

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**



*Информационные системы.
Информатика.
Проблемы информационной безопасности*

*Роботизированные комплексы и системы.
Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля*

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

*Микро- и нанoeлектроника.
Физика конденсированного состояния*

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств. Управление в организационных системах*

Управление качеством продукции. Стандартизация

Мировоззренческие основы технологии и общества



ISSN 2782-3210 (Print)
ISSN 2500-316X (Online)

RUSSIAN TECHNOLOGICAL JOURNAL

**РОССИЙСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
- Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
- Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
- Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
- Аналитическое приборостроение и технологии
- Математическое моделирование
- Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств. Управление в организационных системах
- Управление качеством продукции. Стандартизация
- Мировоззренческие основы технологии и общества
- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
- Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing
- Modern radio engineering and telecommunication systems
- Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics
- Analytical instrument engineering and technology
- Mathematical modeling
- Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries. Management in organizational systems
- Product quality management. Standardization
- Philosophical foundations of technology and society

Russian Technological Journal
2021, том 9, № 6

Russian Technological Journal
2021, Vol. 9, No. 6

<https://www.rtj-mirea.ru>



Russian Technological Journal 2021, том 9, № 6

Дата опубликования 30 ноября 2021 г.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радио-технических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

Периодичность: один раз в два месяца.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 г. издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026), а с января 2016 г. по июль 2021 г. под названием «Российский технологический журнал» (ISSN 2500-316X).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доктора наук, индексируется в РГБ, РИНЦ, elibrary, Соционет, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Open Archives Initiative, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор, президент ФГБОУ ВО
МИРЭА – Российский технологический университет
(РТУ МИРЭА), Москва, Россия.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Редакция:

Зав. редакцией	к.т.н. Г.Д. Середина
Научный редактор	д.т.н., проф. Г.В. Куликов
Выпускающий редактор	А.С. Алексеенко
Технический редактор	Д.В. Трофимова

119571, г. Москва, пр-т Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77 - 81733
от 19.08.2021 г. выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор).

<https://www.rty-mirea.ru>

Russian Technological Journal 2021, Vol. 9, No. 6

Publication date November 30, 2021.

The peer-reviewed scientific and technical journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Periodicity: bimonthly.

The journal was founded in December 2013. The titles were «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026) and «Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal» from January 2016 until July 2021 (ISSN 2500-316X).

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

«MIREA – Russian Technological University»
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia.

The journal is included into the List of peer-reviewed science press of the State Commission for Academic Degrees and Titles of Russian Federation.

The Journal is included in RSL (Russian State Library), Russian citation index, elibrary, Socionet, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Directory of Open Access Scholarly Resources (ROAD), Google Scholar, Open Archives Initiative, Ulrich's International Periodicals Directory.

Editor-in-Chief:

Alexander S. Sigov, Academician at the Russian Academy
of Sciences, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
President of MIREA – Russian Technological University
(RTU MIREA), Moscow, Russia.
Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017,
sigov@mirea.ru.

Editorial staff:

Managing Editor	Cand. Sci. (Eng.) Galina D. Seredina
Scientific Editor	Dr. Sci. (Eng.), Prof. Gennadiy V. Kulikov
Executive Editor	Anna S. Alekseenko
Technical Editor	Darya V. Trofimova

86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Registration Certificate ПИ № ФС 77 - 81733,
issued in August 19, 2021 by the Federal Service for
Supervision of Communications, Information Technology, and
Mass Media of Russia.

Редакционная коллегия

Кудж Станислав Алексеевич	профессор, д.т.н., ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Банис Юрас Йонович	профессор, хабилитированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва, Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
Боков Алексей Алексеевич	старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Буслаева Татьяна Максимовна	профессор, д.х.н., РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru
Буш Александр Андреевич	профессор, д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847 , bush@mirea.ru
Вахрушев Сергей Борисович	профессор, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (РАН), профессор кафедры Физической электроники СПбГПУ, Санкт-Петербург, Россия, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Голованова Наталья Борисовна	профессор, д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru
Гуляев Юрий Васильевич	академик РАН, член Президиума РАН, профессор, д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия, Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Жуков Дмитрий Олегович	профессор, д.т.н., заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Кимель Алексей Вольдемарович	профессор, к.ф.-м.н., Университет Радбауд, г. Наймерген, Нидерланды, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Кондратенко Владимир Степанович	профессор, д.т.н., заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru
Крамаров Сергей Олегович	профессор, д.ф.-м.н., Сургутский государственный университет, Сургут, Россия, Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Мишина Елена Дмитриевна	профессор, д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016 , mishina@mirea.ru
Пасечник Сергей Вениаминович	профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761 , pasechnik@mirea.ru
Перно Филипп	профессор, Центральная Школа г. Лилль, Франция, Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Романов Михаил Петрович	профессор, д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Савиных Виктор Петрович	член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Соколов Виктор Васильевич	профессор, д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru
Тимошенко Андрей Всеволодович	профессор, д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru
Фетисов Юрий Константинович	профессор, д.ф.-м.н., профессор кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru
Харин Юрий Семенович	член-корр. НАН Беларуси, профессор, д.ф.-м.н., директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Цветков Виктор Яковлевич	профессор, д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru

Editorial Board

Stanislav A. Kudzh	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56521711400, ResearcherID AAG-1319-2019, https://orcid.org/0000-0003-1407-2788 , rector@mirea.ru
Juras Banys	Habilitation Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania, Scopus Author ID 7003687871, juras.banys@ff.vu.lt
Alexei A. Bokov	Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, http://orcid.org/0000-0003-1126-3378 , abokov@sfu.ca
Tatyana M. Buslaeva	Dr. Sci. (Chem.), Professor, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru
Alexander A. Bush	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, http://orcid.org/0000-0003-3990-9847 , bush@mirea.ru
Sergey B. Vakhrushev	Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences (RAS), Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, http://orcid.org/0000-0003-4867-1404 , s.vakhrushev@mail.ioffe.ru
Nataliya B. Golovanova	Dr. Sci. (Econ.), Professor, Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru
Yury V. Gulyaev	Academician at the RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russia, Scopus Author ID 35562581800, gulyaev@cplire.ru
Dmitry O. Zhukov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru
Alexey V. Kimel	PhD (Phys.–Math.), Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848, ResearcherID D-5112-2012, a.kimel@science.ru.nl
Vladimir S. Kondratenko	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru
Sergey O. Kramarov	Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Surgut State University, Surgut, Russia, Scopus Author ID 56638328000, ResearcherID E-9333-2016, https://orcid.org/0000-0003-3743-6513 , mavoo@yandex.ru
Elena D. Mishina	Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, http://orcid.org/0000-0003-0387-5016 , mishina@mirea.ru
Sergey V. Pasechnik	Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, http://orcid.org/0000-0002-6050-2761 , pasechnik@mirea.ru
Philippe Pernod	Professor, Dean of Research, University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France, Scopus Author ID 7003429648, philippe.pernod@ec-lille.fr
Mikhail P. Romanov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 14046079000, https://orcid.org/0000-0003-3353-9945 , m_romanov@mirea.ru
Viktor P. Savinykh	Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru
Viktor V. Sokolov	Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Adviser on Scientific Work of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru
Andrey V. Timoshenko	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru
Yury K. Fetisov	Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru
Yury S. Kharin	Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, Scopus Author ID 6603832008, http://orcid.org/0000-0003-4226-2546 , kharin@bsu.by
Viktor Ya. Tsvetkov	Dr. Sci. (Eng.), Professor, Councilor of the Administration of RTU MIREA, Moscow, Russia, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru

Содержание

Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности

- 7** *И.Ю. Сесин, Р.Г. Болбаков*
Сравнительный анализ методов оптимизации программного обеспечения для борьбы с предикацией ветвлений на графических процессорах
- 16** *В.А. Сизов, А.Д. Киров*
Разработка моделей аналитической системы обработки данных для мониторинга ИБ объекта информатизации, использующего облачную инфраструктуру

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

- 26** *В.В. Слепцов, В.Л. Афонин, А.Е. Аблаева, Динь Ба Фыонг*
Разработка информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- 37** *Е.В. Гуров, С.У. Увайсов, В.В. Черноверская, Р.М. Увайсов*
Проектирование преселектора радиоприемника в диапазоне метровых волн
- 46** *Г.В. Куликов, До Чунг Тиен, Е.В. Самохина*
Оптимальная нелинейная фильтрация сигналов М-ФМ на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой

Аналитическое приборостроение и технологии

- 57** *Н.Е. Староверов, А.Ю. Грязнов, И.Г. Камышанская, Н.Н. Потрахов, Е.Д. Холопова*
Метод повышения информативности рентгеновских снимков

Математическое моделирование

- 64** *А.С. Сигов, В.Я. Цветков, И.Е. Рогов*
Методы оценки сложности тестирования в сфере образования

Мировоззренческие основы технологии и общества

- 73** *Е.С. Горнев, И.В. Матюшкин*
Дискуссия по книге С.М. Крылова «Неокибернетика» (2008)

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- 7** *Igor Yu. Sesin, Roman G. Bolbakov*
Comparative analysis of software optimization methods in context of branch predication on GPUs
- 16** *Valerii A. Sizov, Aleksey D. Kirov*
The development of models of an analytical data processing system for monitoring information security of an informatization object using cloud infrastructure

Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

- 26** *Vladimir V. Sleptsov, Vyacheslav L. Afonin, Anna E. Ablaeva, Dinh Ba Phuong*
Development of an information measuring and control system for a quadcopter

Modern radio engineering and telecommunication systems

- 37** *Egor V. Gurov, Saygid U. Uvaysov, Victoria V. Chernoverskaya, Ruslan M. Uvaysov*
Very high frequency radio receiver preselector design
- 46** *Gennady V. Kulikov, Do Trung Tien, Elena V. Samokhina*
Optimal nonlinear filtering of M-PSK signals against a background of harmonic interference with a random initial phase

Analytical instrument engineering and technology

- 57** *Nikolay E. Staroverov, Artem Y. Gryaznov, Irina G. Kamyshanskaya, Nikolay N. Potrakhov, Ekaterina D. Kholopova*
The method of increasing the information content of microfocus X-ray images

Mathematical modeling

- 64** *Alexander S. Sigov, Viktor Ya. Tsvetkov, Igor E. Rogov*
Method for assessing testing difficulty in educational sphere

Philosophical foundations of technology and society

- 73** *Evgeny S. Gornev, Igor V. Matyushkin*
A discussion of S.M. Krylov's book «Neocybernetics» (2008)

УДК 004.051
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-7-15>



ОБЗОР

Сравнительный анализ методов оптимизации программного обеспечения для борьбы с предикацией ветвлений на графических процессорах

И.Ю. Сесин[®],
Р.Г. Болбаков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: isesin@protonmail.com

Резюме. Технология GPGPU (General Purpose computing for Graphical Processing Units – расчеты общего назначения на графических процессорах) является мощным инструментом для переноса задач параллельной обработки информации на GPU (Graphical Processing Unit – графический процессор). Эта технология находит применение практически в любой области, требующей проведения массы параллельных расчетов, и применяется как в научной и коммерческой, так и в любительской среде. Разработчики программ общего назначения, запускаемых на GPU, неизбежно сталкиваются с падением производительности ввиду предикации ветвления кода. В условиях предикации ветвления исполняются обе ветви условного оператора вне зависимости от истинности условия, но посредством маскирования выполняемых инструкций программа учитывает только результат работы верной ветви. Из-за этого программы общего назначения, имеющие большие участки кода, скрытые за условными операторами, становятся существенно менее производительными на графических процессорах. В статье рассматриваются существующие в предметной области методы и подходы к увеличению производительности программного обеспечения в рамках их применимости к решению проблемы падения производительности при предикации. Приводится описание методов, их сильных и слабых сторон, а также рамок их применимости, на базе чего делается заключение о возможности их использования на GPU. В число рассмотренных методов и подходов вошли следующие: оптимизирующие компиляторы, JIT-компиляция, предсказатель переходов, спекулятивное исполнение, адаптивная оптимизация, специализация алгоритма во время исполнения, оптимизация на основе профилирования. Показано, что указанные аппаратные и программные подходы к увеличению производительности программного обеспечения преимущественно ориентированы на решение проблем специфичных для CPU (Central Processing Unit – центральный процессор) и в целом неприменимы для разрешения потерь производительности при предикации на GPU. Указывается на необходимость создания отдельного подхода, ориентированного именно на решение проблемы предикации ветвления на GPU.

Ключевые слова: расчеты общего назначения на графических процессорах, оптимизирующие компиляторы, предикация

• Поступила: 22.03.2021 • Доработана: 26.05.2021 • Принята к опубликованию: 25.07.2021

Для цитирования: Сесин И.Ю., Болбаков Р.Г. Сравнительный анализ методов оптимизации программного обеспечения для борьбы с предикацией ветвлений на графических процессорах. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):7–15. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-7-15>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

Comparative analysis of software optimization methods in context of branch predication on GPUs

Igor Yu. Sesin[@],
Roman G. Bolbakov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: isesin@protonmail.com

Abstract. General Purpose computing for Graphical Processing Units (GPGPU) technology is a powerful tool for offloading parallel data processing tasks to Graphical Processing Units (GPUs). This technology finds its use in variety of domains – from science and commerce to hobbyists. GPU-run general-purpose programs will inevitably run into performance issues stemming from code branch predication. Code predication is a GPU feature that makes both conditional branches execute, masking the results of incorrect branch. This leads to considerable performance losses for GPU programs that have large amounts of code hidden away behind conditional operators. This paper focuses on the analysis of existing approaches to improving software performance in the context of relieving the aforementioned performance loss. Description of said approaches is provided, along with their upsides, downsides and extents of their applicability and whether they address the outlined problem. Covered approaches include: optimizing compilers, JIT-compilation, branch predictor, speculative execution, adaptive optimization, run-time algorithm specialization, profile-guided optimization. It is shown that the aforementioned methods are mostly catered to CPU-specific issues and are generally not applicable, as far as branch-predication performance loss is concerned. Lastly, we outline the need for a separate performance improving approach, addressing specifics of branch predication and GPGPU workflow.

