина: «Информационный элемент – наименьшая, логическая неделимая часть данных, допускающая независимое обращение в процессе обработки данных» [3].

На рис. 1 показано, что количество характеристик и уровней детализации $O_{ИО}$ может быть различным, а $ИЕ_{ИО}$ и $ИЭ_{ИЕ}$ одного уровня могут быть присущи нескольким $ИЕ_{ИО}$ и $ИЭ_{ИЕ}$ вышележащих уровней.

Таким образом, в базах данных достаточно размещать один экземпляр конкретных $ИЕ_{ИО}$ и $ИЭ_{ИЕ}$ с указанием их связей с характеристиками не только одного конкретного $O_{ИО}$, но и всех других. Это позволит более рационально использовать ресурсы технических средств хранения и уменьшить время формирования предоставляемой пользователю информации. Весь ИР АИС предлагается представлять в виде информационного пространства системы.

Рис. 1. Пример структуры О_{ИО}

Информационное пространство системы (пространство ИР) представляет собой всю обрабатываемую в системе информацию, вспомогательные информационные средства системы (словари, справочники, классификаторы) и сведения о системе и ее пользователях (рис. 2).

Учитывая состав функций, которые выполняются в АИС и используют О_{ИО}, пространство ИР можно представить в виде двух частей:

основных средств – О_{ИО}, помещаемых, хранимых и предоставляемых пользователю (процессу);

инфраструктуры ИР – комплекса взаимосвязанных обслуживающих структур системы, обеспечивающих функционирование ее основной части (основных средств ИР) [4].

Предлагается следующий состав инфраструктуры ИР:

– средства, обеспечивающие доступ к ресурсам, прием, хранение и предоставление ИО пользователю;

– средства управления ИР;

– нормативно-правовые акты, устанавливающие правила и порядок работы с информацией, размещенной на ИР;

– нормативные технические правовые документы: международные, межгосударственные, национальные, отраслевые, организаций, устанавливающие технические требования к документированию информации;

– системы классификации и кодирования размещаемой в ИР информации;

n – количество ИЕ основных средств, представляющих конкретный ИО; m – количество $O_{ИО}$ основных средств, представленных в ИР; $ИЕ_{ИО\ инф}$ – ИЕ инфраструктуры ИР; k – количество ИЕ, представляющих конкретный $O_{ИО}$ инфраструктуры ИР; h – количество $O_{ИО}$ инфраструктуры ИР.

Предлагается следующий состав основных характеристик ИР.

Общий объем памяти, занимаемой первичными $O_{ИО}$ основных средств и инфраструктуры ИР, размещаемых на ИР АИС, определяется как сумма:

$$Q_{\text{перв. } O_{ИО}} = \sum_{i=1}^n (Q_{\text{перв. } O_{ИО} \text{ осн. ср}}^i + Q_{\text{перв. } O_{ИО} \text{ инф}}^i)_{i\text{-го сервера АИС}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{перв. } O_{ИО}}^i$ – объем памяти основных средств ИР, размещаемых на ИР i -го сервера информационной системы, МБ; $Q_{\text{перв. } O_{ИО} \text{ инф}}^i$ – объем памяти средств инфраструктуры ИР, размещаемых на ИР i -го сервера информационной системы, МБ; n – количество серверов системы, на которых хранятся первичные $O_{ИО}$ основных средств, представленных в ИР.

Объем доступной пользователю информации по проблеме определяется согласно выражению

$$Q = \sum_{i=1}^n I_{i \text{ вид}}, \quad (7)$$

где $I_{i \text{ вид}}$ – объем i -го вида информации, МБ; n – количество видов информации, предоставляемой пользователю.

Полнота предоставляемой информации ИР (П) – это соотношение между имеющейся в ИР информацией по проблеме и той информацией, которая может быть предоставлена пользователю согласно правам доступа. Чем больше информации содержит ИР по конкретной проблеме, тем выше эффективность использования данного ресурса при последующем его предоставлении пользователям, имеющим различный уровень знаний о ней:

$$П = \frac{Q_{\text{инф. дост}}}{Q_{\text{инф. ИР}}} = 1 \quad (8)$$

при

$$Q_{\text{инф. дост}} \rightarrow Q_{\text{инф. ИР}},$$

где $Q_{\text{инф. дост}}$ – объем доступной пользователю информации, МБ; $Q_{\text{инф. ИР}}$ – объем информации ИР, МБ.

Применение формулы (8) позволяет количественно определить значение коэффициента полноты предоставляемой пользователю информации по отношению к информации, находящейся в ИР.

Достаточность информации ИР (Д) является его количественной характеристикой, которая определяет возможность достижения поставленной цели при наличии информации, доступной пользователю данного ИР, т. е. когда значение $Д$ стремится к единице [5]:

$$Д = \frac{Q_{\text{инф. дост}}}{Q_{\text{инф. треб}}} = 1 \quad (9)$$

при

$$Q_{\text{инф. дост}} \rightarrow Q_{\text{инф. треб}},$$

где $Q_{\text{инф. дост}}$ – объем доступной пользователю информации, МБ; $Q_{\text{инф. треб}}$ – объем требуемой информации, МБ.

Применение формулы (9) позволяет количественно определить значение коэффициента достаточности предоставляемой пользователю информации по отношению к требуемой информации, находящейся в ИР.

Доступность информации ИР характеризует предоставление пользователю возможности работы с информацией, ее получения (в том числе и в течение заданного времени) и дальнейшего использования. При этом предоставляется возможность получения доступа к источникам, содержащим требуемую информацию, в удобной для пользователя форме, что в определенной мере может влиять на восприятие предоставляемой информации и извлечение из нее необходимых пользователю сведений.

Доступность информации, как правило, регламентируется системой ограничений различного уровня: от установленных в конкретной организации – пользователе АИС – правил до законодательных актов, принятых на государственном и международном уровнях.

Использование перечисленных выше характеристик позволит определить значения показателей качества услуг по предоставлению информации, необходимых для прогнозирования и корректировки регламента доступа к информации обслуживания.

Определение «доступность информации – свойство быть доступным и готовым к использованию по запросу авторизованного субъекта» (ГОСТ 33707-2016 Информационные технологии (ИТ). Словарь Information technologies, URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200139532>), по мнению автора, является не совсем корректным, так как оно в данном случае характеризует не тип и вид объекта, к которому предоставлен доступ, а то, что информация сама может устанавливать данное свойство.

Рассмотренные показатели характеризуют статические свойства ИР.

Обслуживание пользователей ИР выполняется по установленным правилам в соответствии с принимаемыми запросами. ИР осуществляют прием, отбор и систематизацию вводимых сведений. Свойства ИР на стадии эксплуатации жизненного цикла постоянно изменяются и определяются динамическими характеристиками системы.

Одним из основных показателей потока запросов к ИР является частота их обращения, которая характеризуется следующими свойствами:

- частота запросов информации ($F_{\text{зап. инф}}$) значительно больше, чем частота помещения ее на сервер ($R_{\text{пом. инф}}$) и обновлений ($F_{\text{зап. инф}} > R_{\text{пом. инф}}$);
- частоты запросов информации и ее помещения на сервер примерно одинаковы ($F_{\text{зап. инф}} \approx R_{\text{пом. инф}}$);
- частота запросов информации значительно меньше, чем частота ее помещения на сервер ($F_{\text{зап. инф}} < R_{\text{пом. инф}}$).

В качестве характеристик потока запросов предлагается взять показатели частотности запросов информации к ИР: постоянно запрашиваемую информацию (invariable, $F_{\text{зап. инф inv}}$) и эпизодически запрашиваемую информацию (occasionally, $F_{\text{зап. инф occ}}$). Характеристики потоков запросов и процессов репликации баз данных определяются свойствами ИО: тематикой информации, ее актуальностью и др.

В корпоративных АИС, как правило, выполняется рассылка циркулярных уведомлений об изменениях в базах данных, которая предшествует процессам репликации данных. Процессы репликации баз данных серверов характеризуются такими показателями, как оперативность репликации информации (минимальное время ожидания рассылки данных после окончания их поступления или обновления) и ритмичность помещения информации в базу данных.

Схема рассылки реплицируемых баз данных в зависимости от их содержания может изменяться. Она определяется наличием запросов информации к конкретным серверам.

Заключение. Предлагаемые количественные функциональные характеристики ИР ориентированы на содержательные свойства размещаемой в них информации и позволяют структурировать ее именно по смыслу с неограниченной степенью детализации, необходимой для поиска и систематизации данных. Эти характеристики можно применять только для детализации представления ИО в ИР, но ни в коем случае не для их синтеза.

Количественные значения функциональных характеристик $O_{ио}$, помещенных в ИР, дают возможность более рационально использовать ресурсы памяти технических средств хранения АИС, уменьшить время формирования предоставляемой пользователю информации и повысить ее информативность за счет поиска по смысловому содержанию.

Предлагаемые в статье количественные характеристики целесообразно применять для ИР, в которых размещаются большие объемы структурированной информации, например big data, и при создании ИИС. Они могут быть также использованы для описания ИР в формализованном виде и, соответственно, предоставления возможности аналитической обработки и оценки их эффективности.

Применение рассматриваемых количественных характеристик $O_{ио}$ ИР позволит на стадиях создания и эксплуатации (реализации процессов непрерывного совершенствования) АИС повысить качество проектных решений и эксплуатационные показатели этих АИС.

Список использованных источников

1. Об информации, информатизации и защите информации. Статья 1. Основные термины, применяемые в настоящем Законе, и их определения [Электронный ресурс] : Закон Респ. Беларусь от 10 нояб. 2008 г. № 455-3 // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H10800455>. – Дата доступа: 10.01.2019.
2. Информационные элементы и их виды [Электронный ресурс] // Государственная публичная научно-техническая библиотека России. – Режим доступа: <http://www.gpntb.ru/win/book/1/Doc8.HTML>. – Дата доступа: 10.01.2019.
3. Методы анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем / Н. А. Кузнецов [и др.]. – М. : Физматлит, 2002. – 800 с.
4. Инфраструктура : большой энциклопедический политехнический словарь [Электронный ресурс] // АКАДЕМИК. – Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/polytechnic/3509/ИНФРАСТРУКТУРА>. – Дата доступа: 10.01.2019.
5. Информация. Источники научной информации. Аналитико-синтетическая переработка информации [Электронный ресурс] // Library.ru – информационно-справочный портал. – Режим доступа: <http://library.mephi.ru/icb2/glav2.html>. – Дата доступа: 10.01.2019.