Keywords: general-purpose computing for graphical processing units, optimizing compilers, predication

• Submitted: 22.03.2021 • Revised: 26.05.2021 • Accepted: 25.07.2021

For citation: Sesin I.Yu., Bolbakov R.G. Comparative analysis of software optimization methods in context of branch predication on GPUs. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):7–15 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-7-15>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Графические процессоры или GPU (Graphical Processing Unit), являются специализированным аппаратным обеспечением, выполняющим обработку

графической информации. В отличие от центрального процессора (CPU) графические процессоры специализированы для параллельной обработки большого количества данных, что обуславливает определенные различия в их архитектурном построении:

- CPU имеют малое количество физических ядер (от 1 до 32), у GPU количество физических ядер на порядки больше (может исчисляться сотнями и тысячами)^{1,2} в зависимости от выбранного производителем аппаратного обеспечения баланса между числом ядер и их мощностью);
- ядра в CPU обладают дополнительным аппаратным функционалом, таким как собственные кеши, конвейеры инструкций и модули предсказания ветвлений. Ядра GPU являются очень простыми арифметическими ядрами, ориентированными на быструю работу с числами с плавающей точкой. Ряд современных GPU также включает специализированные ядра для трассировки лучей и тензорных вычислений [1, 2];
- CPU отделен от оперативной памяти, GPU имеют прямой доступ к видеопамяти, размещенной на той же плате;
- ядра GPU не могут записывать данные в области памяти, отведенные под исполняемый код;
- CPU попадает в классификацию MIMD (Multiple Instruction, Multiple Data), GPU попадает в классификацию SIMD (Single Instruction, Multiple Data) по Флинну [3].

С использованием технологии GPGPU (General Purpose computing on Graphical Processing Units – расчеты общего назначения на графических процессорах) становится возможным запуск программ на GPU, отличных от узкоспециализированных программ-шейдеров. Эта технология находит применение во многих областях – от майнинга криптовалют до обсчета сворачивания белков³.

Применяя технологию GPGPU, приходится столкнуться с определенными особенностями построения программ и их поведения в условиях исполнения на графическом процессоре. Так, например, в ходе написания GPGPU программы авторами настоящей статьи был замечен тренд падения ее

производительности по мере добавления функционала. При этом потери в производительности были гораздо более существенны, чем можно было бы предположить исходя из сложности алгоритма добавляемого функционала.

В ходе исследования вышеуказанной проблемы было установлено, что это случается в силу специфики SIMD архитектуры графических процессоров: при исполнении программой условного оператора возникает одна особенность – будут выполнены обе ветви, но операции неправильной ветви не будут применены. Эта особенность называется предикацией [4, с. 168] веток исполнения, и она нужна первоочередно для замещения зависимости от потока исполнения на зависимость от данных. Сама необходимость подобных мер оправдана тем, что большая аппаратная часть графического процессора архитектурно попадает в класс SIMD (Single Instruction, Multiple Data) таксономии Флинна [3]. Отдельные модули системы не могут иметь свои потоки исполнения и, соответственно, не могут следовать по различным ветвям условного оператора.

Степень влияния вышеуказанной особенности на программу разнится от программы к программе и коррелирует с количеством возможных настроек. Так, если программа изначально предназначена для решения одной максимально конкретизированной задачи без возможности настройки (например, расчет определенной хеш-функции), то влияние предикации будет сведено к минимуму.

Более подвержены падению производительности программы, выполняющие более общие задачи, и, следовательно, обладающие большим списком подключаемого или необязательного функционала, который будет задействован в процессе работы программы только при определенных входных данных.

Возьмем в качестве примера такой программы рендерер трехмерных сцен. Рендерингом в области компьютерной графики принято называть процесс получения изображения из определенных данных, характеризующих объекты отображаемой сцены. Программу, реализующую такой процесс, называют рендерером. Профессиональные рендереры могут включать в себя тысячи различных опций, изменяющих поведение программы – от настройки угла поля зрения камеры до детальной конфигурации двулучевой функции отражательной способности для каждой поверхности.

Взяв за пример программу-рендерер, представим ситуацию, в которой осуществляется рендеринг некоторой сцены с набором примитивов, которые могут лишь рассеивать или излучать свет, но не отражать его. В таком случае код, ответственный за расчет отражений, не должен вызываться, но само его наличие замедлит программу из-за предикации.

¹ Advanced Micro Devices, Inc, Graphics Specifications, 2021. URL: <https://www.amd.com/en/products/specifications/graphics>, дата обращения 01.03.2021. [Advanced Micro Devices, Inc, Graphics Specifications, 2021. URL: <https://www.amd.com/en/products/specifications/graphics>. Accessed March 1, 2021.]

² NVIDIA. Сравнение спецификаций видеокарт RTX 30. URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/geforce/graphics-cards/30-series/compare/?section=compare-specs>, дата обращения 01.03.2021. [NVIDIA. Comparison of specifications of RTX 30 video cards. URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/geforce/graphics-cards/30-series/compare/?section=compare-specs>. Accessed March 1, 2021.]

³ Houston M. General Purpose Computation on Graphics Processors (GPGPU). ATI HD 2000 Series. Launch, Tunis, Tunisia; 2007. URL: https://graphics.stanford.edu/~mhouston/public_talks/R520-mhouston.pdf, дата обращения 01.03.2021. [Houston M. General Purpose Computation on Graphics Processors (GPGPU). ATI HD 2000 Series. Launch, Tunis, Tunisia; 2007. URL: https://graphics.stanford.edu/~mhouston/public_talks/R520-mhouston.pdf. Accessed March 1, 2021.]

Для включения или выключения желаемого поведения программы в подавляющем большинстве случаев используются именно условные операторы, зависящие от некоторых входных данных программы, будь то просто данные или конфигурационные настройки.

Вместе с ростом функционала программы будет расти число условных операторов, соответственно, будут расти и издержки, затрачиваемые графическим процессором на обработку условных ветвей программы. Это, в свою очередь, приводит к появлению определенного потолка усложнения программы – после определенной критической массы ветвей программа замедлится настолько, что сработает внутренняя защита драйвера (при ее наличии) и выполнит аварийную остановку исполнения.

Примечательно, что с точки зрения программиста само наличие дополнительного кода замедляет программу, несмотря на то, что код не должен исполняться. Подобное поведение крайне нехарактерно для программ, исполняемых на CPU. Более того, правильное использование условных переходов зачастую является ключом к написанию более эффективных программ за счет предсказателя переходов, встроенного в ядра современных CPU.

ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрим существующие технологии оптимизации программ и увеличения производительности, оценивая их применимость для разрешения описанной проблемы.

Следует отметить, что в рамках этой статьи не будет попыток численного сравнения рассматриваемых методов. Это связано с тем, что практически все методы повышения производительности программного обеспечения опираются на определенную специфику оптимизируемой программы, аппаратной платформы или языка программирования. Методы, эффективные для одних программ, могут быть бесполезны и даже вредны для других. Качество внедрения того или иного метода также оказывает прямое влияние на получаемый результат, и один и тот же подход, внедренный по-разному, может давать разительно отличающиеся результаты. Конкретная метрика успешности применения методов зависит от многих факторов, как количественных, так и качественных, которые не могут быть исключены из исследования, не ставя под удар воспроизводимость самого исследования. С другой стороны, включение этих факторов сузит исследование до сравнения частных случаев, а именно, сравнения конкретных программ на конкретном аппаратном обеспечении

в конкретной конфигурации, что нерепрезентативно для описания общей картины.

В силу вышеуказанного авторы рассматривают главным образом качественные характеристики в ходе определения применимости методов улучшения производительности ПО.

Одну из ведущих ролей в повышении производительности программного обеспечения продолжают занимать оптимизирующие компиляторы. В общем случае оптимизирующим компилятором можно назвать любой компилятор, выполняющий специальные операции над кодом для улучшения его производительности.

Изначально это подразумевало замену определенных операций на эквивалентные, но более эффективные, как например, замена умножения или целочисленного деления на числа, являющиеся степенями двойки, на операции сдвигов. По мере развития научной области, методологий написания кода и аппаратного обеспечения компиляторы обзавелись обширным арсеналом возможностей оптимизации программного кода.

Их принято разделять на низкоуровневые и высокоуровневые оптимизации.

Низкоуровневые оптимизации подразумевают внесение изменений в генерируемый машинный код таким образом, чтобы максимально эффективно использовать особенности аппаратной платформы. Это включает в себя использование более производительных конструкций машинного кода, в том числе и с использованием специальных команд, доступных в целевой архитектуре, векторизации операций, встраивания функций и т.д.

Высокоуровневые оптимизации оперируют на уровне абстрактных алгоритмических элементов, составляющих программы – циклов, ветвлений, базовых блоков. Они используют данные о структуре программы, чтобы преобразовывать промежуточное представление программы в более эффективную форму.

На практике граница между этими группами размыта, так как многие методы вовлекают в себя элементы как высокоуровневого анализа кода, так и низкоуровневого управления генерацией машинных команд.

В число широко применяемых компиляторами оптимизаций входят:

- схлопывание константных выражений – если определенное выражение состоит только из констант, то оно рассчитывается на этапе компиляции и его результат подставляется вместо оригинального выражения;
- устранение «мертвого кода» (англ. – dead code [5]) – исключение участков кода, которые не могут быть достигнуты программой;

- устранение «тупиковых записей» (англ. – dead store [6]) – исключение записи значения в переменную, значение которой не используется в коде далее;
- оптимизация использования регистров общего назначения процессором [7] реорганизует код таким образом, чтобы минимизировать количество обращений к памяти в процессе работы программы посредством удержания наиболее часто используемых переменных в определенных регистрах общего назначения процессора;
- распараллеливание операций – изменение порядка операций таким образом, чтобы они могли быть запущены параллельно на уровне потоков, памяти или инструкций;
- снижение стоимости операций – замена медленных операций на эквивалентные, но более быстрые на целевой архитектуре;
- оптимизации циклов – обширная группа методов, ориентированная на работу с циклами, включает такие подходы как вынос инвариантов за рамки цикла, инверсию циклов, развертку циклов, разделение и слияние тел циклов, вынос условных операторов из цикла и т.д.;
- выбор инструкций [8] – позволяет выбрать из нескольких вариантов машинного кода, выполняющих одно и то же действие, наиболее эффективный для архитектуры целевого процессора;
- Instruction Scheduling [9, 10] – реорганизация инструкций таким образом, чтобы не вызывать простоя конвейера центрального процессора в результате долгих обращений к памяти, исчерпания ресурсов процессора или ветвления.

Большинство традиционных методов оптимизации программ, используемых в оптимизирующих компиляторах, можно исключить из рассмотрения, так как они ориентированы на особенности CPU, не присущие арифметическим ядрам, использующимся в графических процессорах. Те методы, что могут быть применены, либо уже внедрены компиляторами программ для GPU, либо не решают представленную проблему.

Перейдем к рассмотрению более динамических методов увеличения производительности.

Технология JIT-компиляции [11] (just-in-time) позволяет улучшить производительность программ на языках, компилирующихся в байт-код. Байт-кодом называют промежуточное представление программного кода [12–14], которое исполняется виртуальной машиной, что является его ключевым отличием от машинного кода, исполняемого непосредственно процессором.

В рамках технологии JIT-компиляции байт-код программ компилируется в машинный код по мере

надобности прямо во время работы программы⁴. Это позволяет ускорить работу программ сразу с нескольких сторон:

- значительно уменьшается задержка при изначальном запуске программы, которая без этой технологии вызывается длительной обработкой исходного кода; компиляция из исходного кода в байт-код происходит существенно медленнее, чем компиляция из байт-кода в машинный код;
- использование особенностей конкретного аппаратного обеспечения для улучшения производительности;
- оптимизация с использованием данных, полученных во время работы программы;
- возможность динамического подключения библиотек без накладных расходов, присущих компилируемому языку.

Однако применение JIT-компиляции в рамках программ, запущенных на GPU, на данный момент не представляется возможным из-за архитектурных ограничений на динамическое изменение исполняемого машинного кода на графических процессорах.

Помимо этого, встраивание компиляции в сам цикл работы графического процессора потребует массу как аппаратных, так и программных изменений и в целом не даст такого же прироста производительности, как на центральном процессоре, т.к. на GPU нет проблемы подключения библиотек (ввиду статической компиляции программ). При этом промежуточное представление программы и так будет полностью скомпилировано в машинный код в процессе переноса программы на графический процессор. В целом, указанные проблемы делают применение JIT нецелесообразным на GPU.

Одним из ключевых элементов, обеспечивающих быстрое действие современных CPU, является предсказатель переходов⁵. Предсказатель переходов позволяет процессору, использующему конвейерную архитектуру, начать загружать инструкции одной из ветвей оператора ветвления в конвейер прежде, чем будет определена истинность условия.

⁴ Croce L. Just in Time Compilation. Columbia University. URL: http://www.cs.columbia.edu/~aho/cs6998/Lectures/14-09-22_Croce_JIT.pdf, дата обращения 01.03.2021. [Croce L. Just in Time Compilation. Columbia University. URL: http://www.cs.columbia.edu/~aho/cs6998/Lectures/14-09-22_Croce_JIT.pdf. Accessed March 1, 2021.]

⁵ Fog A. The microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs. An optimization guide for assembly programmers and compiler makers. Technical University of Denmark. URL: <https://www.agner.org/optimize/microarchitecture.pdf>, дата обращения 01.03.2021. [Fog A. The microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs. An optimization guide for assembly programmers and compiler makers. Technical University of Denmark. URL: <https://www.agner.org/optimize/microarchitecture.pdf>. Accessed March 1, 2021.]

Это играет важную роль в повышении производительности за счет параллельного исполнения инструкций, оперирующих на взаимно независимых данных. В общем случае, без предсказателя конвейер процессора не будет знать, инструкции из какой ветви следует использовать, и сможет начать их загрузку только после вычисления истинности условия в условном операторе, что означает простой конвейера на каждом из условий. Этого можно избежать, предсказав результат условия и начав загрузку инструкций из соответствующей ветки в конвейер заранее. В случае ошибки предсказателя произойдет простой конвейера, пока не будут загружены правильные инструкции.

Само предсказание ветвления осуществляется эвристически [15–17], как правило, опираясь на статистику исполнения данного участка кода. Временные издержки при ошибке предсказателя неизбежны по причине несовершенности механизмов предсказания. Однако если механизм достаточно точен, то временные потери от неправильного предсказания становятся незначительными по сравнению с выигрышем, полученным в ходе верных предсказаний.

Подход предсказания ветвления получил развитие в виде спекулятивного исполнения⁶ – помимо загрузки инструкций на конвейер также осуществляется и исполнение предсказанной ветви прежде, чем истинность условия будет установлена. В случае ошибки вырастают временные потери, т.к. требуется целиком очистить конвейер и загрузить в него инструкции правильной ветви.

Подходы предсказания ветвления и спекулятивного исполнения исполнены аппаратно и не видны программисту. Тем не менее, при определенных построениях программ возможно получать снижение производительности, что наиболее заметно в случае, когда программа стабильно заставляет модуль выдать неправильное предсказание перехода. Существующая практика оптимизации низкоуровневых программ для более удачного взаимодействия с предсказателем переходов является прямым следствием несовершенности применяемых способов предсказания.

⁶ Gabbay F. Speculative execution based on value prediction. Research Proposal towards the Degree of Doctor of Sciences. Technion-Israel Institute of Technology (IIT), Department of Electrical Engineering. 1996. 65 p. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.29.5397&rep=rep1&type=pdf>, дата обращения 01.03.2021. [Gabbay F. Speculative execution based on value prediction. Research Proposal towards the Degree of Doctor of Sciences. Technion-Israel Institute of Technology (IIT), Department of Electrical Engineering. 1996. 65 p. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.29.5397&rep=rep1&type=pdf>. Accessed March 1, 2021.]

Само наличия механизма предсказания ветвления и спекулятивного исполнения также открыло путь целому классу аппаратных уязвимостей, позволяющих программе получить несанкционированный доступ к информации. Специальным образом сконструированная программа может установить содержимое ячеек оперативной памяти при помощи косвенных данных (как правило, о быстродействии), возникающих в ходе ошибочных предсказаний ветвлений [18–20].

По мнению авторов настоящей статьи, предсказание переходов на GPU не имеет смысла ввиду отсутствия конвейера на его ядрах, а также отсутствия ветвлений в исполняемом машинном коде в типовом их понимании из-за предикации. Вместо этого код структурирован линейно и при исполнении условных операторов не происходит «прыжков» регистра счетчика инструкций.

Даже если предположить, что данное препятствие будет преодолено, внедрение модуля предсказания перехода на GPU крайне затруднительно ввиду сложности подобного модуля. Типовой графический процессор включает в себя большое количество слабых арифметических ядер, на порядки превышающее количество ядер на типовом рыночном центральном процессоре. Добавление к каждому из них предсказателя увеличит их размер и энергопотребление до неприемлемых значений.

Метод адаптивной оптимизации [21] полагается на специальный инструментарий, схожий с JIT-компиляторами, чтобы производить рекомпиляцию кода программы в процессе ее работы. Этот метод нацелен на применение различных подходов к оптимизации программы в зависимости от продуктивности кода. Так, например, адаптивная оптимизация будет применять более агрессивные методы оптимизации в «узких местах», где код тратит больше всего процессорного времени. Подобные агрессивные методы оптимизации занимают много времени, и применять их на весь объем программы было бы слишком расточительно. Поэтому участки программы, которые вызываются редко, будут оптимизированы более примитивными, но более быстрыми приемами, позволяя сэкономить время в целом, пусть и за счет того, что этот код будет работать медленнее.

Применение вышеуказанного подхода в отношении GPU невозможно по схожей с JIT причине – для его работы требуется возможность для программы перезаписывать свой код, что не поддерживается современными GPU.

Рассмотрим метод специализации алгоритма во время исполнения (англ. – run-time algorithm specialization) – подход, пришедший из области автоматического доказательства теорем [22]. Указанный подход подразумевает создание частных реализаций

сложных функций для определенных входных данных, для которых возможно представить исходную функцию в более простой форме. Иногда это может выражаться в создании табличных значений для функции и кешировании отдельных результатов для часто повторяющихся значений. В более сложных случаях может создаваться несколько вариантов кода, соответствующих частным вариантам функции, где, например, исключается часть расчетов из-за специфических значений входных данных.

Вышеуказанный подход и схожие с ним методы [23] требуют не только записи в область памяти исполняемого кода, но и большого количества дополнительной памяти под код полученных специализаций, что делает его применение в рамках технологии GPGPU невозможным.

Перейдем к рассмотрению технологии оптимизации на основе профилирования (англ. – profile-guided optimization) – подхода к оптимизации программ, в котором процессом оптимизации управляют результаты быстроедействия программы [24, 25]. Этот подход зачастую требует использования специального компилятора, который берет на себя задачу инструментации и снятия замеров времени исполнения программы. Подобный специальный компилятор транслирует, собирает и запускает программу множество раз, анализируя в процессе этих тестовых запусков частоту использования различных участков программы и скорость их вызова. Используя эти данные, компилятор применяет различные стратегии оптимизации к участкам кода, которые показали плохие результаты в ходе тестовых запусков. В число подобных стратегий входит подбор оптимального распределения регистров, встраивание функций, а также масса техник, завязанных на удачную группировку исполняемого кода в страницах памяти для ускорения работы кешей сразу на нескольких уровнях – от механизма управления виртуальной памятью на уровне ОС до кеша инструкций CPU.

В связи с тем, что собираемая подобным компилятором статистика репрезентативна только для тех действий, которые осуществлялись программой в процессе тестирования, типовой набор тестов должен включать в себя наиболее общие сценарии работы с программой. Это могло бы быть реализовано гораздо проще для GPU-программ в силу отсутствия у них интерактивности.

По мнению авторов статьи, применение этого метода для GPU-программ нецелесообразно. В условиях работы с GPU крайне затруднительно или даже невозможно проводить инструментацию кода и, соответственно, получать замеры производительности отдельных участков кода, необходимые для работы метода.

Из анализа существующих технологий повышения производительности видно, что проблема потери производительности с наращиванием функционала, характерная для графических процессоров, является атипичной и нетривиальной.

Ни один из рассматриваемых подходов не решает проблему предикации ветвлений на графических процессорах, однако они являются важной отправной точкой в процессе нахождения решения.

С одной стороны, для решения проблемы требуется применение динамических методов, чтобы сохранить гибкость функционала программы для графического процессора. С другой стороны, рассмотренные существующие решения, применяемые на CPU, не могут быть использованы в контексте графических процессоров на практике из-за характерных особенностей архитектуры, ориентированной на массово параллельные расчеты. Внесение изменений в устоявшуюся архитектуру GPU очевидным образом нецелесообразно ввиду ряда факторов, среди которых многократное увеличение цены производства и неизбежное снижение производительности.

В силу изложенных положений можно установить, что существует потребность в разработке подхода к оптимизации программ для GPU, совместимого с ограничениями графических процессоров. В то же время этот подход должен быть достаточно гибким, чтобы обеспечивать сохранение всего многообразия функционала оптимизируемых программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена проблема уменьшения производительности программ для расчетов общего назначения на GPU, возникающая в ходе наращивания их функционала. Установлена связь этой проблемы с предикацией ветвления – существенной особенностью организации аппаратной платформы графических процессоров.

Рассмотрен ряд существующих подходов и технологий для увеличения производительности программ на CPU и показана малая степень их применимости в условиях программ, использующих технологию GPGPU.

Отмечено, что существующие методы, несмотря на невозможность их прямого применения, являются важной отправной точкой в дальнейших исследованиях.

Дальнейшее развитие указанной в статье проблематики подразумевает разработку специализированного метода оптимизации программ для GPU.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Markidis S., Chien S.W.D., Laure E., Peng I.B., Vetter J.S. NVIDIA Tensor Core Programmability, Performance & Precision. In: *2018 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*. Vancouver, BC, Canada; 2018, p. 522–531. <https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2018.00091>
2. Sanzharov V.V., Gorbonosov A.I., Frolov V.A., Voloboy A.G. Examination of the Nvidia RTX. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019;2485:7–12. <http://dx.doi.org/10.30987/graphicon-2019-2-7-12>
3. Flynn M.J. Very high speed computing systems. *Proceedings of the IEEE*. 1966;54(12):1901–1909. <https://doi.org/10.1109/PROC.1966.5273>
4. Fisher J.A., Faraboschi P., Young C. *Embedded computing: A VLIW approach to architecture, compilers, and tools*. Elsevier; 2004. ISBN: 978-1-55860-766-8. URL: https://www.researchgate.net/publication/220690439_Embedded_computing_a_VLIW_approach_to_architecture_compilers_and_tools
5. Knoop J., Rüthing O., Steffen B. Partial dead code elimination. In: *Proceedings of the ACM SIGPLAN 1994 conference on Programming language design and implementation (PLDI '94)*. 1994, p. 147–158. <https://doi.org/10.1145/178243.178256>
6. Fink S., Knobe K., Sarkar V. Unified analysis of array and object references in strongly typed languages. In: Palsberg J. (Ed.). *Static Analysis. SAS 2000. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2000. V. 1824. P. 155–174. https://doi.org/10.1007/978-3-540-45099-3_9
7. Runeson J., Nyström S.-O. Retargetable graph-coloring register allocation for irregular architectures. In: Krall A. (Ed.). *Software and Compilers for Embedded Systems (SCOPES 2003). Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2003. V. 2826. P. 240–254. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39920-9_17
8. Blindell G.H. *Instruction Selection: Principles, Methods, & Applications*. Springer; 2016. 171 p. ISBN 978-3-319-34017-3. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-34019-7>
9. Gibbons P.B., Muchnick S.S. Efficient instruction scheduling for a pipelined architecture. *ACM SIGPLAN Notices*. 1986;21(7):11–16. <https://doi.org/10.1145/13310.13312>
10. Su Ch.-L., Tsui Ch.-Y., Despain A.M. Low power architecture design and compilation techniques for high-performance processors. In: *Proceedings of COMPCON '94*. 1994, p. 489–498. <https://doi.org/10.1109/COMPCON.1994.282878>
11. Aycock J. A brief history of just-in-time. *ACM Comput. Surv.* 2003;35(2):97–113. <https://doi.org/10.1145/857076.857077>
12. Ogiwara M. *Fundamentals of Java Programming*. Springer; 2018. 532 p.
13. Sage K. The Origins of Programming. In: *Concise Guide to Object-Oriented Programming. Undergraduate Topics in Computer Science*. Springer, Cham.; 2019, p. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13304-7_1
14. Saabith A.S., Fareez M.M.M., Vinothraj T. Python current trend applications-an overview. *IJAERD*. 2019;6(10):6–12. URL: http://ijaerd.com/papers/finished_papers/IJAERDV0611085481.pdf
15. McFarling S. *Combining Branch Predictors*. Digital Western Research Lab (WRL). Technical Report, TN-36. 1993. 29 p. URL: <https://www.hpl.hp.com/techreports/Compaq-DEC/WRL-TN-36.pdf>
16. Skadron K., Martonosi M., Clark D.W. A Taxonomy of branch mispredictions, and alloyed prediction as a robust solution to wrong-history mispredictions. In: *Proceedings of the 2000 International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques*. Philadelphia. 2000. <https://doi.org/10.1109/PACT.2000.888344>
17. Vintan L.N., Iridon M. Towards a high performance neural branch predictor. In: *IJCNN'99. International Joint Conference on Neural Networks Proceedings*. 1999. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.1999.831066>
18. Kocher P., Horn J., Fogh A., Genkin D., et al. Spectre attacks: Exploiting speculative execution. In: *2019 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP)*. 2019. 19 p. <https://doi.org/10.1109/SP.2019.00002>
19. Bhattacharyya A., Sandulescu A., Neugschwandtner M., Sorniotti A., et al. SMOtherSpectre: exploiting speculative execution through port contention. In: *Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '19)*. 2019, p. 785–800. <https://doi.org/10.1145/3319535.3363194>
20. Chen G., Chen S., Xiao Y., Zhang Y., Lin Z., Lai T.H. SgxPectre: Stealing intel secrets from SGX enclaves via speculative execution. In: *2019 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P)*. IEEE. 2019, p. 142–157. <https://doi.org/10.1109/EuroSP.2019.00020>
21. Arnold M., Fink S., Grove D., Hind M., Sweeney P.F. Adaptive optimization in the Jalapeno JVM. In: *Proceedings of the 15th ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming, systems, languages, and applications*. 2000, p. 47–65. <https://doi.org/10.1145/353171.353175>
22. Riazanov A. *Implementing an Efficient Theorem Prover*. PhD thesis. The University of Manchester; 2003. 210 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/2906405_Implementing_an_Efficient_Theorem_Prover
23. Grant B., Mock M., Philipose M., Chambers C., Eggers S.J. Annotation-directed run-time specialization in C. *ACM SIGPLAN Not.* 1997;32(12):163–178. <https://doi.org/10.1145/258994.259016>
24. Pettis K., Hansen R.C. Profile guided code positioning. In: *Proceedings of the ACM SIGPLAN 1990 conference on Programming language design and implementation (PLDI '90)*. 1990, p. 16–27. <https://doi.org/10.1145/93542.93550>
25. Wicht B., Vitillo R.A., Chen D., Levinthal D. *Hardware Counted Profile-Guided Optimization*. 24 November 2014. URL: <https://arxiv.org/pdf/1411.6361.pdf>

Об авторах

Сесин Игорь Юрьевич, аспирант, кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: isesin@protonmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-7323-9595>

Болбаков Роман Геннадьевич, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bolbakov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4922-7260>

About the authors

Igor Yu. Sesin, Postgraduate Student, Department of the Tool and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: isesin@protonmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-7323-9595>

Roman G. Bolbakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of the Tool and Applied Software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bolbakov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4922-7260>

УДК 004.9
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-16-25>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разработка моделей аналитической системы обработки данных для мониторинга ИБ объекта информатизации, использующего облачную инфраструктуру

**В.А. Сизов,
А.Д. Киров[@]**

Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва, 117997 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: kirov.ad@rea.ru

Резюме. Статья посвящена разработке аналитической системы обработки данных (АСОД) для мониторинга информационной безопасности (ИБ) в рамках системы менеджмента ИБ современных компаний, ведущих свою основную деятельность в киберпространстве и использующих облачную инфраструктуру. На основе анализа современных информационных технологий (ИТ) и наиболее востребованных продуктов обеспечения ИБ облачных инфраструктур, а также существующих научных подходов предложен формализованный подход к синтезу АСОД для мониторинга ИБ такого объекта информатизации. Этот подход учитывает полезность используемых ИТ с позиции ИБ. Представлена общая модель структуры информационного обеспечения АСОД для мониторинга ИБ, а также модель зависимости полезности ИТ от времени и соотношения уровня квалификации специалиста по ИБ и злоумышленника. В качестве критерия в первой оптимизационной модели используется качество системы мониторинга ИБ. В качестве ограничений предлагаются следующие: ограничение на время принятия решения на инцидент; ограничение на степень качества анализа событий ИБ аналитической системой обработки данных и ограничение на совместимость функций анализа данных с типами данных о событиях ИБ. Приведенные результаты исследования второй модели показывают логически непротиворечивую зависимость полезности ИТ от времени и соотношения уровня квалификации специалиста по ИБ к уровню квалификации злоумышленника. Представлены частные модели структуры информационного обеспечения АСОД, позволяющие определить рациональную структуру информационного обеспечения АСОД по частным критериям. В качестве частных критериев используются следующие: максиминный критерий полезности информационного обеспечения АСОД для мониторинга ИБ объекта информатизации в облачной инфраструктуре и критерий максимума актуальности информационного обеспечения, распределенного по узлам облачной инфраструктуры для систем с невысокой степенью централизации управления.