References

1. Law of the Republic of Belarus November 10, 2008 № 455-3, Ob informacii, informatizacii i zashhite informacii. Stat'ja 1. Osnovnye terminy, primenjaemye v nastojashhem Zakone, i ih opredelenija [About information and informatization and data protection, article 1. main terms used in this law, and their definitions]. Nacional'nyj pravovoj internet-portal Respubliki Belarus' [National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus] (in Russian). Available at: <http://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H10800455> (accessed 10.01.2019).
2. Informacionnye jelementy i ih vidy [Information elements and their types]. Gosudarstvennaja publichnaja nauchno-tehnicheskaja biblioteka Rossii [State Public Scientific and Technical Library of Russia] (in Russian). Available at: <http://www.gpntb.ru/win/book/1/Doc8.HTML> (accessed 10.01.2019).
3. Kuznetsov N. A., Kulba V. V., Kovalevsky S. S., Kosyachenko S. A. Metody analiza i sinteza modul'nyh informacionno-upravljajushhih sistem. *Methods of Analysis and Synthesis of Modular Information and Control Systems*. Moscow, Fizmatlit, 2002, 800 p. (in Russian).
4. Infrastruktura : bol'shoj jenciklopedicheskij politehnicheskij slovar' [Infrastructure : large encyclopedic polytechnic dictionary]. АКАДЕМИК [ACADEMICIAN] (in Russian). Available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/polytechnic/3509/ИНФРАСТРУКТУРА> (accessed 10.01.2019).
5. Informacija. Istochniki nauchnoj informacii. Analitiko-sinteticheskaja pererabotka informacii [Information. sources of scientific information. Analytical and synthetic processing of information]. Library.ru – informacionno-spravochnyj portal. [Library.ru – Information and Reference Portal] (in Russian). Available at: <http://library.mephi.ru/icb2/glav2.html> (accessed 10.01.2019).

Информация об авторе

Тоцицкий Леонард Иванович, главный конструктор проекта отдела технологий цифровой трансформации, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
E-mail: Leonard.Tochicki@tut.by

Information about the author

Leonard I. Tochicki, Chief Designer of the Project of the Department of Digital Transformation Technology, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
E-mail: Leonard.Tochicki@tut.by

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

UDC 02:004-028.22
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-95-112>

Received 24.02.2020
Поступила в редакцию 24.02.2020

Accepted 19.06.2020
Принята к публикации 19.06.2020

Website Quality Evaluation Methodology Universal Star: 1st point – “Content”

Siddikjon Gaibullojonovich Abduganiev

*Johannes Kepler University of Linz, the Republic of Austria;
Khujand Polytechnic Institute of Tajik Technical University named
after acad. M. S. Osimi, the Republic of Tajikistan
E-mail: abduganievsg@gmail.com*

Abstract. The Internet continues to grow at a fast pace with over 1.5 billion websites in 2019 as compared with only one in 1991. The emergence of enormous websites of various complexities and types makes assessing the quality of these sites a vastly important, difficult and complicated task. With this concern, the current paper proposes a novel approach for website assessment by developing a new Website Quality Evaluation Methodology Universal Star (WQEMUS) with a theoretical and empirical basis. It became possible through the employment of the grounded theory methodology that enables relevant concepts to emerge from data. To improve the reliability and validity of the findings, an extensive literature review, in-depth and qualitative interviews, and a user evaluation survey were conducted and associated together. In this way, the study presents the results of the selection and categorization of generic quality attributes for WQEMUS with a three-tier structure, consisting of top-level quality criteria, sub-criteria and indicators. These quality dimensions are grounded on a combination of subjective and objective indicators. Consequently, WQEMUS becomes capable of estimating a wide range of different websites irrespective of domain affiliation and services they provide, including Web 3.0 sites.

Keywords: website, evaluation methodology, content, quality criterion, multimedia

Acknowledgements. The work reported in this paper has been funded by the TARGET II Project of the Erasmus Mundus Program and conducted at the Johannes Kepler University of Linz, Austria.

For citation. Abduganiev S. G. Website Quality Evaluation Methodology Universal Star: 1st point – “Content”. *Informatics*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 95–112. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-95-112>

Методология Оценки Качества Веб-Сайта Универсальная Звезда: первая вершина – «Содержание»

С. Г. Абдуганиев

*Линцский университет имени Иоганна Кеплера, Австрийская Республика;
Худжандский политехнический институт Таджикского технического
университета имени акад. М. С. Осими, Республика Таджикистан
E-mail: abduganievsg@gmail.com*

Аннотация. Интернет продолжает расти быстрыми темпами, более чем 1,5 млрд веб-сайтов в 2019 г. по сравнению только с одним в 1991 г. Появление огромных веб-сайтов различной сложности и типов делает оценку качества этих сайтов чрезвычайно важной и трудной задачей. В связи с этим в статье представлен новый подход к оценке веб-сайтов путем разработки новой Методологии Оценки Качества Веб-Сайтов Универсальная Звезда (МОКВУЗ) на теоретической и эмпирической основе. Чтобы повысить надежность и достоверность результатов исследования, были приведены обширный обзор

литературы, углубленные и качественные интервью и оценки пользователей. Таким образом, в статье представлены результаты отбора и категоризации общих атрибутов качества для МОКВУЗ с трехуровневой структурой, состоящей из критериев качества высшего уровня, субкритериев и показателей. Эти аспекты качества основаны на сочетании субъективных и объективных показателей. Следовательно, МОКВУЗ становится способной оценивать широкий спектр различных веб-сайтов независимо от принадлежности к домену и предоставляемых ими услуг, включая сайты Веб 3.0.

Ключевые слова: веб-сайт, методология оценки, контент, критерий качества, мультимедиа

Благодарность. Работа профинансирована проектом TARGET II программы Эразмус Мундус и проводилась в университете имени Иоганна Кеплера в г. Линц, Австрия.

Для цитирования. Абдуганиев, С. Г. Методология Оценки Качества Веб-Сайта Универсальная Звезда: первая вершина – «Содержание» / С. Г. Абдуганиев // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 3. – С. 95–112. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2020-17-3-95-112>

Introduction. Any serious activity or business need a web presence to compete in today's fast growing digital age and a good website is the best tool to achieve assigned goals with a greater speed and ease. Every day, the amount of governmental and non-governmental organizations, companies and individuals, who are creating their branded websites, is growing up. There are over 1,5 billion websites on the world wide web by September 2019 as compared with 1 in 1991 [1], but only 56,45 % [2] are active and succeed to satisfy their users' requirements and needs. The main causes affecting the current unfavorable situation are the limited background and knowledge of designers, the blunt tolerance of browsers to endure even incorrect code [3] and the evolution of information and communications technology (ICT) which sets new and severe conditions for website development. Moreover, available websites in various domains are not only document-oriented, but also application-oriented and user-driven. As a consequence, they are complex systems [4, 5] with different types, very dynamic and application- and user-oriented. Therefore, today more than ever, high-quality sites are especially important.

Website quality is recognized as a key factor affecting the improvement or deterioration of website reputation, the increase or decrease of the number of online users and successful or unsuccessful customer retention [6–10]. A high quality makes websites relevant, quickly accessible, easily usable, beneficial and successful. The site should ensure accurate and credible information, attractive design and exterior view [11] to meet the continuing needs and assumptions of its users.

Typically, the website assessment process identifies existing problems and levels of website feasibility, as well as indicates problematic areas of the website that the developer should pay special attention. Having a proper website quality evaluation method (WQEM) with the possibility of its maximum usage at all stages of site construction can be extremely useful because such WQEMs help to identify existing problems and set tasks for a successful development of sites. In the development process, WQEMs enable developers to be on the alert and immediately respond to arisen problems. Next, after the website development process, WQEMs can estimate and benchmark the quality of the entire website. As for the process of website operation, WQEMs might be applied as a compass to indicate correct directions for the improvement of sites. For these various reasons, WQEMs assist web developers to remain concentrated on critical aspects to maintain the high quality of their sites.

Background information. Due to the proliferation of a huge number of sites of various complexities, which involve various systems and subsystems, applications, web technologies, languages and databases, website quality assessment remains a vibrant area of research and will require numerous experimental and analytical advances using well-designed WQEMs. Over many years a great number of various website assessment practices, schemes, models, frameworks, techniques, methods, metrics and methodologies were developed. According to our literature review, a number of metrics were built to measure specific sets of website quality features since the 1990s [12, 13]. Many experts have offered numerous innovative approaches called WQEM, which is described by ISO/IEC25000-2005IEC as “defined set of characteristics and of relationships between them, which provides a framework for specifying quality requirements and evaluating quality”. Some of them investigate websites based on subjective forms of the appraiser's personal privileges, while

the others perform in the form of objective and statistical measurements. Consequently, they approach problems from different angles. During the 1950s, 1960s and 1970s, after many efforts, “user satisfaction” was introduced to WQEMs as an important aspect of software quality [14]. The earliest WQEMs checked picture size, background colors, audio files and content. These were substantial measurable attributes of software quality [15].

However, there is vagueness in the choice of WQEMs and no generally accepted agreement about the correctness of their identification, structure and classification. Some WQEMs are mainly geared towards estimating specific web services or types of websites such as electronic commerce, academic, tourist, cultural, enterprise environment, news and etc., while others check certain web quality parameters including content or design (e.g. [9, 16–18]). The majority of WQEMs are focused on ISO quality standards and particularly, on using it [19–22] as the root of their methods. As for the WQEMs that are designed for the assessment of all types of websites, they are either dealing with a limited number of quality attributes or outdated because of the rapid development of web technologies.

With these considerations in mind, the purpose of this paper is to propose a new theoretically and empirically based WQEM that can provide all-important assessment characteristics and encourage website quality improvement. Furthermore, newly introduced WQEM should be capable to reliably estimate a wide range of different sites regardless of their domain types. Thus, a comprehensive selection of relevant measurable quality features for all types of sites, a detailed definition of their importance and relationships, and properly placing them in a hierarchical structure are considered as strategic tasks for the engineering of a new WQEM.