Ключевые слова: информационная безопасность, аналитическая система обработки данных, облачная инфраструктура, компьютерное моделирование, математическое моделирование, мониторинг ИБ, объект информатизации

• Поступила: 25.03.2021 • Доработана: 11.05.2021 • Принята к опубликованию: 25.07.2021

Для цитирования: Сизов В.А., Киров А.Д. Разработка моделей аналитической системы обработки данных для мониторинга ИБ объекта информатизации, использующего облачную инфраструктуру. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):16–25. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-16-25>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

The development of models of an analytical data processing system for monitoring information security of an informatization object using cloud infrastructure

Valerii A. Sizov,
Aleksey D. Kirov[@]

Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, 117997 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: kirov.ad@rea.ru

Abstract. The article is devoted to the problem of developing an analytical data processing system for monitoring information security within the information security management system of modern companies conducting their main activities in cyberspace and using cloud infrastructure. Based on the analysis of modern information technologies related to ensuring information security of cloud infrastructure and the most popular products for ensuring information security of cloud infrastructures, as well as existing scientific approaches, a formalized approach to the synthesis of an analytical data processing system for monitoring the information security of an informatization object using cloud infrastructure is proposed. This approach takes into account the usefulness of the used information technologies from the viewpoint of information security. A general model of the structure of information support of an analytical data processing system for monitoring information security, as well as a model of the dependence of the usefulness of information technology on time and the ratio of the skill level of an information security specialist and an attacker are presented. The quality of the information security monitoring system is used as a criterion in the first optimization model. The following limitations are suggested: limitation on the time of making a decision on an incident; limitation on the degree of quality of analysis of information security events by the analytical data processing system and limitation on the compatibility of data analysis functions with data types about information security events. The cited results of the study of the second model show a logically consistent dependence of the usefulness of information technology on time and the ratio of the skill level of an information security specialist to the skill level of an attacker. The particular models of the structure of the information support of ASOD are presented. They make it possible to determine the rational structure information support of ASOD according to particular criteria. The following particular criteria are used: the maximin criterion of the usefulness of the information support of ASOD for monitoring the information security of an informatization object in the cloud infrastructure; the criterion for the maximum relevance of information support distributed over the nodes of the cloud infrastructure for systems with a low degree of centralization of management.

Keywords: information security, analytical data processing system, cloud infrastructure, computer modeling, mathematical modeling, information security monitoring, object of informatization

• Submitted: 25.03.2021 • Revised: 11.05.2021 • Accepted: 25.07.2021

For citation: Sizov V.A., Kirov A.D. The development of models of an analytical data processing system for monitoring information security of an informatization object using cloud infrastructure. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):16–25 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-6-16-25>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Аналитические системы обработки данных (АСОД) для мониторинга ИБ – большой формирующийся класс систем, функционирующих в системе менеджмента ИБ (СМИБ) современных компаний.

Современные компании, ведущие свою основную деятельность в киберпространстве с использованием облачной инфраструктуры, построенной на технологиях сервис-провайдеров облачных инфраструктур, используют эти системы для управления ИБ и для совершенствования процессов, реализующих методы ИБ, включая процессы мониторинга, протекающие в реальном масштабе времени. Особенности технической реализации таких аналитических систем обуславливают особые требования к удобству их использования инженером по защите информации, оперативности, безошибочности и качеству обработки данных в реальном времени. Кроме этого, потенциальные затраты компании-пользователя облачных услуг на переход от одного поставщика этих услуг к другому характеризуются соотношением последствий в области ИБ, возникающих в результате кибератак, системных сбоев, ошибок пользователей, других внешних факторов и разницы в классах технологий кибербезопасности провайдеров. Поэтому предоставляемый поставщиком облачных услуг уровень ИБ подвержен тем же жестким условиям двусторонней рыночной

конкуренции, которые определяют цены поставщика облачных услуг и его стратегию обеспечения ИБ клиентов.

Новые информационные технологии (ИТ) актуализируют проблему обеспечения безопасности и защиты информации перед их разработчиками, вендорами и потребителями. В настоящее время считается, что наиболее эффективным путем обеспечения ИБ объектов информатизации компании и/или используемой ею облачной инфраструктуры является путь разработки и внедрения безопасных ИТ. Их использование в облачных инфраструктурах позволяет дополнительно сократить расходы на обслуживание корпоративных информационных систем. Большое количество современных ИТ, используемых в облачной инфраструктуре, направлено на комплексное решение задачи повышения эффективности использования имеющихся ресурсов (табл. 1).

Облачная инфраструктура, используемая для размещения корпоративных информационных систем, все чаще принимает гибридную форму. Часть данных, наиболее критичных для функционирования бизнес-процессов, размещается внутри собственной инфраструктуры компании с использованием универсальных облачных технологий, формируя «частное облако компании». Другие данные, в свою очередь, обрабатываются в «публичных облаках», в которых инфраструктура предоставляется поставщиками облачных услуг

Таблица 1. Содержание современных ИТ, связанных с обеспечением ИБ облачной инфраструктуры

№ п/п	Наименование ИТ	Содержание
1	Сетевые решения для центров обработки данных (ЦОД) (DCN) [1]	Сетевое оборудование, позволяющее автоматически распределять нагрузку на локальные вычислительные сети (ЛВС) облачной инфраструктуры (как на само облачное сетевое оборудование, так и на каналы связи), предоставляемое как сервис
2	Проактивное распределение ресурсов [2]	Технология, позволяющая автоматически распределять ресурсы облачной инфраструктуры (аппаратные ресурсы в виде облачных серверов и рабочих мест и программные ресурсы в виде программного обеспечения, включая средства его разработки и отладки), предоставляемые как сервис, на основе предсказания ожидаемой нагрузки
3	Самодиагностика программного обеспечения [3]	Технология, предназначенная для автоматического выявления и коррекции ошибок, возникающих при эксплуатации программного обеспечения и реализации его функций
4	Шифрование данных в облачных инфраструктурах [4]	Технология, предназначенная для распределенного шифрования данных без использования единого распределяющего и удостоверяющего центра

Таблица 2. Назначение современных продуктов обеспечения ИБ облачных инфраструктур

№ п/п	Наименование продукта защиты информации в облачных инфраструктурах	Производитель продукта защиты информации в облачных инфраструктурах	Назначение
1	MVision Cloud	McAfee	Создание «динамического периметра защиты», способного адаптироваться к динамическим условиям внешней среды. Создание политик безопасности и их применение к SaaS, PaaS, IaaS-решениям, контейнерам и компонентам виртуальных облачных сред
2	Cisco Cloud Security	Cisco	Защита пользователей, данных и приложений в облаке от атак через взломанные учетные записи, от вредоносного ПО и утечки данных независимо от их местоположения и от того, откуда осуществляется доступ в Интернет. Нейтрализация вредоносного ПО до того, как оно распространится на сеть или оконечные устройства и сокращение времени на восстановление после заражения
3	FortiGate-VM	FortiNet	Для защиты данных используются высокоскоростные VPN-подключения. Политики безопасности реализуются во всех средах. Центр облачной безопасности служит для обеспечения централизованной и согласованной реализации мер безопасности корпоративной сети и обмена данными и поддерживает безопасное подключение сетей, расположений, облаков и центров обработки данных
4	Kaspersky Security для виртуальных и облачных сред	Лаборатория Касперского	Одновременная реализация как защиты рабочей среды, так и концепции «безопасность как код», которая обеспечивает непрерывную интеграцию рабочих процессов и восполнение пробелов в кибербезопасности сред разработки
5	CheckPoint CloudGuard	CheckPoint	Поддержка самого широкого спектра облачных инфраструктур, включая AWS, Microsoft Azure и Azure Stack, Google Cloud Platform, VMware Cloud on AWS и другие. Автоматическая подготовка и автоматическое масштабирование вместе с автоматическим обновлением политик гарантируют, что средства защиты не отстают от всех изменений в вашем облаке. Единая унифицированная консоль обеспечивает согласованную видимость, управление политиками, ведение журналов, создание отчетов и контроль во всех облачных средах и сетях

согласно моделям «Инфраструктура как услуга», «Платформа как услуга» либо «Программное обеспечение как услуга». Это обуславливает необходимость использования современных технологий обеспечения безопасности данных в облачных инфраструктурах. Будучи интегрированными с современными технологиями обработки данных, такие технологии превращаются в полноценные высокотехнологичные продукты, предлагаемые ведущими компаниями на рынке продуктов обеспечения ИБ облачных инфраструктур. Примеры таких продуктов представлены в табл. 2.

Анализ представленных технологий свидетельствует об их сложности. Для их развития и совершенствования необходимо применять научный

подход, включающий методы математического и компьютерного моделирования.

В [5] представлен обзор моделей зрелости возможностей и показателей безопасности систем. Отмечается, что эти модели в основном являются реактивными, а не проактивными и, следовательно, не обеспечивают адекватных мер для оценки общей безопасности облачной системы. Поэтому в этой работе предложена модель зрелости возможностей облачной безопасности (CSCMM), которая расширяет существующие модели кибербезопасности с помощью метрики безопасности. В [6] представлена методология, позволяющая определить лучшие меры безопасности для мультиоблачных приложений, компоненты которых развернуты в гетерогенных облаках. Методология

основана на декомпозиции приложений и моделировании угроз по компонентам с последующим анализом рисков вместе с фиксацией требований облачного бизнеса и безопасности. Однако в этих работах недостаточное внимание уделяется процессам и технологиям мониторинга ИБ, которые в значительной степени влияют на качество его выходной информации (полнота, актуальность, своевременность и др.).

Выходная информация, генерируемая АСОД, представляет собой совокупность данных, полученных в результате выполнения наборов функций аналитики данных, входящих в его состав с определенной структурой или несколькими возможными видами структур. Такие совокупности данных могут быть использованы либо в текущей системе, либо перенаправляться в иные системы, присутствующие в данной облачной инфраструктуре. Качество выходной информации АСОД представляет собой степень ее пригодности для применения в целях выявления и расследования инцидентов ИБ офицером безопасности.

В качестве одного из основных методов, предложенных для повышения качества данных, получаемых в результате анализа данных мониторинга ИБ с применением АСОД, выступает компьютерное моделирование.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные системы мониторинга ИБ (СМИБ) создаются с целью обеспечения возможности адекватного и своевременного реагирования на кибератаки, направленные на информационную инфраструктуру СЭД и управления ИБ компании, что является главным компонентом, необходимым для оперативного и стратегического реагирования на актуальные угрозы в соответствии с политикой ИБ компании. Такая инфраструктура может быть построена на основе технологий ЛВС, составляя «частное облако компании» и/или в виде облачных инфраструктур, предоставляемых провайдерами облачных услуг, составляя «публичное облако компании».

Для создания эффективной системы управления информационной безопасностью компании требуется в максимальной степени автоматизировать ее функции управления с учетом современных требований к мониторингу ИБ и особенностей гибридных облачных инфраструктур.

Таким образом, задача разработки моделей аналитической системы обработки данных для мониторинга ИБ объекта информатизации, использующего облачную инфраструктуру, является актуальной. Данную задачу целесообразно разделить на ряд подзадач.

Первая подзадача состоит в разработке общей модели структуры информационного обеспечения аналитической системы обработки данных для

мониторинга ИБ. Решение данной задачи позволяет определить рациональные решения, близкие к оптимальному, представляющие собой определенные совокупности информационных элементов, распределенные по узлам вычислительной сети АСОД.

Вторая подзадача представляет собой определение характера и степени зависимости полезности ИТ от времени и соотношения уровня квалификации специалиста по ИБ и уровня квалификации злоумышленника. Решение данной задачи позволяет выявить условия, при которых полезность ИТ будет наилучшей.

Третья подзадача представляет собой разработку совокупности частных моделей структуры информационного обеспечения АСОД для мониторинга ИБ объекта информатизации в облачной инфраструктуре. Решение данной задачи позволяет определить рациональную структуру информационного обеспечения АСОД по частным критериям [7, 8].

РАЗРАБОТКА ОБЩЕЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИБ

Пусть:

$$\theta = F(\delta, t), \quad (1)$$

где θ – качество системы мониторинга ИБ; F – функция качества системы мониторинга ИБ; $\delta = G(R)$, где δ – степень качества анализа событий ИБ АСОД; t – время, необходимое аналитической системе обработки данных для принятия решения относительно того, насколько вероятно, что конкретное событие ИБ или их совокупность является инцидентом ИБ; G – функция качества анализа событий ИБ АСОД;

$$R = H(S),$$

где R – степень совместимости процедур анализа данных с типами данных о событиях ИБ; H – функция степени совместимости процедур анализа данных с типами данных о событиях ИБ; S – структура информационного обеспечения АСОД (совокупности информационных элементов, распределенные по узлам вычислительной сети АСОД; данные о событиях ИБ, дополнительные данные для анализа и расследования инцидентов ИБ).

Тогда общая модель структуры информационного обеспечения аналитической системы обработки данных для мониторинга ИБ имеет следующий вид:

Найти $\max_{\{S\}} \theta$ при ограничениях:

$$t1 < t2; \delta1 < \delta < \delta2; R1 < R < R2, \quad (2)$$

где $t_1 - t_2$ – период времени, за который необходимо принять решение относительно того, насколько вероятно, что конкретное событие ИБ или их совокупность является инцидентом ИБ для наиболее эффективного противодействия данному инциденту и его расследования;

$\delta_1 - \delta_2$ – пределы степени качества анализа событий ИБ аналитической системой обработки данных, позволяющие принять решение относительно того, насколько вероятно, что конкретное событие ИБ или их совокупность является инцидентом ИБ с требуемой степенью достоверности;

$R_1 - R_2$ – пределы степени совместимости функций анализа данных с типами данных о событиях ИБ, в которых возможно принятие решения относительно того, насколько вероятно, что конкретное событие ИБ или их совокупность является инцидентом ИБ.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛЕЗНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОТ ВРЕМЕНИ И СООТНОШЕНИЯ УРОВНЯ КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТА ПО ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЗЛОУМЫШЛЕННИКА

Для разработки модели зависимости полезности ИТ от времени и соотношения уровня квалификации специалиста по ИБ и злоумышленника предлагается использовать аналитическую модель на

основе статистического распределения Рэлея [9]. В качестве параметра масштаба распределения Рэлея выступает отношение уровня квалификации специалиста по ИБ, устраняющего уязвимости в программном и аппаратном обеспечении, к уровню квалификации злоумышленника, атакующего программное и аппаратное обеспечение, реализующее ИТ.

Оценка зависимости полезности ИТ от времени и соотношения уровней квалификации указанных категорий имеет следующий вид:

$$P(t, \sigma) = 1 - \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t}{2\sigma^2}}, t \geq 0, \sigma > 0, \quad (3)$$

где P – уровень полезности ИТ в момент времени t ; σ – отношение количественной оценки уровня квалификации специалиста по ИБ к уровню квалификации злоумышленника.

Соответствие количественных и качественных оценок уровней квалификации специалиста по ИБ и злоумышленника приведено в табл. 3 и 4 соответственно. В случае, когда противоборствующие стороны – группы людей, к ним необходимо применять групповые количественные оценки уровня их квалификации [10]. Итоговая матрица отношений количественных оценок уровней квалификации специалиста по ИБ и уровня квалификации злоумышленника представлена в табл. 5.

Таблица 3. Соответствие количественных и качественных оценок уровней квалификации специалиста по ИБ

Класс специалиста по ИБ	Качественная оценка уровня квалификации специалиста по ИБ	Количественная оценка уровня квалификации специалиста по ИБ
Высококвалифицированный специалист	Высокий	1
Обычный специалист	Средний	2
Низкоквалифицированный специалист	Низкий	3

Таблица 4. Соответствие количественных и качественных оценок уровней квалификации злоумышленника

Класс злоумышленника	Качественная оценка уровня квалификации злоумышленника	Количественная оценка уровня квалификации злоумышленника
Высококвалифицированный специалист	Высокий	3
Обычный специалист	Средний	2
Низкоквалифицированный специалист	Низкий	1

Таблица 5. Итоговая матрица отношений количественных оценок уровней квалификации специалиста по ИБ и уровня квалификации злоумышленника

Класс злоумышленника \ Класс специалиста по ИБ	Высококвалифицированный специалист	Обычный специалист	Низкоквалифицированный специалист
Высококвалифицированный специалист	0.33	0.5	1
Обычный специалист	0.66	1	2
Низкоквалифицированный специалист	1	1.5	3

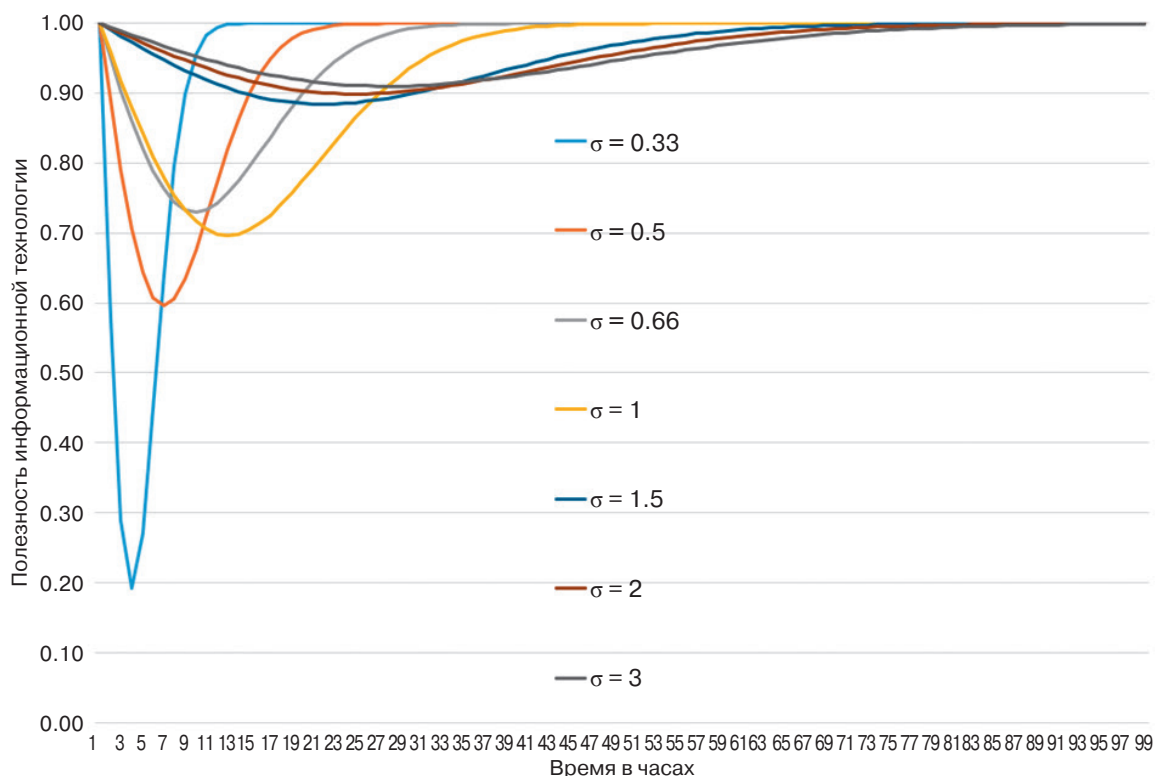


Рис. 1. Графики зависимости полезности ИТ от времени и соотношения уровня квалификации специалиста по ИБ и злоумышленника

Анализ представленных на рис. 1 графиков показывает, что с повышением уровня квалификации злоумышленника полезность ИТ для пользователей падает быстрее, а с повышением уровня квалификации специалиста по ИБ полезность ИТ для пользователей быстрее возвращается к максимальному значению, что соответствует реальности.

РАЗРАБОТКА ЧАСТНЫХ МОДЕЛЕЙ СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИБ ОБЪЕКТА ИНФОРМАТИЗАЦИИ В ОБЛАЧНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

В настоящее время в области управления информационной безопасностью современных объектов информатизации в облачных инфраструктурах выделяется группа задач менеджмента инцидентов ИБ, которая включает следующие основные задачи: мониторинг событий ИБ объектов информатизации в облачных инфраструктурах и выявление инцидентов ИБ; регистрация инцидентов ИБ; анализ инцидентов ИБ; информирование администрации сервис-провайдеров облачных инфраструктур обо всех случаях нарушений ИБ; сбор свидетельств и доказательств для реагирования по случаям инцидентов ИБ в облачных инфраструктурах и другие. С практической точки зрения одним из наиболее эффективных

подходов создания мониторинга ИБ считается применение систем класса SIEM [11–14].

Решения класса SIEM (Security Information and Event Management) предназначены для обеспечения следующих функций:

- управление информацией и событиями безопасности, в том числе в облачных инфраструктурах;
- сбор и хранение зарегистрированных событий безопасности;
- обработка и анализ хранящихся во внутренних базах данных событий ИБ с применением системы правил, создаваемой и управляемой офицером безопасности и уникальной для каждой облачной инфраструктуры.

Реализация этих функций позволяет осуществлять выявление и разбор инцидентов, а также проверку соответствия системы управления ИБ существующим требованиям и нормам, являющимся частью стандартов, рекомендаций, приказов и других нормативных и руководящих документов в этой области [15]. Реализация вышеприведенных функций предполагает наличие в системах класса SIEM АСОД, принципы построения которой были указаны ранее, или, по крайней мере, ее ключевых компонентов.

Однако основным недостатком таких систем является сравнительно длительный период времени, необходимый для анализа данных и принятия решения о том, является данное событие ИБ или их совокупность инцидентом ИБ или нет [16–18].

В основе этого недостатка лежит противоречие между распределенным характером источников информации о событии ИБ в облачных инфраструктурах (как правило, этими источниками являются средства защиты информации, объединенные в облачных инфраструктурах) и централизованным способом принятия решения на действия с инцидентами ИБ. Для разрешения указанного противоречия необходимо, с одной стороны, обеспечить процесс принятия решения наиболее полной информацией, а с другой стороны, эта информация должна быть актуальной. С учетом больших объемов данных о событиях ИБ в АСОД необходимо оптимизировать структуру информационного обеспечения АСОД с учетом структуры и технических характеристик ЛВС.

Особенности функционирования АСОД для мониторинга ИБ объекта информатизации на базе облачной инфраструктуры позволяют для решения задач повышения качества выходной информации при помощи компьютерного моделирования использовать методы теории полезности, позволяющие оценить полезный эффект от размещения информационных элементов в тех или иных вычислительных узлах облачной инфраструктуры [17]. Современные АСОД позволяют устанавливать степень достоверности информации, учитывая не только степень полноты и точности данных (достаточности данных для решения поставленной задачи и соответствия структуры и содержания данных системам, использование которых является оптимальным для решения поставленных задач), но и степень актуальности данных (способность информации отражать реальное состояние объектов на текущий момент времени).

Метод определения оптимальных с точки зрения мониторинга ИБ вычислительных узлов облачной инфраструктуры для размещения в них тех или иных типов информационных элементов и распределения этих элементов по узлам основан на компьютерном моделировании облачной инфраструктуры, в которой проводится мониторинг ИБ и применении методов теории полезности для оценки степени соответствия типов информационных элементов вычислительным узлам облачной инфраструктуры. Специфика управления инцидентами ИБ предполагает работу с массивами данных, что позволяет выделить необходимые наборы данных, которые могут быть распределены по узлам облачной инфраструктуры на основе модели [16–19]. Следовательно, частные модели должны быть использованы, в том числе, для определения структуры и объемов информационного обмена между узлами облачной инфраструктуры. В состав информационного обеспечения АСОД для мониторинга ИБ объекта информатизации в облачной инфраструктуре могут входить как сами данные

о состоянии ИБ объекта информатизации в облачной инфраструктуре, полученные непосредственно от средств защиты информации, развернутых внутри облачной инфраструктуры, так их копии и/или предыстории, полученные в узлах облачной инфраструктуры в местах их использования АСОД для мониторинга ИБ объекта информатизации. В качестве частных критериев этих моделей целесообразно использовать: максиминный критерий полезности информационного обеспечения АСОД для мониторинга ИБ объекта информатизации в облачной инфраструктуре; критерий максимума актуальности информационного обеспечения, распределенного по узлам облачной инфраструктуры для сложных, комплексных систем с невысокой степенью централизации управления [7, 8].

Результатом решения задачи разработки структуры информационного обеспечения аналитической системы обработки данных для мониторинга ИБ объекта информатизации является оптимальный по заданным критериям состав компонентов информационного обеспечения АСОД и их размещение по узлам облачной инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена задача определения рациональной структуры информационного обеспечения АСОД для мониторинга ИБ объекта информатизации в облачной инфраструктуре. При этом рассмотрены СМИБ, построенные на основе современных SIEM-систем, и предложен формализованный подход на базе разработки и использования методов математического и компьютерного моделирования.

В основу формализации и решения этой задачи положены методы теории полезности и исследования операций, которые позволяют с помощью компьютерного моделирования определить оптимальный состав компонентов информационного обеспечения АСОД и их распределение по узлам облачной инфраструктуры с точки зрения общей полезности информации с учетом используемых в этих узлах аналитических информационных технологий для выявления инцидентов ИБ.

В целом такой подход позволяет повысить оперативность процедуры выявления инцидентов ИБ за счет организации рационального обмена информацией между узлами облачной инфраструктуры (средствами защиты информации) с учетом характеристик аналитических процедур обработки данных, и, в целом, качество системы мониторинга ИБ.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Liu Z., Zhao A., Liang M. A port-based forwarding load-balancing scheduling approach for cloud datacenter networks. *J. Cloud Comp.* 2021;10(1):13. <https://doi.org/10.1186/s13677-021-00226-w>
2. Chen J., Wang Y., Liu T. A proactive resource allocation method based on adaptive prediction of resource requests in cloud computing. *J. Wireless Com. Network.* 2021;24. <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01912-8>
3. Wang J., Zhang G., Wang W., Zhang K., Sheng Y. Cloud-based intelligent self-diagnosis and department recommendation service using Chinese medical BERT. *J. Cloud Comp.: Advances, Systems and Applications.* 2021;10(1):4. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00218-2>
4. Chen Y., Liu H., Wang B., Sonompil B., Ping Y., Zhang Z. A threshold hybrid encryption method for integrity audit without trusted center. *J. Cloud Comp.: Advances, Systems and Applications.* 2021;10(1):3. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00222-6>
5. Ngoc T.L., Doan B.H. Capability maturity model and metrics framework for cyber cloud security. *Scalable Computing: Practice and Experience.* 2017;18(4):277–290. <https://doi.org/10.12694/scpe.v18i4.1329>
6. Afolaranmi S.O., Moctezuma L.E.G., Rak M., Casola V., Rios E., Lastra J.L.M. Methodology to Obtain the Security Controls in Multi-cloud Applications. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Cloud Computing and Services Science (CLOSER 2016)*. 2016. V.1. p. 327–332. <http://doi.org/10.5220/0005912603270332>
7. Сизов В.А. Разработка моделей повышения эффективности сохранности данных в распределенной вычислительной среде на основе динамического резервирования данных. В сб.: *Advances in Science and Technology: сб. статей XXI международной научно-практической конференции*. М.: «Актуальность. РФ», 2019. С. 96–100.
8. Сизов В.А. Модели и методы виртуально-восстановительного резервирования данных автоматизированных информационно-управляющих систем в условиях чрезвычайных ситуаций. *Автоматика и телемеханика*. 1998;7:176–184.
9. Arce D.G. Cybersecurity and platform competition in the cloud. *Computers & Security.* 2020;93:101774. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101774>
10. Джинчарадзе Г.Р. Методические аспекты организации процедуры оценки персонала. *Инженерный Вестник Дона*. 2012;2(20):340–345. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-aspekty-organizatsii-protsedury-otsenki-personala>
11. Сизов В.А., Киров А.Д. Проблемы внедрения SIEM-систем в практику управления информационной безопасностью субъектов экономической деятельности. *Открытое образование*. 2020;24(1):69–79. <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2020-1-69-79>
12. Lee J., Kim Y.S., Kim J.H., Kim I.K. Toward the SIEM architecture for cloud-based security services. In: *2017 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*. <https://doi.org/10.1109/CNS.2017.8228696>
1. Liu Z., Zhao A., Liang M. A port-based forwarding load-balancing scheduling approach for cloud datacenter networks. *J. Cloud Comp.* 2021;10(1):13. <https://doi.org/10.1186/s13677-021-00226-w>
2. Chen J., Wang Y., Liu T. A proactive resource allocation method based on adaptive prediction of resource requests in cloud computing. *J. Wireless Com. Network.* 2021;24. <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01912-8>
3. Wang J., Zhang G., Wang W., Zhang K., Sheng Y. Cloud-based intelligent self-diagnosis and department recommendation service using Chinese medical BERT. *J. Cloud Comp.: Advances, Systems and Applications.* 2021;10(1):4. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00218-2>
4. Chen Y., Liu H., Wang B., Sonompil B., Ping Y., Zhang Z. A threshold hybrid encryption method for integrity audit without trusted center. *J. Cloud Comp.: Advances, Systems and Applications.* 2021;10(1):3. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00222-6>
5. Ngoc T.L., Doan B.H. Capability maturity model and metrics framework for cyber cloud security. *Scalable Computing: Practice and Experience.* 2017;18(4):277–290. <https://doi.org/10.12694/scpe.v18i4.1329>
6. Afolaranmi S.O., Moctezuma L.E.G., Rak M., Casola V., Rios E., Lastra J.L.M. Methodology to Obtain the Security Controls in Multi-cloud Applications. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Cloud Computing and Services Science (CLOSER 2016)*. V.1. 2016, p. 327–332. <http://doi.org/10.5220/0005912603270332>
7. Sizov V.A. Development of models for improving the efficiency of data safety in a distributed computing environment based on dynamic data reservation. In: *Advances in Science and Technology: Collection of articles of the XXI International Scientific and Practical Conference*. 2019, p. 96–100. (in Russ.).
8. Sizov V.A. Models and methods of virtual-recovered redundancy of data of automatic information-control systems under extreme conditions. *Autom. Remote Control.* 1998;59(7):1047–1053. [Sizov V.A. Models and methods of virtual-recovered redundancy of data of automatic information-control systems under extreme conditions. *Automat. i Telemekh.* 1998;(7):176–184 (in Russ.).]
9. Arce D.G. Cybersecurity and platform competition in the cloud. *Computers & Security.* 2020;93:101774. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101774>
10. Dzhinchardze G.R. Methodological aspects of the organization of the personnel assessment procedure. *Inzhenernyi Vestnik Dona = Engineering journal of Don.* 2012;2(20):340–345 (in Russ.). Available from URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-aspekty-organizatsii-protsedury-otsenki-personala>
11. Sizov V.A., Kirov A.D. Problems of implementation SIEM-systems in the practice of managing information security of economic entities. *Otkrytoe obrazovanie = Open Education.* 2020;24(1):69–79 (in Russ.). <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2020-1-69-79>
12. Lee J., Kim Y.S., Kim J.H., Kim I.K. Toward the SIEM architecture for cloud-based security services. In: *2017 IEEE Conference on Communications and*