Our critical literature review of existing relevant works in the area did not provide sufficient information about new breakthroughs in the development of holistic WQEMs over last decades. In this relation, six relatively exhaustive assessment methods with their standard characteristics will be considered in detail.

In 1992, the International Organization for Standardization (ISO) in cooperation with the International Electrotechnical Commission introduced a hierarchical model “ISO 9126 – Information Technology – Software Product Evaluation – Quality characteristics and guidelines”. It consists of six major quality characteristics, each of which is very broad in nature. They are functionality, usability, efficiency, reliability, maintainability and portability. Further, these characteristics are refined into twenty-one internal quality sub-characteristics and twenty-seven external quality sub-characteristics. The main peculiarity of this quality model is that it can be applied to any kind of software products. Also, it is the most recognized and the fundamental model for many WQEMs, e.g. those created by [17, 23–28]. Then, it has been replaced by more extensive series of standards – ISO/IEC 25010:2011 that is called SQuaRE (Software product Quality Requirements and Evaluation), as demonstrated in fig. 1.



Fig. 1. Informative hierarchy of the ISO SQuaRE's Model

Mich et al. [29] have created an approach called “2QCV3Q” for designing and assessing sites, which is independent of website goals and domains. 2QCV3Q was recently renamed to 7Loci and takes its name from the initials of Ciceronian Loci. It was developed for marketing purposes and was applied in a number of evaluation projects such as education, business, customer service [29, 30] and mainly in tourism sites [3]. Table 1 summarizes the proposed 2QCV3Q model.

Table 1
2QCV3Q or the 7-loci quality meta-model by Mich et al. [29]

CICERONIAN LOCI	ATTRIBUTES AND SUB-ATTRIBUTES
QVIS(<i>Persona: Who?</i>) IDENTITY	<i>Identification</i> (– Brand or Charisma, Image; – Target users’ profiles) <i>Characterisation</i> (– Design; – Personalization)
QVID (<i>Factum: What?</i>) CONTENT	<i>Coverage</i> (– Domain referred to owner’s and users’ goals;– Value of information and links) <i>Accuracy</i> (– Quality of information;– Source(s), author(s))
CVR (<i>Causa: Why?</i>) SERVICES	<i>Functionalities</i> (– Functions needed by owner and users;– Adequacy to owner’s and users’ goals) <i>Control</i> (– Correctness;– Security, ethics and privacy)
VBI (<i>Locus: Where?</i>) LOCATION	<i>Reachability</i> (– Intuitive URL;– Retrieval) <i>Interactivity</i> (– Contact information;– Community building)
QVANDO (<i>Quando: When?</i>) MAINTENANCE	<i>Corrective maintenance</i> (– Check-up, links, dates;– User assistance) <i>Adaptive Maintenance</i> (– Enhancement;– Reengineering)
QVOMODO (<i>Modus: How?</i>) USABILITY	<i>Accessibility</i> (– Hardware and Software requirements;– People with disabilities) <i>Navigability</i> (– Structure, Orientation;– Download times) <i>Understandability</i> (– Languages;– Level of terminology)
QVIBUS AVXILIIS (<i>Facultas: With what means and devices?</i>) FEASIBILITY	<i>Resources</i> (– Financial and Human Resources;– Time) <i>Information and Communication Technology</i> (– Hardware (computer, networks);– Software (implementation, integration))

As reported in the above table, 2QCV3Q is based on seven main dimensions corresponding to six loci, namely: Quis (Identity), Quid (Content), Cur (Services), Ubi (Location), Quando (Management), Quomodo (Usability), Quibus Auxiliis (Feasibility).

After reviewing previous studies about different WQEMs, we come to know that Hasan and Abuelrub [31] presented another theoretical, all-purpose and more comprehensive framework for testing the quality of any sites and thereby, promoting the improvement of site design. They suggested four general dimensions such as content, design, organizational quality and user-friendliness. Subsequently, the framework is composed of three hierarchical levels, as shown in fig. 2.

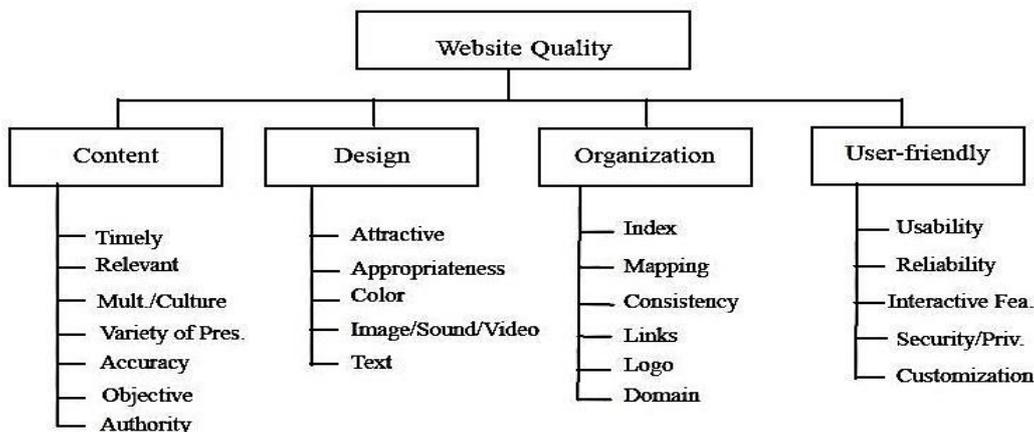


Fig. 2. Hierarchical structure of the quality items of the framework proposed by Hasan and Abuelrub [31]

As a further example, a scientific paper by Polillo [32] has introduced a practical quality model for evaluating any kind of sites, including Web 2.0 sites. Accordingly, this methodological approach is structured into a set of nine measures that are further decomposed into thirty sub-characteristics, as listed in fig. 3. It is specifically designed to identify the needs of end-users and works in all the phases of the website development life cycle. Fig. 3 displays Polillo's dimensions, appointed for his web evaluation framework.

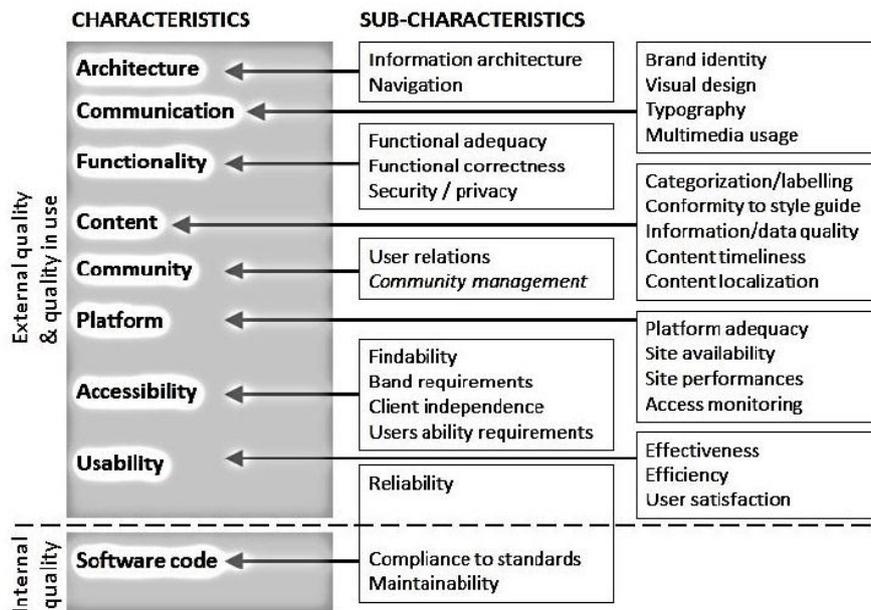


Fig. 3. Screenshot of the constructed quality model by Polillo [32]
The sub-characteristics for the Web 2.0 sites are written in italics

A holistic, scalable and easy to apply Web Q-Model for evaluating websites of different domains, which is provided by Cimino and Micali [3], encompasses six dimensions that include interface communication (IC), content (CO), navigation (NA), management and accessibility (MA), interactivity (IN) and accessibility for people with disabilities (AD). It is aimed at helping web designers and managers to develop accurate sites and categorizes the quality factors into three levels with associated symbols such as “Basic”-Q, “Normal”-QQ and “Exciting”-QQQ to differentiate the features on the basis of their importance.

Last but not least, a three-factor framework that placed emphasis on relatively recent quality issues was evolved to evaluate multidimensional websites [33]. Rocha believes that any assessment research, organized in accordance with these three main criteria (content, service and technical qualities) would assure cross-sectional and detailed information of the global quality of sites (fig. 4). The features of this method can be measured using a 3 or 5-point Likert scale (1 – completely disagree; 2 – disagree; 3 – do not agree or disagree; 4 – agree; 5 – completely agree).

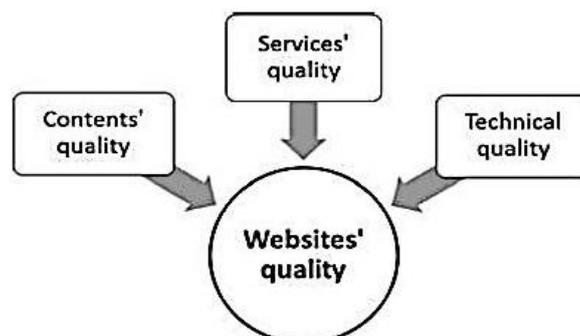


Fig. 4. Three main dimensions for website quality assessment by Rocha [33]

In conclusion, several other WQEMs were not considered because of their predestination for specific types of websites and/or dealing with a limited number of quality factors. However, they helped to increase our understanding and interpretation of quality attributes and their relationships to properly formulate basic and new quality requirements for a novel WQEM.

Qualitative and quantitative research methodology approaches. Grounded Theory Method (GTM) as a flexible, heuristic and systematic way was adopted to address the assigned purposes of this paper. Strauss and Corbin acknowledged the importance of the multiplicity of perspectives and truth in the evolution of grounded theory [34–37]. Therefore, in order to cover such a multiplicity and diversity of quality elements we used literature review, interviews and survey techniques as well as other sources of information, including field notes, letters and books to collect data within the confines of GTM. However, collected data should be weighed in the terms of relevancy, quality and quantity [38, p. 16].

Literature review. In our grounded theory-based research, conducting a review of literature prior to data collection and analysis has provided not a theoretical background, but rather analytic underpinnings and strategies for the research. Accordingly, in the last decades, numerous studies in the context of website quality assessments have established website quality as a complex construct [39], which can be evaluated by defining measurable factors [7, 8, 40, 41] or pervasive sets of features [42]. A number of scientists emphasized website measurement as multidimensional in nature [39, 43–48] and combined various website quality dimensions into one evaluating framework [49, 50]. Furthermore, it is difficult to determine website quality attributes since they are impacted by issues related to culture, participants and even time [51] as well as refer to different levels of user expectations¹ [52]. In order to provide users with a quality site, the developer should first understand various aspects of quality, which are influenced by user expectations and preferences and then, reflect them in the design, construction and operation of sites [53].

Hence, in order to develop a new WQEM, a multi-dimensional approach has been adopted. An in-depth and extensive analysis of a broad range of previous related studies on key quality factors for websites, evaluation metrics and various assessment methods with their specific quality attributes was performed to identify all necessary sets of top-level quality criteria, sub-criteria and indicators for our new methodology. These quality characteristics can be selected in accordance with their semantic orthogonality, measurability, possibility of automated assessment, attitude towards the site development process, and/or use in statistical or probabilistic analysis and etc. [9, 25, 29, 54–57]. Moreover, quality characteristics should be based on both theoretical and empirical knowledge to be sure of their importance and coverage of different aspects of successful websites.

In accordance with our research aims, all four coding categories of GTM such as open, axial, selective and theoretical were employed in the data analysis. Accordingly, existing repetitive item names were eliminated. Furthermore, similar items were merged and a wide set of quality items with an equivalent semantic meaning were categorized under top-level quality items. We focused on the broad characteristics of research units and subsequently, seven groups with twenty quality attributes were picked out based on the results of the coding processes. These seven groups are content, presentation, organization, ease of use, responsibility, functionality and security characteristics. In sum, an initial version of the methodology in the form of a requirement tree and a fairly broad list of representative quality criteria and sub-criteria was generated by studying literature sources.

In-depth interviews. Within the framework of the constructivist GTM, an in-depth interview research was carried out after finishing the literature review that helped establish a preliminary WQEM, i.e. a series of questions from the quality characteristics. Mills et al. [58, p. 9] stated that interview processes give the researcher an opportunity to raise ideas and mutually construct knowledge through engaging in discussions. Interviewing should be open-ended, conversational and mutually shaped. In this way, it can ensure the required depth, richness and rigor of scientific research. In-depth interviews enable the inventor to ask for more details and explanation, delve more deeply into thematic issues [38] and contrast most important points and key details. Thirty-six international

¹The International Academy of Digital Arts and Sciences, “The webby awards 2003 judging criteria” 2003

contributors from in-depth face to face interviews gave their voice and thoughts in our research directions, as characterized in table 2.

Table 2

Background characteristics of eligible in-depth interview respondents

Characteristics	Statistics
Gender	
Male	22 (62.5%)
Female	14 (37.5%)
Age	
up to 22	8 (21.7%)
23-30	12 (32.3%)
31-40	13 (37.4%)
41 or older	3 (8.6%)
Age	Average daily internet consumption
up to 22	4.9 hours
23-30	5.2 hours
31-40	5.4 hours
41 or older	3.4 hours
Education	
Secondary education	6 (17.4%)
High education	30 (82.6%)
Specialty	
Information Technology	11 (31.6%)
Other specialties	25 (68.4%)

Table 2 presents the distribution of interviewed women and men of all ages, educational levels and specialties with average daily internet consumptions. As planned, we were able to have a diverse and international sample of respondents, including 31,6 % specialists and experts in the field of Information Technology.

Next, the final numbers and countries of origin of the respondents are summarized in fig. 5.

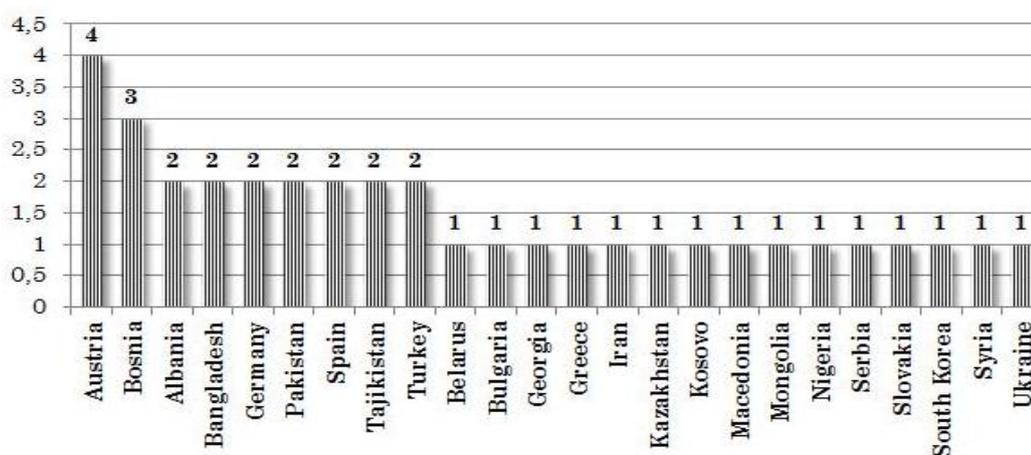


Fig. 5. Numerical distribution of in-depth interview participants by their country of origin

According to fig. 5, the resulting international sample of thirty-six competent respondents from twenty-four countries gave more confidence and strength in the results of the study.

The process of data analysis in this in-depth interview research involved open, axial, selective and theoretical coding. After constantly comparing the collected data, codes, categories and memos between themselves, modern concepts of quality attributes for a new framework were conceptualized. As a result, the number of the most salient categories of quality items was five and not seven. These five categories comprise content, design, usability, reliability and organization. Moreover, seven new quality sub-items were merged from our data analysis. They are multilingualism, performance, compatibility, advertisement, intelligibility, searchability and evolvability. Besides, new relevant names have emerged instead of the previous ones such as up-to-date content, importance, multimedia, accuracy, reference, authorship, aesthetics, color, consistency, security, logos and brands, URL and interactivity.

It must be stressed that these various interpretations of the quality elements' meanings by in-depth interview participants have provided a broader picture of the topic and new perspectives. Therefore, they were conceptualized harmoniously to generate a grounded integration of concepts into the assessment theory and were also taken into account in determining indicators that comprise the third level dimensions of new Website Quality Evaluation Methodology Universal Star (WQEMUS).

Qualitative interviews (Part 1 of the results). This qualitative interview research, played an essential role in the formation of WQEMUS' attributes. In particular, Part 1 of the study results stimulates the perfection of the first two levels of WQEMUS. It also provides an opportunity to more confidently conduct upcoming series of closely interrelated studies. As a result of the data analysis using GTM's open, axial and theoretical coding, new codes and concepts such as mapping, privacy and traffic were derived. The uniqueness of content, design and other visual components of the site was confirmed to be a useful sub-criterion for the design criterion of WQEMUS. Further, the names of up-to-date content and evolvability have been replaced by currency and maintainability, respectively to make them shorter, more descriptive and common. More than this, the name of the core category – organization was renamed to “Reputation”, which is considered to be more relevant for WQEMUS.

User evaluation and judgment survey. Following the previous in-depth and qualitative interviews, the author used the questionnaire technique with 162 respondents that took part in group-administered questionnaire survey 1 (GAQS 1). Accordingly, 31 (16,06 %) out of 193 participants of GAQS 1 left the proposed questions unanswered or answered only partially. It happened because they might not have enough time to answer a few more questions. Another reason might be that some respondents were in a hurry because they had scheduled meetings after the end of courses. Correspondingly, a total of 162 questionnaire responses were analyzed and all answers were pooled to produce reliable results in this user assessment and judgments survey research. Surely, the majority of answers had affirmative nature. That is why the amount of information provided was not complex.

The interview questions were based on the results of the previous in-depth and qualitative interview studies. The next step to produce reliable results in this semi-structured user evaluation and judgment survey was to analyze the responses of 162 questionnaire participants. Basically, the results of all four previous studies – the literature review, in-depth and qualitative interviews and the present study were compared and integrated together. In this survey, an optimal mix of various selection and elimination procedures for agreeing on categories, recommended by GTM such as open, axial and theoretical coding was necessary to characterize quality measures and obtain the final list of the criteria and sub-criteria of WQEMUS.

In fact, three new quality concepts such as compliance with usability and accessibility standards and taking antispyware actions were revealed, which were not mentioned in our previous in-depth and qualitative interview studies. Also, a new name “Identification” was given instead the “Logos and brands” sub-criterion. Notably, we were very fortunate that a new sub-criterion - antispyware was proposed at the very beginning of the survey since because of it we had to rearrange the questionnaire structure to be able to further intensify and carry out GAQS 1. Essentially, all important changes are taken into account.

Findings about three levels of WQEMUS: quality criteria, sub-criteria and indicators. The application of the above-mentioned GTM for conducting the literature review, in-depth interview and user evaluation and judgment survey gave the ground to concentrate around five top-level quality

criteria for WQEMUS, which are exhaustive and used almost in all previous quality testing methods and techniques. Now, WQEMUS is able to adequately assess all kinds of websites and fig. 6 below summarizes the findings about it visually:

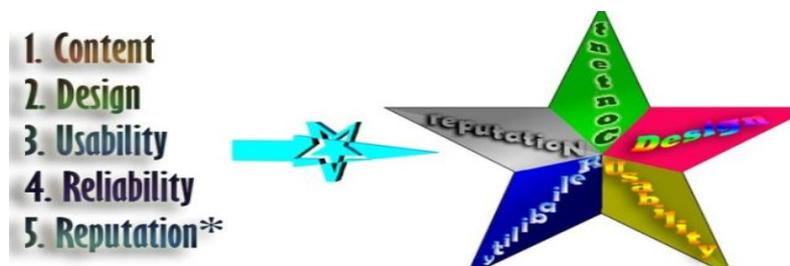


Fig. 6. Selected five top-level quality criteria for WQEMUS

The most often met website assessment dimensions in the scientific literature are considered as Web content [23, 33, 39, 59–71], Web design [39, 50, 61, 65, 71–75] and usability [19, 76–81]. As for the names of the last two top criteria of the novel methodology, they were then identified by the participants of our research studies and the author as “Reliability” and “Reputation”, because they better describe their corresponding sub-criteria. Later on, the author came up with the name of new WQEM, which is Website Quality Evaluation Methodology Universal Star (WQEMUS) by taking into account the formed five top-level quality criteria, groups or directions. “Universal”, because the new WQEM is applicable to all kind of websites. The word “Star” was used in the name, since the new WQEM has five directions or points (the top-level quality criteria) like the star has (See fig. 6 and 7). Generally, all the listed top-level quality criteria establish the scope of WQEMUS and reflect the conceptual and holistic description of site quality.