13. Granadillo G.G., El-Barboni M., Debar H. New types of alert correlation for security information and event management systems. In: *2016 8th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/NTMS.2016.7792462>
14. Kavanagh M., Rochford O. *Magic Quadrant for Security Information and Event Management*. Gartner technical report. 2015. 15 p.
15. Марков А.С., Цирлов В.Л. Структурное содержание требований информационной безопасности. *Мониторинг правоприменения*. 2017;1(22):53–61.
16. Nabil M., Soukainat S., Lakbabi A., Ghizlane O. SIEM selection criteria for an efficient contextual security. In: *2017 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. 2017. <https://doi.org/10.1109/ISNCC.2017.8072035>
17. Кирсанов К.К. Теория полезности в период смены концептуальных положений. *Наукоедение (Вестник Евразийской науки)*. 2015;7(2):38. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/37EVN215.pdf>
18. Котенко И.В., Федорченко А.В., Саенко И.Б., Кушнереви́ч А.Г. Технологии больших данных для корреляции событий безопасности на основе учета типов связей. *Вопросы кибербезопасности*. 2017;5(24):2–16. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2017-5-2-16>
19. Федорченко А.В., Левшун Д.С., Чечулин А.А., Котенко И.В. Анализ методов корреляции событий безопасности в SIEM-системах. Часть 2. *Труды СПИИРАН*. 2016;6(49):208–225. <https://doi.org/10.15622/sp.49.11>
20. Network Security (CNS). <https://doi.org/10.1109/CNS.2017.8228696>
21. Granadillo G.G., El-Barboni M., Debar H. New Types of Alert Correlation for Security Information and Event Management Systems. In: *2016 8th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*. 2016. <https://doi.org/10.1109/NTMS.2016.7792462>
22. Kavanagh M., Rochford O. *Magic Quadrant for Security Information and Event Management*. Gartner technical report. 2015. 15 p.
23. Markov A.S., Tsirlov V.L. Structured content of information security requirements. *Monitoring pravoprimereniya = Monitoring of Law Enforcement*. 2017;1(22):53–61 (in Russ.). <https://doi.org/10.21681/2412-8163-2017-1-53-61>
24. Nabil M., Soukainat S., Lakbabi A., Ghizlane O. SIEM selection criteria for an efficient contextual security. In: *2017 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. <https://doi.org/10.1109/ISNCC.2017.8072035>
25. Kirsanov K.K. The theory of utility in the period of change of conceptual provisions. *Naukovedenie (The Eurasian Journal)*. 2015;7(2):38 (in Russ.). Available from URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/37EVN215.pdf>
26. Kotenko I.V., Fedorchenko A.V., Saenko I.B., Kushnerevich A.G. Big data technologies for security event correlation based on event type accounting. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity issues*. 2017;5(24):2–16 (in Russ.). <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2017-5-2-16>
27. Fedorchenko A.V., Levshun D.S., Chechulin A.A., Kotenko I.V. An Analysis of Security Event Correlation Techniques in SIEM-Systems. Part 2. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2016;6(49):209–225 (in Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.49.11>

Об авторах

Сизов Валерий Александрович, д.т.н., профессор, кафедра Прикладной информатики и информационной безопасности Института математики, информационных систем и цифровой экономики ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова» (117997, Россия, Москва, Стремянный пер., 36). E-mail: sizov.va@rea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4844-4714>

Киров Алексей Дмитриевич, специалист, специализированная учебно-научная лаборатория по информационному противоборству в бизнесе, кафедра Прикладной информатики и информационной безопасности Института математики, информационных систем и цифровой экономики ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова» (117997, Россия, Москва, Стремянный пер., 36). E-mail: kirov.ad@rea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8424-3071>

About the authors

Valerii A. Sizov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Applied Informatics and Information Security, Institute of Mathematics, Information Systems and Digital Economy, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanny per., Moscow, 117997 Russia). E-mail: sizov.va@rea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4844-4714>

Aleksey D. Kirov, Specialist, Specialized Educational and Scientific Laboratory on Information Confrontation in Business, Department of Applied Informatics and Information Security, Institute of Mathematics, Information Systems and Digital Economy, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanny per., Moscow, 117997 Russia). E-mail: kirov.ad@rea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8424-3071>

Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования
и неразрушающего контроля

Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing

УДК 681.158.3
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разработка информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера

В.В. Слепцов¹,
В.Л. Афонин²,
А.Е. Аблаева^{1, @},
Динь Ба Фыонг¹

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 101990 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ablaeva@mirea.ru

Резюме. В статье рассмотрены вопросы синтеза и анализа информационно-измерительных и управляющих систем квадрокоптеров. Приведены основные датчики и модули, применяемые для определения параметров координат квадрокоптеров. Рассмотрены регулируемые по скорости электроприводы, применяемые для управления, и особенности их выбора. Приведены системы координат (неподвижная и подвижная) и кинематическая схема, в соответствии с которыми представлена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику движения квадрокоптера и учитывающая предполагаемое плавное движение квадрокоптера с малыми углами крена и тангажа. Разработаны функциональная схема и математическая модель информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера (ИИУС КК) в виде структурной схемы, выполненные с учетом влияния запаздываний поступления информации с датчиков параметров квадрокоптера. Особенностью данной работы является учет конкретных характеристик элементов: регулируемых электроприводов (как постоянного, так и переменного тока), датчиков параметров (барометров, акселерометров, дальномеров и пр.). В работе исследован показательный алгоритм работы информационно-измерительной и управляющей систем квадрокоптера, определены тип и параметры регуляторов систем управления. Особое внимание уделено параметрам настройки для соответствующих контуров управления. Рассмотрено влияние указанных регуляторов информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера на эффекты взаимовлияния координат. Представлены результаты моделирования. Определено оптимальное количество контуров управления координатами информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера и оптимальный вид настроек для получения плавных переходных процессов (без перерегулирования) и исключения взаимовлияния координат на показатели качества.

Ключевые слова: квадрокоптер, регулируемый электропривод, датчики параметров, оптимум по модулю

• Поступила: 17.05.2021 • Доработана: 24.05.2021 • Принята к опубликованию: 25.07.2021

Для цитирования: Слепцов В.В., Афонин В.Л., Аблаева А.Е., Динь Ба Фыонг. Разработка информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):26–36. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Development of an information measuring and control system for a quadcopter

Vladimir V. Sleptsov ¹,
Vyacheslav L. Afonin ²,
Anna E. Ablaeva ^{1, @},
Dinh Ba Phuong ¹

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 101990 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ablaeva@mirea.ru

Abstract. The article deals with the issues of synthesis and analysis of information-measuring and control systems of quadcopters. The main sensors and modules used to determine the parameters of the coordinates of quadcopters are given. The speed-controlled electric drives used for control and the features of their choice are considered. The coordinate systems (fixed and mobile) and the kinematic scheme are given, according to which a system of differential equations is presented. The system describes the dynamics of the quadcopter movement and takes into account the expected smooth movement of the quadcopter with small roll and pitch angles. A functional scheme and a mathematical model of the information-measuring and control system of the quadcopter in the form of a block diagram are developed taking into account the influence of delays in the receipt of information from the sensors of the quadcopter parameters. A special feature of this work is to take into account the specific characteristics of the elements: adjustable electric drives (both direct and alternating current), parameter sensors (barometers, accelerometers, rangefinders, etc.). The paper studies an illustrative algorithm for the operation of the information-measuring and control system of the quadcopter. The type and parameters of the controllers of the quadcopter control systems are determined. Special attention is paid to the settings for the control contours at the corresponding coordinates. The influence of the controllers of the coordinate control systems of the information-measuring and control systems of the quadcopter on the effects of the interaction of coordinates is considered. The simulation results are presented. The optimal number of control loops for the coordinates of the information-measuring and control systems of the quadcopter and the optimal type of settings for obtaining smooth transients (without overshoot) and for excluding the interaction of coordinates on quality indicators are determined.

Keywords: quadcopter, adjustable electric drive, parameter sensors, optimum modulus

• Submitted: 17.05.2021 • Revised: 24.05.2021 • Accepted: 25.07.2021

For citation: Sleptsov V.V., Afonin V.L., Ablaeva A.E., Dinh Ba Phuong. Development of an information measuring and control system for a quadcopter. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):26–36 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-26-36>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ГЛОССАРИЙ

Рыскание – угловое движение летального аппарата вокруг его вертикальной оси.

Тангаж – угловое движение, при котором его продольная ось изменяет свое направление относительно горизонтальной плоскости.

Крен – отклонение плоскости симметрии от вертикального положения.

GLOSSARIUM

Yaw – angular movement of the aircraft around its vertical axis.

Pitch – is an angular motion in which its longitudinal axis changes its direction relative to the horizontal plane.

Roll – the deviation of the plane of symmetry from the vertical position.

ВВЕДЕНИЕ

Современный квадрокоптер (КК) представляет собой беспилотное летающее устройство, имеющее четыре управляемых винта, обеспечивающих перемещение по заданной траектории, и предназначенное для транспортировки, как правило, легких приборов и предметов на ограниченное расстояние для разведки полезных ископаемых и других наблюдений [1, 2]. Общий вид типового квадрокоптера представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид типового квадрокоптера

Применение квадрокоптеров дает определенные преимущества [3–5]:

- рентабельность;
- оперативность;
- способность развивать высокую скорость, планировать, а также зависать над контрольной точкой;
- меньшая стоимость изготовления и эксплуатации (при сравнимой эффективности решения поставленных задач);
- возможность применения без участия летчиков.

При этом не возникает опасности катастрофы.

Недостатками являются нерешенные вопросы интеграции квадрокоптеров в единое воздушное пространство, а также вопросы сертификации, страхования и регистрации, над которыми уже ведутся работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Движение квадрокоптера описывается в неподвижной и подвижной системах координат, представленных на рис. 2.

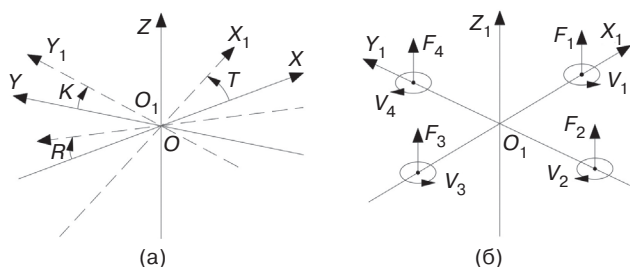


Рис. 2. Неподвижная и подвижная системы координат – (а) и кинематическая схема квадрокоптера – (б)

Приняты следующие обозначения: X, Y, Z – неподвижная система координат; X_1, Y_1, Z_1 – подвижная система координат; F_i – силы тяги винтов; V_i – скорости вращения исполнительных двигателей электроприводов; R – угол рыскания; T – угол тангажа; K – угол крена; g – ускорение свободного падения; ω_i – угловая скорость вращения i -го винта ($i = \overline{1,4}$).

Динамику квадрокоптера можно описать системой дифференциальных уравнений, которая имеет следующий вид [6]:

$$\ddot{X} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} \times \times [\cos R \sin T \cos K + \sin R \sin K] - \frac{A_x}{m} \dot{X}, \quad (1)$$

$$\ddot{Y} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} \times \times [\sin R \sin T \cos K + \cos R \sin K] - \frac{A_y}{m} \dot{Y}, \quad (2)$$

$$\ddot{Z} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} \cos T \cos K - \frac{A_z}{m} \dot{Z} - g, \quad (3)$$

$$\ddot{T} = \frac{l}{J_{xx}} (F_4 - F_2), \quad (4)$$

$$\ddot{K} = \frac{l}{J_{yy}} (F_3 - F_1), \quad (5)$$

$$\ddot{R} = \frac{lb}{J_{zz} K_T} (F_1 - F_2 + F_3 - F_4), \quad (6)$$

$$F_i = K_T \omega_i^2. \quad (7)$$

Здесь приняты следующие обозначения: J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} – моменты инерции квадрокоптера вокруг соответствующих осей; m – масса квадрокоптера; l – расстояние от центра квадрокоптера до мест крепления электродвигателей; b – технологический коэффициент; A_x, A_y, A_z – коэффициенты удельного сопротивления; ω – частота вращения вала двигателя.

Конкретные значения квадрокоптера: $m = 0.5$ кг; $l = 0.25$ м; $K_T = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²/рад²); $b = 1.2 \cdot 10^{-7}$ (Н·м·с²/рад²); $A_x = A_y = A_z = 1$ кг/с; $J_{xx} = J_{yy} = 5 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $J_{zz} = 9 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $\omega_{\text{макс}} = 300$ рад/с.