The top-level quality criteria of WQEMUS unite sub-criteria. In turn, the sub-criteria that contribute to the improvement of the quality of sites are dependent on their top criteria, but should be independently measured during an estimation process using WQEMUS. All of the quality dimensions together are also interconnected and form a general idea and logic of WQEMUS. The developed hierarchical structure of WQEMUS with its classified quality criteria and sub-criteria is shown in fig. 7. Consequently, a rather large set of important quality factors for all kind of websites have been established.



Fig. 7. Final sets of sub-criteria grouped into the content criterion of proposed WQEMUS

Top quality criterion “Content”. This criterion has been recognized as the most critical aspect of the website [82, 83], the king dimension of websites [84] or a fundamental quality attribute that indicates the information architecture of a site [85]. It is associated with a distinctive quality, property [33], advantage and/or the trustfulness of presented information [86] about companies/organizations, site owners, provided goods and services, activities and others under the responsibility of content editors. Many respondents of our conducted studies replied that the main reason they come to the website is due to content and its diversity. Moreover, without content, there would be no views of website pages. Most of the surveyed users were goal oriented and usually look only for specific types of information while paying less attention to the other aspects of the website such as navigation, visual design and interactivity and others. Content reflects the ability of the site to meet users’ request, responsiveness and trustworthiness [87, 88]. Furthermore, worthy content takes a stand and considers issues of interest from different perspectives. It can be informative, useful or funny, but it always should encourage users that want more. Therefore, relevance, high quality, entirety and a good degree of content specialization are actually important.

Sub-criteria of “Content”

Currency. Currency refers to how far the website’s content is modern, how often it is updated and whether the date of the last update is specified [43, 50, 56, 59, 64, 89–100]. Our indepth and qualitative interviews revealed that old content is boring and unbearable. An interesting statement “Why should I read old information?” has been given by some respondents. The final name was assigned to this criterion as currency after the qualitative interviews.

Furthermore, every activity or business tends to change over time with new improvements, ideas, products, services, staff, innovations, news items and more. These changes need to be reflected not only for information portals, but on every site by involving continuous modification, transformation, correction and improvement to reflect changes in the environment, business etc. [101, 102]. A frequently updated website increases its visit rate and avoids outdated information [103] since outdated information appears to be the primary causative factor of website failures and business losses [104]. Up-to-date content on the Internet is likely to be more relevant and useful for visitors as well as for search engines that are always looking for contemporary information. Modern search engine mechanisms have been established in accordance with the terms of real-time with using “Fresh Factor” in order to index online content.

Importance. The importance of content is related to the appropriate range, depth and scope of information [105], which in turn, is also exhaustive, complete, thorough [30, 41, 50, 53, 59, 64, 66, 89, 94, 106] useful, comprehensive and audience-oriented. Furthermore, it was hard to choose a suitable name for this sub-criterion because names were very different even in the literature. After analyzing the data from in-depth interviews, we came to the conclusion to give this criterion the name of importance. Then this name was confirmed in further studies. The respondents of the current research proved that irrelevant or incomplete information will likely not be read by users and moreover, cause negative feelings to the site if they read it. Thence, specific, relevant, up-to-date and detailed information should be provided.

Written content is necessarily considered to be informative, meaningful and value added in the conformity with its audience [98] and should serve the needs of diverse users [30, 64, 84, 95, 98, 107, 108]. In addition, web content expect to be sufficient, understandable and appropriate [94, 109] to the needs and requirements of all targeted groups of users, e.g. local or foreign citizens, travelers, researchers, clients, patients, students and others [61, 65, 71]. The other important features are content’s accurateness and suitability to fit the task at hand [110]. A content-rich website [111] causes more traffic of visitors and increases the site’s visibility across search engines. On the other hand, a complete content with the expected level of detail ensures users to come to adequate and reasonable decision-making on products or services [103]. Finally, the nature and volume of website usage are both essential detectors of success [65].

Multilingualism. A multi-language website allows visitors to interact with more than a single or official state language [89, 92, 98, 108, 112–116]. In this connection, the content of sites should be provided at least with a minimum required number of languages in order to be understandable to everyone or support the execution of specific tasks on sites. Our findings from semi-structured

in-depth and qualitative interviews as well as user evaluation and judgement survey revealed that it is very difficult for foreigners, who arrived in another country, but do not know its official language, to read and understand the proposed content in the local language. On the other hand, if a site wants to compete at an international level, then at least some of the international languages such as Arabic, English, German, Russian and/or others must be used. Here, as an international language, site owners usually choose the language that is understandable across the whole continent, mainland or group of countries in which the site is focused. However, we also revealed that specific or detailed information should be represented in local languages.

A multilanguage website attracts additional customers to business, more participants to projects and new visitors to content. Moreover, Fitzpatrick [89] and Krauss [108] believe that a multi-language support is claimed as the appropriateness of sites to different cultural backgrounds. In other words, multilingualism also satisfies the needs of clients, irrespective of their country of origin [31, 113, 117]. Finally, in most cases, it is essential to address a large number of visitors and it will thereby increase the significance of websites [118].

Multimedia. Multimedia directly affects to the website's aspect "look and feel". It is associated not only with text, but also non-text elements that provide more engaging contextual value of the site's content and purposes [30, 59, 64, 66, 84, 98, 100, 108, 119–125]. Furthermore, non-text formats are worth more than a thousand words as far as they are visual and very effective for perception. In addition, our in-depth and qualitative interviews and user evaluation survey state that many people have difficulties in reading a long text. Content in the form of only text is boring and requires visitors to spend a lot of time and effort to master it. Therefore, integrating non-text formats with text when creating content makes it more easily understandable for a majority of the population, including people who are uneducated or have limited literacy skills. Additionally, multimedia increases users' desire and motivates them to pay more attention to the written content.

A number of scientists suggest that site visitors should get information they have requested in most commonly known types or formats [84, 91, 98]. Alternative text as a description could be also associated with all non-text information [56, 98, 126]. However, the application of multimedia components has to be effective without significantly affecting loading time [56, 117, 127]. It means that the amount of dedicated non-text information should not be too large, but in a reasonable amount and format as well as their size must also be maximally compressed and reduced to a minimum, since large-size multimedia slows down a page's rendering. As a result, it causes a deeply negative impression on users [56, 128].

Accuracy. Presented content for a site ought to be free from spelling and grammar errors, accurate, precise and reliable [29, 41, 50, 53, 59, 84, 89–91, 93–95, 98, 121]. Grammar, spelling and punctuation mistakes that may change the meaning of content should be fixed or removed [129]. More importantly, correctly represented content, in turn, should not mislead users [94, 113] and white spaces should be used necessarily to avoid overcrowded pages [128]. Further, web content has to be accurately and clearly worded as words intensify meanings. Accurate content and data, which are written in a systematic order, strengthen the reliability of trust in the website's founders [52, 117]. The author explored that the respondents of the in-depth and qualitative interviews have been supporting both sides of this issue. The majority of participants have argued that spelling and grammar errors show the lack of essence, responsibility and seriousness of given content and professionalism of authors. As a result, the credibility and trust of users to such Internet content will be diminished as well as the image of the organization will continue to worsen dramatically. However, the remaining few participants, on the contrary, claimed that the presence of spelling and grammar errors is not problematic as users can still read online content, understand its meaning and benefit from it.

References. This sub-criterion involves stating references used from other information sources [59, 64, 130], adding sources of statements such as citations and direct links to other related sites [84, 98, 124] and data repositories in text. Thereto, various forms for repeated links, text and images [117, 131] as well as conventional means for highlighting links and underlining words/labels, can be used. Following these, indicating resources such as source materials, references and citations increases the trustworthiness of web content [8]. Another critical issue is "how many outbound links, external outlinks or external links should one page have?" which involved a lot of debate and discussions in the

world, particularly in SEO & marketing departments of mid-size and larger organizations. Well, the answer is not that simple. Fig. 8 reflects possible and optimal numbers. Here, it is worthy to note that emphasis should be on quality and not on quantity, since it is impossible to beat out sites that have 10,000 links.

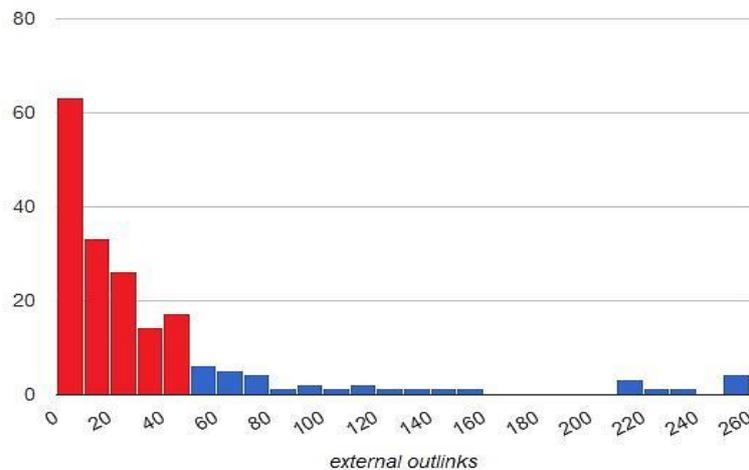


Fig. 8. Optimal numbers of external outlinks suggested for one web page

As shown in fig. 8, red section in the middle is “interquartile range” that covers everything from the 25th percentile (called Q1) to the 75th percentile (called Q3). So, the total range for external outlinks per web page was from 0 to 254. The Q1-Q3 range goes from 5 to 42. The median, dividing the top 50 % and bottom 50 %, was 19². Our findings from the conducted literature review and in-depth interviews exhibit that indicating different sources of information and links to other sites is not so important, but useful and additional plus point, which as a consequence, reduces significant time and efforts required to find more information on a topic of current interest.