Так как предполагается плавное движение КК с малыми углами крена и тангажа, то $\cos T \approx \cos K \approx \cos R \approx 1$, а $\sin T \approx T$, $\sin K \approx K$, $\sin R \approx 0$. Кроме того, предполагая плавное движение в плоскости XOY , т.е. выполнение условия

$(F_1 + F_2 + F_3 + F_4) = mg$, уравнения (1)–(7) можно преобразовать к следующему виду:

$$\ddot{X} = K_{Tx}(T) - \frac{A_x}{m} \dot{X}, \quad (8)$$

$$\ddot{Y} = -K_{Ky}(K) - \frac{A_y}{m} \dot{Y}, \quad (9)$$

$$\ddot{Z} = \frac{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}{m} - \frac{A_z}{m} \dot{Z} - g, \quad (10)$$

$$\ddot{T} = \frac{l}{J_{xx}}(F_4 - F_2), \quad (11)$$

$$\ddot{K} = \frac{l}{J_{yy}}(F_3 - F_1), \quad (12)$$

$$\ddot{R} = \frac{lb}{J_{zz} \times K_T}(F_1 - F_2 + F_3 - F_4). \quad (13)$$

Здесь приняты обозначения: K_{Tx} , K_{Ky} – коэффициенты взаимовлияния по соответствующим координатам (X , Y) квадрокоптера.

Для исключения возможных неопределенностей в понимании дальнейшего материала введем понятие ИИУС КК.

Под ИИУС КК понимают совокупность технических средств и программного обеспечения, осуществляющую сбор, хранение и обработку информации о параметрах движения, а также выработку управляющих воздействий на элементы управления [7].

Для определения параметров координат квадрокоптера применяют следующие основные датчики [8–11].

Барометр представляет собой прибор для измерения давления, по показаниям которого можно судить о высоте полета. Наименьшей погрешностью определения высоты обладает комбинация датчика давления и высоты GPS. Параметры широко применяемого барометра MS5611 (компания MEAS Switzerland) следующие:

- измеряемое давление: от 10 гПа до 1200 гПа;
- точность: до 0.1 м в самом точном режиме;
- время измерения: до 10 мс.

Ультразвуковой датчик представляет собой прибор для получения надежной информации о расстоянии до крупных целей даже в средах с сильными акустическими или электрическими источниками шума. Параметры широко применяемого ультразвукового датчика I2XL-MaxSonar-EZ4 следующие:

- интервал считывания показаний 67 мс (15 Гц);
- максимальное расстояние: 765 см;
- разрешение в диапазоне от 25 до 765 см: –0.1 м.

Магнитометр – это электронный компас, дающий информацию о полете относительно магнитного поля Земли и размещенный на плате контроллера.

Гирискосп – прибор для измерения скорости изменения углов (как правило, их измеряют по трем осям).

Акселерометр представляет собой прибор для измерения линейного ускорения КК в трехосевой системе. Параметры широко применяемого, совмещенного в одном корпусе гироскопа и акселерометра MPU6050 следующие:

- гироскоп, диапазон: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 °/с;
- акселерометр, диапазон: ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16 g.

Видеокамера представляет собой прибор для записи фиксируемого изображения. Параметры широко применяемой видеокамеры Stack-X-1080P следующие:

- фокусное расстояние камеры: 2.8 мм;
- угол объектива камеры: Н: 130°, В: 98°;
- датчик камеры: 1/2.5 дюймов CMOS;
- частота кадров DVR: 60 кадров в секунду;
- формат видео: NTSC или PAL.

Модуль навигации GPS ГЛОНАСС (например, Flight control PCBA - H507A-05) позволяет отслеживать и измерять такие параметры, как расстояние, скорость и время. Это фактически и система слежения, позволяющая определять точное местоположение аппарата.

Модуль контроллера полета позволяет квадрокоптеру отслеживать свое текущее положение и скорость. Кроме того, он получает сигналы от передатчика оператора. Контроллер полета взаимодействует с датчиками, размещенными на борту КК для обеспечения плавного полета, а именно: акселерометром, гироскопами и т.п. Помимо этого контроллер полета вычисляет скорость каждого из четырех двигателей и отправляет сигналы управления на электронные контроллеры скорости или ESC.

Регулируемые по скорости электроприводы (РЭП) играют важную роль в квадрокоптерах. РЭП состоят из блока управления – в англоязычном сообществе его называют «Electric Speed Controller» (электронный контроллер скорости) или сокращенно ESC – и электродвигателя. Существенно, что в настоящее время в качестве электродвигателей в квадрокоптерах применяются как магнитоэлектрические двигатели постоянного тока, так и вентильные двигатели. Однако в последнее время стали широко использоваться вентильные электродвигатели (ВД), что связано с их хорошими эксплуатационными характеристиками [12]: большим удельным моментом, малой инерционностью, простотой управления.

Параметры широко применяемого РЭП, состоящего из блока управления ESC HW30A и электродвигателя Walkera QR X350, следующие: напряжение

питания – 12 В; максимальный ток – 30 А; номинальная частота вращения ротора – 314 рад/с.

Перейдем к разработке функциональной схемы и математической модели ИИУС КК, уделяя особое внимание ее компонентам [13–16]. При этом пристальное внимание обратим на величины запаздываний поступления информации с соответствующих датчиков параметров квадрокоптера – по положению координат и их скоростям. Эти запаздывания будем учитывать в виде постоянных времени передаточных функций соответствующих датчиков.

С учетом представленных выше уравнений были разработаны функциональная и структурная схема ИИУС КК, представленные на рис. 3 и рис. 4.

Приняты следующие обозначения: $РП_z$, $РП_x$, $РП_y$, $РП_r$, $РП_k$, $РП_r$ – соответственно регуляторы положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; РЭП1 – РЭП4 – четыре регулируемых по скорости электропривода; $РС_r$, $РС_k$ и $РС_r$ – регуляторы скорости по координатам T , K и R ; $ДП_z$, $ДП_x$, $ДП_y$, $ДП_r$, $ДП_k$, $ДП_r$ – соответственно датчики положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; $ДС_r$, $ДС_k$, $ДС_r$ – датчики скорости по координатам T , K и R ; КУ1, КУ2 – корректирующие элементы; U_{3z} , U_{3x} , U_{3y} , U_{3r} , U_{3k} , U_{3r} – соответственно сигналы задания положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; $U_{Дz}$, $U_{Дx}$, $U_{Дy}$, $U_{Дr}$, $U_{Дk}$, $U_{Дr}$ – соответственно сигналы с датчиков положения координат Z , X , Y , T , K , R ; $U_{РПz}$, $U_{РПr}$ – соответственно выходные сигналы с регуляторов положения координат Z и R ; U_{3r} , U_{3k} – сигналы задания координат T и K ; U_{3Cr} , U_{3Ck} , U_{3Cr} – сигналы задания скоростей координат T , K , R ; $U_{ДСr}$, $U_{ДСk}$, $U_{ДСr}$ – сигналы с датчиков скорости координат T , K , R ; $U_{РСr}$, $U_{РСk}$, $U_{РСr}$ – сигналы с регуляторов скорости координат T , K , R ; F_z – сила тяги по координате Z ; P – вес КК; V_z – скорость перемещения по координате Z ; M_r , V_t – соответственно момент и скорость по координате T ; M_k , V_k – соответственно момент и скорость по координате K ; M_r , V_r – соответственно момент и скорость по координате R ; K_{tz} , K_{tr} , K_{tk} , K_{tr} – физические коэффициенты; $W_{РПz}(S)$, $W_{РПx}(S)$, $W_{РПy}(S)$, $W_{РПr}(S)$, $W_{РПk}(S)$, $W_{РПr}(S)$ – соответственно передаточные функции регуляторов положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; $W_{РСr}(S)$, $W_{РСk}(S)$ – соответственно передаточные функции регуляторов скорости по координатам T , K ; S – оператор Лапласа; $K_{РЭП}$, $T_{РЭП}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени РЭП; $K_{ДПz}$, $T_{ДПz}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате Z ; $K_{ДПx}$, $T_{ДПx}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате X ; $K_{ДПy}$, $T_{ДПy}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная

времени датчика положения по координате Y ; $K_{ДПr}$, $T_{ДПr}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате R ; $K_{ДПk}$, $T_{ДПk}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате K ; $K_{ДПr}$, $T_{ДПr}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика положения по координате R ; $K_{ДСr}$, $T_{ДСr}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате T ; $K_{ДСk}$, $T_{ДСk}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате K ; $K_{ДСr}$, $T_{ДСr}$ – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени датчика скорости по координате R ; K_{vz} , T_{vz} – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате Z ; K_{vx} , T_{vx} – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате X ; K_{vy} , T_{vy} – соответственно коэффициент передачи и постоянная времени узла скорости по координате Y ; K_{vt} – коэффициент передачи узла скорости по координате T ; K_{vk} – коэффициент передачи узла скорости по координате K ; K_{vr} – коэффициент передачи узла скорости по координате R ; $F_{РПz}$, $F_{РПx}$, $F_{РПy}$, $F_{РПr}$, $F_{РПk}$, $F_{РПr}$ – соответственно нелинейности регуляторов положений по координатам Z , X , Y , T , K , R ; F_1 , F_2 – нелинейности корректирующих устройств; $F_{РСr}$, $F_{РСk}$ – нелинейности регуляторов скорости по координатам T и K .

Контуры управления координатами КК настраивают на технический и симметричный оптимумы [17]. Конкретные значения ИИУС КК приведены ниже.

Для контура управления по координате Z :
 $K_{tz} = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²)/рад²; $K_{vz} = 5$ (1/с); $T_{vz} = 2$ с; $K_{РЭП} = 2.5$ рад/(дискрет·с); $T_{РЭП} = 0.001$ с; $K_{ДПz} = 1$; $T_{ДПz} = 0.01$ с. Контур настроен на технический оптимум, в этом случае

$$W_{РПz}(S) = 5000(1 + 0.5S)/(1 + 0.05S).$$

Для контура управления по координате X :
 $K_{tx} = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²)/рад²; $K_{vx} = 50$ 1/(кг·м²); $K_{vx} = 50$ (1/с); $T_{vx} = 2$ с; $K_{ДСr} = 1$; $T_{ДСr} = 0.01$ с; $K_{ДПx} = 1$; $T_{ДПx} = 0.05$ с; U_{Cz} , U_{Cr} , U_{Ck} , U_{Cr} – сигналы с выходов нелинейностей $F_{РПz}$, $F_{РСr}$, $F_{РСk}$, $F_{РСr}$; $U_{РПx}$, $U_{РПy}$, $U_{РПz}$, $U_{РПr}$, $U_{РПk}$ – выходные сигналы по координатам X , Y , Z , R , T , K ; V_x , V_y – скорость по координатам X и Y .

Контур скорости по координате T настроен на технический оптимум: $W_{РСr}(S) = 500$.

Контур положения по координате T настроен на технический оптимум, тогда $W_{РПr}(S) = 500$.