Authority. References used to confirm the identification of resources increase the level of users’ confidence and credibility as well as the reliability of sources. This can be done by providing information about authors, groups and individuals who are responsible for the content as well as website sponsors [30, 64, 89, 114, 119] and website managers [59, 64, 89, 119]. Moreover, details about the qualifications, expertise levels [59, 89] and legitimacy of authors for writing certain topics and responsible staff for adding or updating content on particular pages of the site should be also indicated. Furthermore, the physical addresses [92, 98, 132] and official e-mails of authors, site managers and/or organizations have to be available on sites [64, 92, 119]. There is an emphasis on a fair use of copyright sign [64] that is located mostly in the header section and the persistence of metadata and its components in necessary web pages [89, 97]. The author’s first three types of research confirm the fact that the Internet offers a huge amount of information today, but the question of guaranteeing their authenticity is the most essential and still remains an ongoing and challenging issue. Thus, there is nothing worse than the site that has no contact information. Authority is critical, especially for business sites as long as this sub-criterion requires the provision of additional information and key links to real authors or responsible staff members. By doing so, the site strengthens the customers/stakeholders’ confidence that they are dealing with a real business or serious organizers rather than scammers. In sum, worthy websites cannot be made without authority.

Measurable indicators for the sub-criteria of “Content”. As mentioned in the previous chapters, the content criterion on the high-levels of WQEMUS is decomposed into the sub-criteria such as currency, importance, authority, multimedia, multilingualism, accuracy and references. In turn, the sub-criteria are split up into measurable indicators, as summarized in table 3.

²Carter Bowles, How Many Outbound Links Per Word or Page? Available at: <https://northcutt.com>

Table 3

Descriptions of indicators for each sub-criterion of “Content”

Sub-criteria	Measurable indicators
Currency	Reasonable indication of the date/time of posting and last update of materials
	Reasonable indication of the date/time of creation and updates of the site design, graphics and other non-content features figures
Importance	Objectiveness, relevance and trustworthiness of content
	Completeness, richness and usefulness of content, but avoiding redundant and conflicting information
Multimedia	Appropriate numbers, sizes, forms and types of text, images, flash, audio, video etc.
	Good visibility and sharpness of multimedia
	Appropriately incorporated multimedia
Multilingualism	Foreign language support
Accuracy	Absence of grammar, punctuation and spelling mistakes
Authority	Reasonable statement about the professional qualifications of authors, owners, etc.
	Rational use of newsletters, flyers, greeting cards, posters and announcements
	Availability of official e-mail, phone/fax, physical addresses and post mail of owners, authors, sponsors, managers and etc.
References	Clear in-text citations and footnotes/endnotes
	Important links, references and/or bibliographies to other quality sites and sources

Conclusion. This paper has methodological, practical and theoretical implications. The credibility of the Grounded Theory Methodology has been established through the adoption of certain methods such as a literature review, in-depth and qualitative interviews and semi-structured user evaluation and judgment survey. Further, these methods ensured the accuracy, reliability and validity of the research results. In the literature review study, early and most recent WQEMs, quality factors and metrics, their state-of-the-art were thoroughly reviewed to better understand and select quality elements for the further research. Surprisingly, not too many published studies on generic WQEMs were found. Apart from this, a unified and generally accepted classification of the most important, specific or even holistic quality attributes that relate to any kind of websites does not exist. Most of the WQEMs had mere theoretical descriptions, without empirically exploring their assessment characteristics. Consequently, it was difficult to design the first of the five points of WQEMUS, which is content.

References

1. *Total Number of Websites: Internet World Stats*, 2019. Available at: <http://www.internetlivestats.com/total-number-of-websites> (accessed 14.11.2019).
2. *How Many Active Sites are There?* Netcraft Ltd, 2019. Available at: <https://news.netcraft.com/archives/2019/05/10/may-2019-web-server-survey.html> (accessed 14.11.2019).
3. Cimino S., Micali F. Web q-model: A new approach to the quality. *Proceedings of the 26th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Florence, Italy, 5–10 April 2008*. Florence, 2008.
4. Murugesan S., Rossi G., Pastor O., Schwabe D., Olsina L. (eds.) *Web application development: Challenges and the role of web engineering, WebEngineering: Modelling and Implementing Web Applications*. London, Springer, 2008, pp. 7–32.

5. Sørum H., Medaglia R., Andersen K. Assessment of website quality: Scandinavian web awards right on track? *Proceedings of the 8th International Conference on Electronic Government, Linz, Austria, 31 August – 3 September*. Springer Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 198–209.
6. Herczeg M., Kritzenberger H. A task and scenario based analysis model for user-centred systems. *Proceedings of the 9th International Conference on Human-Computer Interaction, New Orleans, Louisiana, USA, 5–10 August 2001*. New Orleans, 2001, pp. 229–235.
7. Zhou Z., Zhou H. Yang H. Evaluating websites using a practical quality model. *Proceedings of the 14th International Conference on Automation and Computing Society, September 2008, west London, England*. West London, 2008.
8. Zhou Z. *Evaluating Websites using a Practical Quality Model. Master's Thesis*. De Montfort University, 2009, 113 p.
9. Malak G., Sahraoui H., Badri L., Badri M. Modeling web quality using a probabilistic approach: An empirical validation. *ACM Transactions on the Web*, 2010, vol. 4, no. 3, pp. 1–31.
10. Abduganiev S. G., Pils M., Roithmayr F. Elicitation of criteria weights for the web quality evaluation method universal star: By using different ranking methods. *Proceedings of the 10th International Scientific-Practical Conference*. Scientific Publishing Center "Discovery", 12–13 April 2016, pp. 11–24.
11. Hartmann J., De Angeli A., Sutcliffe A. Framing the user experience: Information biases on website quality judgement. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2008, pp. 855–864.
12. Epner M. Poor project management of number-one problem of outsourced e-projects. *Research Briefs*. Cutter Consortium, 2000.
13. Offutt J. Quality attributes of web software applications. *IEEE Software*, 2002, vol. 19, no. 2, pp. 25–32.
14. Thayer C. H. Automation and the problems of management. *Vital Speeches of the Day*, 1958, vol. 25, no. 4, pp. 121–125.
15. Dreze X., Zufryden F. Testing web site design and promotional content. *Journal of Advertising Research*, 1997, vol. 37, no. 2, pp. 77–91.
16. Stefani A., Xenos M. E-commerce system quality assessment using a model based on ISO 9126 and belief networks. *Software Quality Journal*, March 2008, vol. 16, no. 1, pp. 107–129.
17. Moraga C., Moraga M., Calero C., Caro A. Square-aligned data quality model for web portals. *Proceedings of the 9th International Conference on Quality Software, Jeju, Korea, 24–25 August 2009*. Jeju, 2009, pp. 117–122.
18. Herrera M., Moraga M. Á., Caballero I., Calero C. Quality in use model for web portals (qiuwep). *International Conference on Web Engineering*. Springer, 2010, pp. 91–101.
19. *ISO/IEC, ISO 9126-1:2001 Software engineering – Product quality – Part 1: Quality model*. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, 2001, vol. 1.
20. *ISO/IEC CD 9126-1:1997 Software quality characteristics and metrics – Part 1: Quality characteristics and sub-characteristics*. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, 1997.
21. *ISO/IEC 25000:2005 Software and system engineering – Software product quality requirements and evaluation (Square) – Guide to square*. International Organization for Standardization, 2005.
22. *ISO/IEC 25010:2011 Systems and software engineering-systems and software quality requirements and evaluation (SQuARE)-system and software quality models*. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, 2011.
23. Nielsen J. A home-page overhaul using other web sites. *IEEE Software*, 1995, vol. 12, no. 3, pp. 75–78.
24. Cheung W. M., Huang W. An investigation of commercial usage of the world wide web: A picture from Singapore. *International Journal of Information Management*, 2002, vol. 22, no. 5, pp. 377–388.
25. Olsina L., Rossi G. Measuring web application quality with web-qem. *IEEE Multimedia*, 2002, vol. 9, no. 4, pp. 20–29.
26. Calero C., Ruiz J., Piattini M. Classifying web metrics using the web quality model. *Online Information Review*, 2005, vol. 29, no. 3, pp. 227–248.
27. Abrahao S., Insfran E. Early usability evaluation in model driven architecture environments. *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Quality Software*. IEEE Computer Society, 2006, pp. 287–294.
28. Seffah A., Donyaee M., Kline R. B., Padda H. K. Usability measurement and metrics: A consolidated model. *Software Quality Journal*, 2006, vol. 14, no. 2, pp. 159–178.
29. Mich L., Franch M., Cilione G. The 2qcv3q quality model for the analysis of web site requirements. *Journal of Web Engineering*, 2003, vol. 2, no. 1–2, pp. 115–127.
30. Mich L., Franch M., Gaio L. Evaluating and designing web site quality. *IEEE MultiMedia*, 2003, vol. 10, no. 1, pp. 34–43.

31. Hasan L., Abuelrub E. Assessing the quality of web sites. *INFOCOMP Journal of Computer Science*, 2008, vol. 7, no. 4, pp. 11–20.
32. Polillo R., Harth A., Koch N. (eds.) Quality models for web [2.0] sites: A methodological approach and a proposal. *Current Trends in Web Engineering (ICWE 2011). Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2011, vol. 7059, pp. 251–265.
33. Rocha Á. Framework for a global quality evaluation of a website. *Online Information Review*, 2012, vol. 36, no. 3, pp. 374–382.
34. Strauss A. L. *Qualitative Analysis for Social Scientists*. UK, Cambridge University Press, 1987.
35. Straus A., Corbin J. *Basics of Qualitative Research: Grounded Theory Procedures and Techniques*. New York, SAGE, 1990, 272 p.
36. Strauss A., Corbin J., Denzin N. K., Lincoln Y. S. (eds.) Grounded theory methodology. *Handbook of Qualitative Research*. Thousand Oaks, CA, Sage, 1994, vol. 17, pp. 273–85.
37. Strauss A., Corbin J. *Basics of Qualitative Research: Techniques and Procedures for Developing Grounded Theory*. 2nd ed. Thousand Oaks, CA, SAGE, 1998, 336 p.
38. Charmaz K. *Constructing Grounded Theory: A Practical Guide Through Qualitative Research*. London, SAGE, 2006, 208 p.
39. Aladwani A. M., Palvia P. C. Developing and validating an instrument for measuring userperceived web quality. *Information & Management*, 2001, vol. 39, no. 6, pp. 467–476.
40. Gledec G. Quality model for the world wide web. *Proceedings of the 8th International Conference on Telecommunications-(ConTEL), Zagreb, Croatia, 15 – 17 June 2005*. Zagreb, 2005, pp. 162–166.
41. Gledec G. Evaluating web site quality. *Proceedings of the 7th Internet Users Conference (CUC2005)*. Croatia, 2005.
42. Nielsen J. *Designing Web Usability: The Practice of Simplicity*. New Riders Publishing, 1999, 432 p.
43. Grose E., Forsythe C., Ratner J. Using web and traditional style guides to design web interfaces. *Human Factors and Web Development*, 1998, pp. 121–131.
44. Vora P., Grose E., Forsythe C., Ratner J. (eds.) Human factors methodology for designing web sites. *Human Factors and Web Development*. New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, 1998, pp. 153–172.
45. Vora P. *Web Application Design Patterns*. Morgan Kaufmann, 2009, 448 p.
46. Melody I. Y., Rashmi S. R., Marti H. A. Empirically validated web page design metrics. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2001, pp. 53–60.
47. Ranganathan C., Ganapathy S. Key dimensions of business-to-consumer web sites. *Information & Management*, 2002, vol. 39, no. 6, pp. 457–465.
48. Moustakis V., Litos C., Dalivigas A., Tsironis L. Website quality assessment criteria. *Proceedings of International Conference on Information Quality, Boston, MIT, 5–7 November 2004*. Boston, 2004, pp. 59–73.
49. DeLone W. H., McLean E. R. Information systems success: The quest for the dependent variable. *Information Systems Research*, 1992, vol. 3, no. 1, pp. 60–95.
50. Molla A., Licker P. S. E-commerce systems success: An attempt to extend and respecify the delone and macleane model of its success. *Journal of Electronic Commerce Research*, 2001, vol. 2, no. 4, pp. 131–141.
51. Zhang P., Gisela M. User expectations and rankings of quality factors in different web site domains. *International Journal of Electronic Commerce*, 2002, vol. 6, no. 2, pp. 9–33.
52. Parasuraman A., Zeithaml V. A., Berry L. L. A conceptual model of service quality and its implications for future research. *Journal of Marketing*, 1985, pp. 41–50.
53. Zhang P., Von Dran G. Expectations and rankings of web site quality features: Results of two studies on user perceptions. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, Hawaii, 3–6 January 2001*. Maui, 2001.
54. Ruiz J., Calero C., Piattini M. A three dimensional web quality model. *International Conference on Web Engineering*. Springer, 2003, pp. 384–385.
55. Polillo R. *Il Check-up Dei Siti Web*. Apogeo Editore, 2004, 303 p.
56. Signore O. A comprehensive model for web sites quality. *Proceedings of WSE2005 – 7th IEEE International Symposium on Web Site Evolution, Budapest, Hungary, 26 September 2005*. Budapest, 2005, pp. 30–36.
57. Moraga Á., Calero C., Piattini M. Comparing different quality models for portals. *Online Information Review*, 2006, vol. 30, no. 5, pp. 555–568.
58. Mills J., Bonner A., Francis K. The development of constructivist grounded theory. *International Journal of Qualitative Methods*, March 2006, vol. 5, no. 1, pp. 1–10.
59. Heimlich J. Evaluating the content of web sites. *Environmental Education and Training Partnership Resource Library, Ohio State University Extension*, 1999.
60. Benbunan-Fich R. Using protocol analysis to evaluate the usability of a commercial web site. *Information & Management*, 2001, vol. 39, no. 2, pp. 151–163.

61. Cox J., Dale B. G. Key quality factors in web site design and use: An examination. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2002, vol. 19, no. 7, pp. 862–888.
62. Koufaris M. Applying the technology acceptance model and flow theory to online consumer behavior. *Information Systems Research*, 2002, vol. 13, no. 2, pp. 205–223.
63. Loiacono E. T., Watson R. T., Goodhue D. L. Webqual: A measure of website quality. *Marketing Theory and Applications*, 2002, vol. 13, no. 3, pp. 432–438.
64. Osborne C., Rinalducci J. *Evaluation of Web Based Resources Within the Art History Discipline*. University of North Carolina, Tech. Rep., 2002.
65. Delone W. H., McLean E. R. The delone and mclean model of information systems success: A ten-year update. *Journal of Management Information Systems*, 2003, vol. 19, no. 4, pp. 9–30.
66. Tan F. B., Tung L. L. Exploring website evaluation criteria using the repertory grid technique: A web designers' perspective. *Proceedings of the 2nd Annual Workshop on HCI Research in MIS*. Seattle, WA, 2003, pp. 65–69.
67. Van der Heijden H., Verhagen T., Creemers M. Understanding online purchase intentions: Contributions from technology and trust perspectives. *European Journal of Information Systems*, March 2003, vol. 12, no. 1, pp. 41–48. Available at: <https://doi.org/10.1057/palgrave.ejis.3000445>.
68. Lin O., Joyce D. Critical success factors for online auction web sites. *Proceedings of the 17th NACCCQ, Christchurch, New Zealand, 6–9 July 2004*. Christchurch, 2004, pp. 341–344.
69. Ahn T., Ryu S., Han I. The impact of web quality and playfulness on user acceptance of online retailing. *Information & Management*, 2007, vol. 44, no. 3, pp. 263–275.
70. Treiblmaier H., Pinterits A. Developing metrics for web sites. *Journal of Computer Information Systems*, 2010, vol. 50, no. 3, pp. 1–10.
71. Hasan L., Abuelrub E. Assessing the quality of web sites. *Applied Computing and Informatics*, 2011, vol. 9, no. 1, pp. 11–29.
72. Thelwall M. A layered approach for investigating the topological structure of communities in the web. *Journal of Documentation*, 2003, vol. 59, no. 4, pp. 410–429.
73. Koyanl S. J., Balley R. W., Nall J. R. *Research-based Web Design and Usability Guidelines*. National Cancer Institute, 2004, 232 p.
74. Carlos F., Raquel G., Carlos O. *The Relevance of Web Design for the Website Success: A Heuristic Analysis*. University of Zaragoza, 2008.
75. Huang W., Wang X. *Lund University Website Evaluation: Focus on Homepage and English Research Pages. Master's Thesis*. Lund University, Sweden, 2009.
76. Olsina L., Godoy D., Lafuente G., Rossi G. Assessing the quality of academic websites: A case study. *New Review of Hypermedia and Multimedia*, 1999, vol. 5, no. 1, pp. 81–103.
77. Agarwal R., Venkatesh V. Assessing a firm's web presence: A heuristic evaluation procedure for the measurement of usability. *Information Systems Research*, 2002, vol. 13, no. 2, pp. 168–186.
78. Palmer J. W. Web site usability, design, and performance metrics. *Information Systems Research*, 2002, vol. 13, no. 2, pp. 151–167.
79. Konradt U., Wandke H., Balazs B., Christophersen T. Usability in online shops: Scale construction, validation and the influence on the buyers' intention and decision. *Behaviour & Information Technology*, 2003, vol. 22, no. 3, pp. 165–174.
80. Leavitt M. O., Shneiderman B. *Based Web Design & Usability Guidelines*. US Department of Health and Human Services Washington, DC, 2006, 294 p.
81. Rababah O., Hamtini T. Causal interrelations among e-business website quality factors. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 137–158.
82. Gehrke D., Turban E. Determinants of successful website design: Relative importance and recommendations for effectiveness. *Proceedings of the 32nd Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI, USA, 5–8 January 1999*. Maui, 1999.
83. Lee Y. W., Strong D. M., Kahn B. K., Wang R. Y. Aimq: A methodology for information quality assessment. *Information & Management*, 2002, vol. 40, no. 2, pp. 133–146.
84. Singh I., Sook A. An evaluation of the usability of south african university web sites. *Proceedings of the 2002 CITTE Conference*. Durban, South Africa, 2002.
85. Rosenfeld L., Morville P. *Information Architecture for the World Wide Web*. 2nd ed. Sebastopol, CA, USA, O'Reilly & Associates, Inc., 2002, 13 p..
86. Beck S. *Evaluation Criteria: The Good, the Bad & the Ugly: Or, Why it's a Good Idea to Evaluate Web Sources*, 1997. Available at: <http://lib.nmsu.edu/instruction/eval.html> (accessed 14.11.2019).
87. Zhu X., Gauch S. Incorporating quality metrics in centralized/distributed information retrieval on the world wide web. *Proceedings of the 23rd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. Athens, Greece, ACM, 2000, pp. 288–295.

88. Beck K. *Test-driven Development: By example*. Addison-Wesley Professional, 2003, 216 p.
89. Fitzpatrick R. Additional quality factors for the world wide web. *Proceedings of the 2nd World Congress for Software Quality, Yokohama*. Union of Japanese Scientists and Engineers, Tokyo, 2000.
90. Liu C., Arnett K. P. Exploring the factors associated with web site success in the context of electronic commerce. *Information & Management*, 2000, vol. 38, no. 1, pp. 23–33.
91. Srivihok A. An assessment tool for electronic commerce: End user evaluation of web commerce sites. Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok, Tech. Rep., 2000.
92. Fogg B. J., Marshall J., Laraki O., Osipovich A., Varma C., ..., Swani P. What makes web sites credible?: A report on a large quantitative study. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2001, pp. 61–68.
93. Barnes S. J., Vidgen R. T. Assessing the quality of auction web sites. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, Hawaii, 3–6 January 2001*. Maui, 2001, 10 p.
94. Barnes S. J., Vidgen R. T. An integrative approach to the assessment of e-commerce quality. *Journal of Electronic Commerce Research*, 2002, vol. 3, no. 3, pp. 114–127.
95. Cao M., Zhang Q. Evaluating e-commerce web site design: A customer's perspective. *Proceedings of Decision Sciences Institute 2002 Annual Meeting, San Diego, California, 23–26 November 2002*. San Diego, 2002, pp. 1186–1191.
96. Madeja N., Schoder D. Designed for success-empirical evidence on features of corporate web pages. *Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, Big Island, HI, USA, 6–9 January 2003*. Big Island, 2003, 10 p.
97. Choudrie J., Ghinea G., Weerakkody V. Evaluating global e-government sites: A view using web diagnostics tools. *Electronic Journal of E-Government*, 2004, vol. 2, no. 2, pp. 105–114.
98. Kokkinaki I. A., Mylonas S., Mina S. Egovernment initiatives in Cyprus. *E-Government Workshop (eGOV05) of the Brunel University*. UK, 2005.
99. Mendo F. A. The evolution of smes web sites in the UK. *Proceedings of the 9th European Conference on Software Maintenance and Reengineering, Manchester, UK, 21–23 March 2005*. Manchester, 2005, pp. 294–297.
100. Lautenbach M. A. E., Ter Schegget I. E., Schoute A. E., Witteman C. L. M. Evaluating the usability of web pages: A case study. *Artificial Intelligence Preprint Series*, 2008, vol. 11.
101. ISO/IEC, ISO/IEC-14598-3:1998 *Information technology – Software product evaluation – Part 3: Process for developers*. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, 2002.
102. ISO/IEC, ISO/IEC FCD 9126-1.2: 1998 *Information technology – Software product quality – Part 1: Quality model: Draft*. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission, 1998.
103. Madu C. N., Madu A. A. Dimensions of e-quality. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2002, vol. 19, no. 3, pp. 246–258.
104. Dholakia U. M., Rego L. L. What makes commercial web pages popular? An empirical investigation of web page effectiveness. *European Journal of Marketing*, 1998, vol. 32, no. 7/8, pp. 724–736.
105. Lee Y., Kozar K. A. Investigating the effect of website quality on e-business success: An analytic hierarchy process (AHP) approach. *Decision Support Systems*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 1383–1401.
106. Delone W. H., Mclean E. R. Measuring e-commerce success: Applying the delone & mclean information systems success model. *International Journal of Electronic Commerce*, 2004, vol. 9, no. 1, pp. 31–47.
107. Singh M., Costabile A., Paull S. *E-commerce and Customer Relationship Management (ECRM)*. Melbourne, Heidelberg Press, 2001, pp. 95–108.
108. Krauss K. Testing an e-government website quality questionnaire: A pilot study. *Proceedings of the 5th Annual Conference on World Wide Web Applications (WWW2003), Budapest, Hungary, 20–24 May 2003*. Budapest, 2003.
109. Cao M., Zhang Q., Seydel J. B2c e-commerce web site quality: An empirical examination. *Industrial Management & Data Systems*, 2005, vol. 105, no. 5, pp. 645–661.
110. Loiacono E. T., Watson R. T., Goodhue D. L. Webqual: An instrument for consumer evaluation of web sites. *International Journal of Electronic Commerce*, 2007, vol. 11, no. 3, pp. 51–87.
111. Bilsel R. U., Büyüközkan G., Ruan D. A fuzzy preference-ranking model for a quality evaluation of hospital web sites. *International Journal of Intelligent Systems*, 2006, vol. 21, no. 11, pp. 1181–1197.
112. Vijayan P., Shanmugam B. Service quality evaluation of internet banking in Malaysia. *The Journal of Internet Banking and Commerce*, 1970, vol. 8, no. 1, pp. 1–10.
113. Gefen D., Karahanna E., Straub D. W. Trust and tam in online shopping: An integrated model. *MIS Quarterly*, 2003, vol. 27, no. 1, pp. 51–90.
114. Lin F.-J., Huarng K., Chen Y.-M., SLin.-M. Quality evaluation of web services. *E-Commerce Technology for Dynamic E-Business*, 2004, pp. 226–233.

115. Abanumy A., Al-Badi A., Mayhew P. E-government website accessibility: In-depth evaluation of Saudi Arabia and Oman. *The Electronic Journal of E-Government*, 2005, vol. 3, no. 3, pp. 99–106.
116. Okello-Obura C. Assessment of quality of East African governments' websites and support to SMEs in business information provision. *Library Philosophy and Practice*, 2015, paper 1213.
117. Olsina L. *Metodología Cuantitativa Para la Evaluación y Comparación de la Calidad de Sitios Web*. Ph. D. Dissertation. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 1999, 274 p.
118. *Quality principles for cultural websites: A handbook*. Minerva Group, Rome, Italy, La Tipografia, 2005, 66 p.
119. Heimlich J. E., Wang K. Evaluating the structure of web sites. *Environmental Education and Training Partnership Resource Library, Ohio State University Extension*. USA, 1999.
120. Singh M., Fisher J. Electronic commerce issues: A discussion of two exploratory studies. *Proceedings of the Electronic 3rd Annual Conference on Electronic Commerce*. Victoria University, New Zealand, 1999.
121. Zhang X., Keeling K. B., Pavur R. J. Information quality of commercial web site home pages: An explorative analysis. *Proceedings of the 21st International Conference on Information Systems, Brisbane, Australia, 10–13 December 2000*. Brisbane, 2000, pp. 164–175.
122. Basu A. Context-driven assessment of commercial web sites. *Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences, Big Island, HI, USA, 10 January 2002*. Big Island, 2002.
123. Chung W., Paynter J. An evaluation of internet banking in New Zealand. *Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences*. Big Island, HI, USA, 10 January 2002. Big Island, 2002, pp. 2410–2419.
124. Achour H., Bensedrine N. An evaluation of internet banking and online brokerage in Tunisia. *Proceedings of the 1st International Conference on E-Business and E-learning and E-learning, Amman, Jordan, 23–24 May 2005*. Amman, 2005, pp. 147–158.
125. Chanaron J. Evaluating e-learning: The case of automotive small-medium suppliers. *Proceedings of the 1st International Conference on e-Business and E-learning, Amman, Jordan, 23–24 May 2005*. Amman, 2005, pp. 13–25.
126. Ma H.-Y. T., Zaphiris P. The usability and content accessibility of the e-government in the UK. *Proceedings of Human Computer Interaction International Conference, Crete, Greece, 22–27 June 2003*. Crete, 2003.
127. Yoo B., Donthu N. Developing a scale to measure the perceived quality of an internet shopping site (SITEQUAL). *Quarterly Journal of Electronic Commerce*, 2001, vol. 2, no. 1, pp. 31–45.
128. Yoo S., Jin J. Evaluation of the home page of the top 100 university websites. *Academy of Information and Management Sciences*, 2004, vol. 8, no. 2, pp. 57–69.
129. Shedroff N. *Recipe for a Successful Web Site*, 1997. Available at: <http://nathan.com/recipe-for-a-successful-website/> (accessed 14.11.2019).
130. Fogg B. J., Marshall J., Osipovich A., Varma C., Larakis O., ..., Swani P. Elements that affect web credibility: Early results from a self-report study. *Proceedings of CHI'00 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2000, pp. 287–288.
131. Ivory M. Y., Hearst M. A. Improving web site design. *IEEE Internet Computing*, 2002, vol. 6, no. 2, pp. 56–63.
132. Hussin H., Mohd A. S., Mustafa M. E-commerce and ethical web design: Applying the BBBonline guidelines on Malaysian websites. *The International Arab Journal of Information Technology*, 2005, vol. 2, no. 3, pp. 219–227.

Information about the author

Siddikjon Gaibullojonovich Abduganiev, obtained his Master's Degree of Science in Systems Engineering with honors from the Khujand branch of the Technological University of Tajikistan (KBTUT) in 2007. Until 2012, he has worked as an assistant professor at KBTUT and the Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University. He has earned his PhD degree from the Johannes Kepler University Linz, Austria. His core research areas are software development and testing.

Информация об авторе

Абдуганиев Сиддикдҷон Гайбуллоҷонович, получил степень магистра наук с отличием в области системотехники в Худжандском филиале Технологического университета Таджикистана (ХФТУТ) в 2007 г. До 2012 года работал ассистентом кафедры в ХФТУТ и Худжандском политехническом институте Таджикского технического университета. Получил докторскую степень в Университете имени Иоганна Кеплера в г. Линц, Австрия. Основные научные направления – разработка и тестирование программного обеспечения.

Правила для авторов

Редакция журнала «Информатика» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами:

1. Статьи принимаются в редакцию через электронную систему подачи по адресу <http://inf.grid.by> в формате файлов текстовых редакторов Microsoft Word. Основной текст статьи не должен превышать 17 стр., включая рисунки, таблицы и достаточное количество наиболее актуальных ссылок; обзорной статьи – 10 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.

Изложенный в статье материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы).

2. 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).

3. Статья в обязательном порядке должна иметь следующую структуру: индекс по универсальной десятичной классификации (УДК); инициалы и фамилии всех авторов, название статьи, полное название учреждений, где работают авторы, с указанием города, страны, аннотацию (150–250 слов), подрисуночные надписи, названия таблиц и ключевые слова (7–10) на русском и английском языках, адрес электронной почты контактного лица.

4. Аннотация (авторское резюме) должна кратко представлять результаты работы и быть информативной, содержательной. Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение.

5. 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. Подрисуночные подписи с расшифровкой всех позиций, представленных на рисунке, набираются шрифтом гарнитуры основного текста размером 9 пт. Цветные иллюстрации печатаются только в том случае, когда это необходимо для понимания излагаемого материала.

6. 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, CHCl₃); цифры (римские и арабские); векторы; индексы (верхние и нижние), являющиеся сокращениями слов. Курсивом набираются латинские буквы, символы физических величин (в том числе и в индексе).

7. Сокращения в тексте статьи (за исключением единиц измерения) могут быть использованы только после упоминания полного термина. Единицы измерения физических величин следует приводить в Международной системе единиц (СИ).

8. Цитируемые в статье фамилии авторов теорем, теорий, законов и т. д. следует приводить в скобках на языке оригинала после русского написания. Например, теорема Эйлера (Euler).

9. 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 приводится список цитированных источников в *романском* (латинском) алфавите со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

11. Поступившие в редакцию статьи направляются на рецензирование специалистам. Основными критериями целесообразности публикации являются новизна и информативность статьи. Если по рекомендациям рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редколлегии.

12. Статьи, направляемые на доработку, должны быть возвращены в исправленном виде с ответами на все замечания.

13. Редакция журнала предоставляет возможность первоочередного опубликования статей, представленных лицами, которые осуществляют послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство) в год завершения обучения.

14. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, уже опубликованных ранее или принятых к публикации другими изданиями.

15. Редакция оставляет за собой право на редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи. Окончательное решение о публикации принимается редакционной коллегией.

Индексы

00827

для индивидуальных
подписчиков

008272

для предприятий и
организаций