Контур положения по координате X настроен на технический оптимум, в этом случае

$$W_{РПx}(S) = 0.1(1 + 0.5S)/(1 + 0.05S).$$

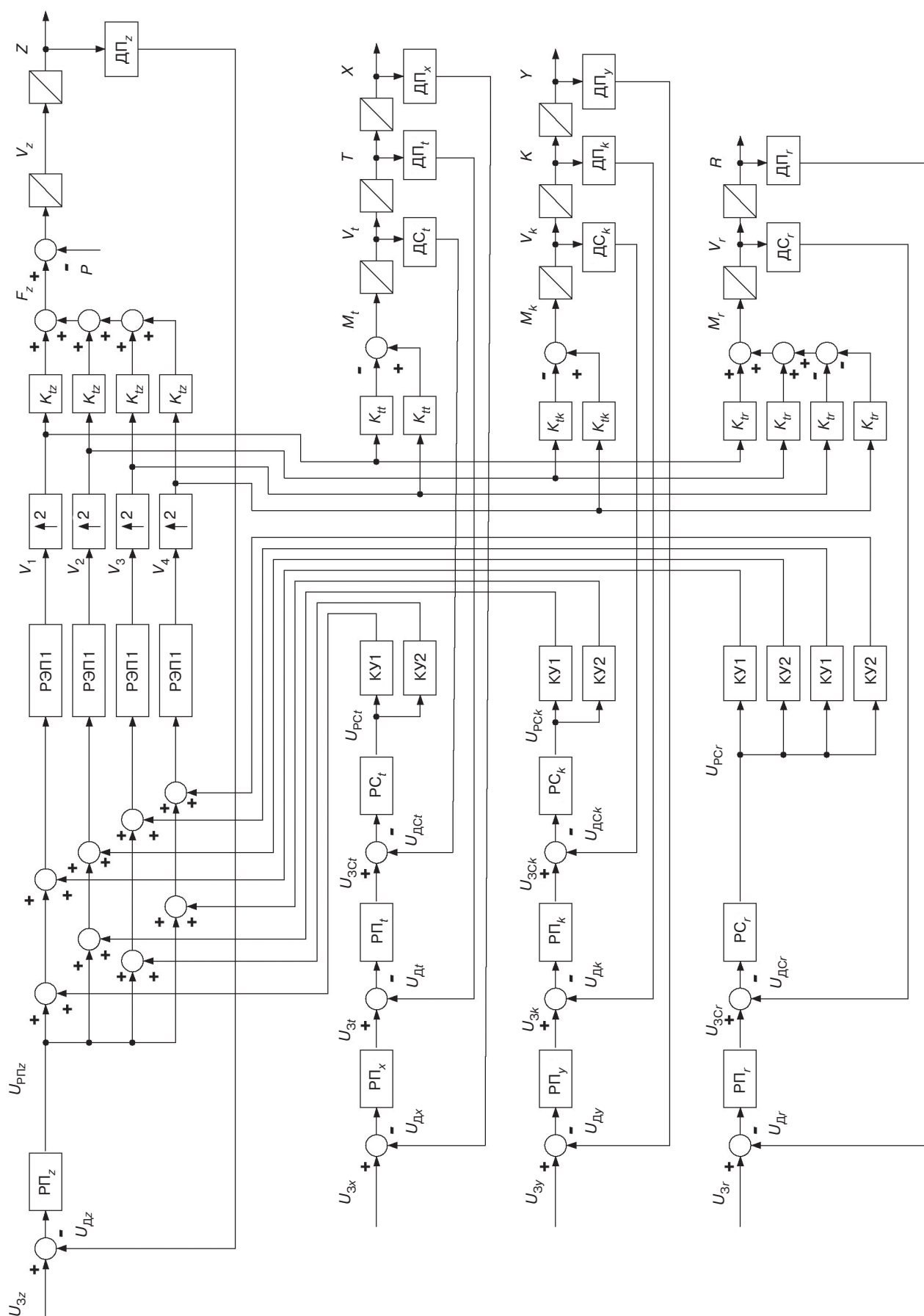


Рис. 3. Функциональная схема ИИУС КК

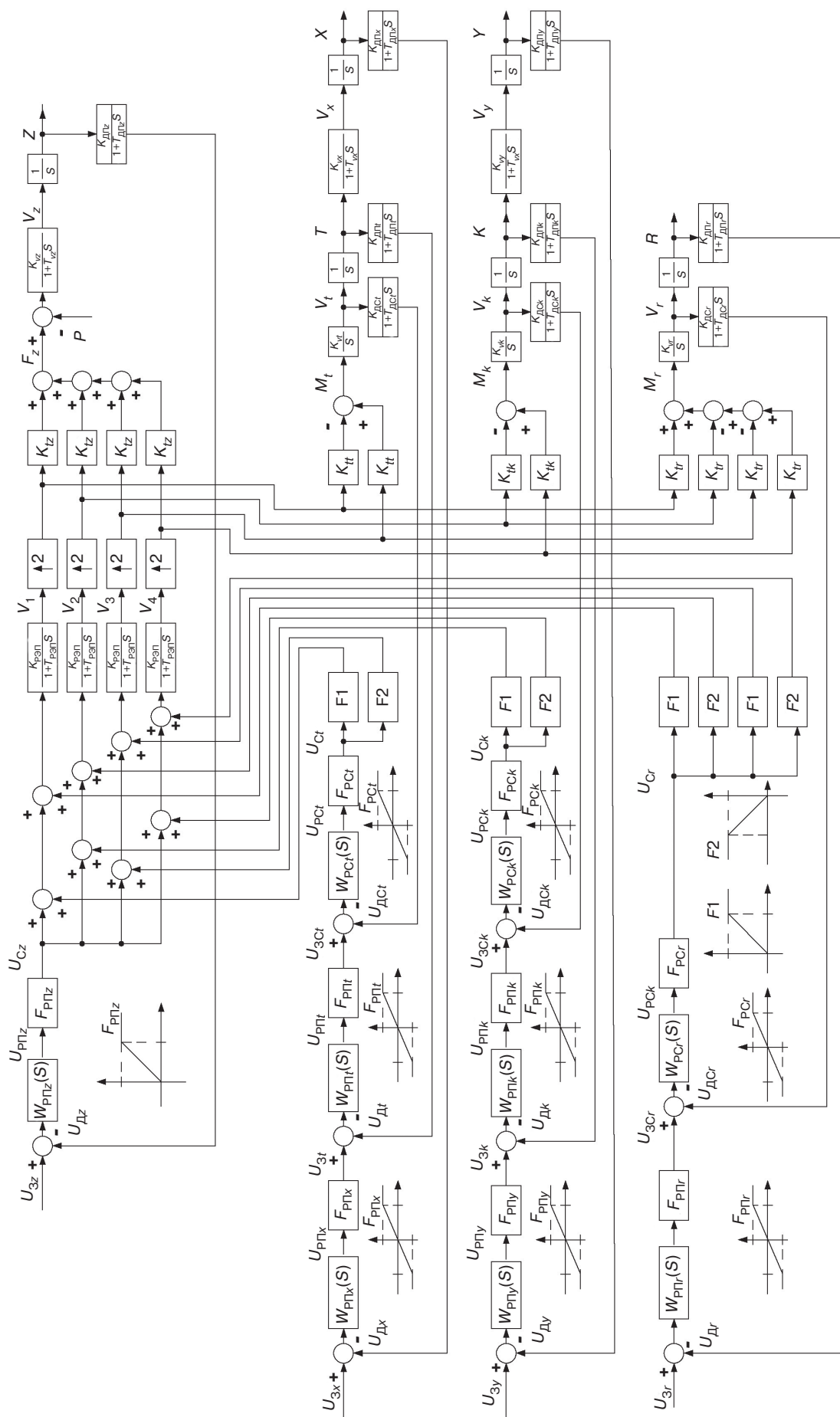


Рис. 4. Структурная схема ИИУС КК

Для контура управления по координате Y : $K_{yk} = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²)/рад²; $K_{yk} = 50$ 1/(кг·м²); $K_{yy} = 50$ (1/с); $T_{yy} = 2$ с; $K_{ДСk} = 1$; $T_{ДСk} = 0.01$ с; $K_{ДПk} = 1$; $T_{ДПk} = 0.05$ с; $K_{ДПy} = 1$; $T_{ДПy} = 0.05$ с.

Контур скорости по координате K настроен на технический оптимум, тогда $W_{РСК}(S) = 500$.

Контур положения по координате K настроен на технический оптимум: $W_{РПК}(S) = 500$.

Контур положения по координате Y настроен на технический оптимум, в этом случае

$$W_{РПy}(S) = 0.1(1 + 0.5S)/(1 + 0.05S).$$

Для контура управления по координате R : $K_{rr} = 4 \cdot 10^{-5}$ (Н·с²)/рад²; $K_{vr} = 50$ 1/(кг·м²); $K_{ДСr} = 1$; $T_{ДСr} = 0.01$ с; $K_{ДПr} = 1$; $T_{ДПr} = 0.01$ с.

Контур скорости по координате R настроен на технический оптимум, тогда $W_{РСr}(S) = 500$.

Контур положения по координате R настроен на технический оптимум, в этом случае $W_{РПr}(S) = 500$.

Так как все системы управления координатами квадрокоптера осуществляют свои функции через 4 исполнительных электродвигателя, то между ними существует сильное взаимовлияние, которое необходимо учитывать при работе.

В работе исследовался следующий достаточно простой, но показательный алгоритм работы ИИУС КК: подъем квадрокоптера на высоту 1 м; через 1 с движение квадрокоптера вправо на 1 м; движение квадрокоптера влево на 1 м. В этом случае в квадрокоптере задействованы системы управления координатой Z , координатой X , а также координатой T (как промежуточной). Принципиально важно наблюдать при работе системы управления по одной координате (например, X) за ее влиянием на работу системы управления по другой координате (например, Z). В случае правильно выбранных регуляторов такое влияние должно быть минимальным.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Поведение синтезированной ИИУС КК было промоделировано путем подачи на вход системы управления координатой Z ступенчатого сигнала амплитудой 1 м, а на вход системы управления координатой X через время, равное 1 с – сигнала типа «меандр» амплитудой 1 м и частотой 0.125 Гц. Результаты моделирования представлены на рис. 5–7.

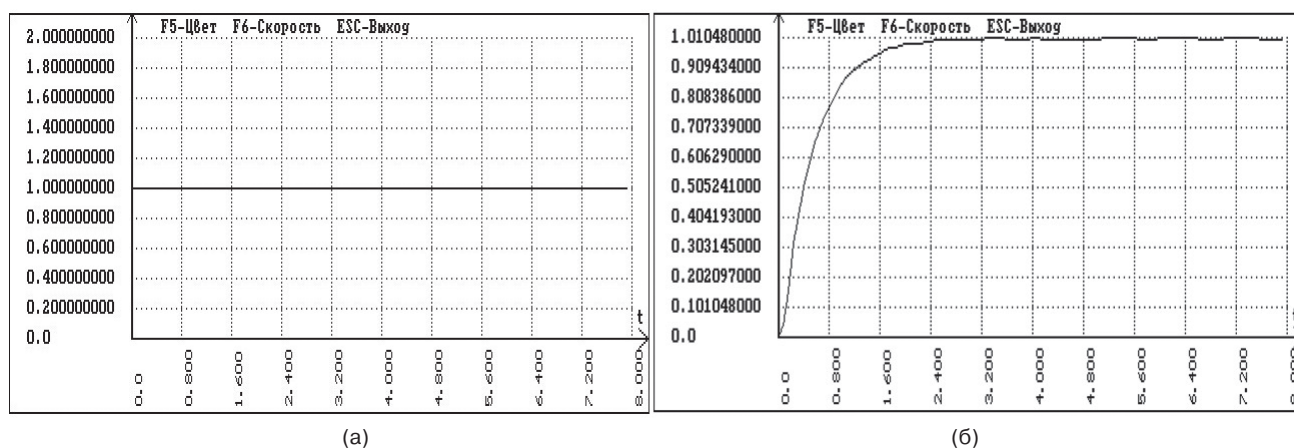


Рис. 5. Сигналы задания положения по координате Z – (а) и реального положения – (б)

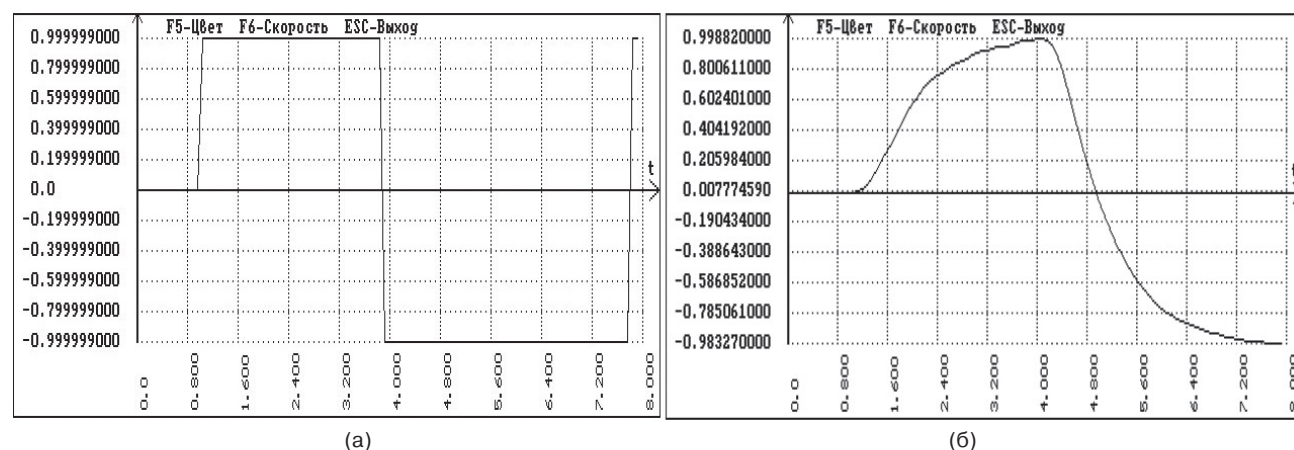


Рис. 6. Сигналы задания положения по координате X – (а) и реального положения – (б)

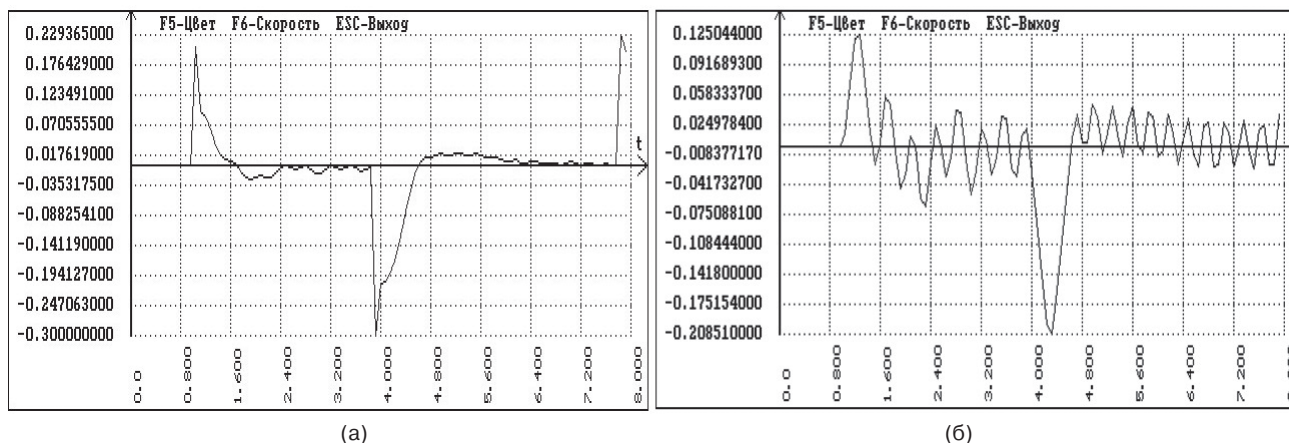


Рис. 7. Сигналы задания положения по координате T – (а) и реального положения – (б)

Анализ рис. 5–7 показывает, что синтезированная ИИУС в составе КК обладает хорошими регулировочными характеристиками – отсутствием перерегулирования и малой статической ошибкой (менее 10 мм). Следует отметить, что такие хорошие показатели были получены при условии неучета погрешностей датчиков параметров координат квадрокоптера. В случае их учета статические ошибки существенно возросли.

Кроме того, видно, что регуляторы систем управления координатами ИИУС КК нейтрализуют взаимовлияния координат.

Необходимо отметить, что при изменении параметров регуляторов координат в сторону ухудшения характеристик контуров управления наблюдаются эффекты взаимовлияния координат – появление небольших перемещений одних координат при работе других и т.д.

ВЫВОДЫ

На основании вышеизложенного материала можно сделать следующие выводы:

- ИИУС КК целесообразно выполнить в виде 4 контуров управления координатами X , Y , Z , R ;
- контуры управления координатами T и K следует подчинить регуляторам положения контуров управления координат X и Y ;
- контуры управления координатами следует настраивать на оптимум по модулю, что обеспечивает получение плавных переходных процессов (без перерегулирования) и практически исключает взаимовлияние координат друг на друга.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарев А.Н., Киричек Р.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016;4(4):13–23. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/13-23.pdf>
2. Подрезов Ю.В. Особенности применения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга чрезвычайных лесопожарных ситуаций. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2019;3:64–72. URL: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J17785461>
3. Джунипер А. Дроны. *Полное практическое руководство*: пер. с англ. М.: КоЛибри; 2019. 159 с. ISBN 978-5-389-15611-1
4. Гололобов В.Н., Ульянов В.И. *Беспилотники для любознательных*. СПб: Наука и Техника (НиТ); 2018. 249 с. ISBN 978-5-94387-878-7
5. Ющенко А.С., Лебедев К.Р., Забихафар С.Х. Система управления квадрокоптером на основе адаптивной нейронной сети. *Наука и Образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2017;7:262–267.

REFERENCES

1. Bondarev A.N., Kirichek R.V. Overview of unmanned aerial apparatus for general use and regulation of air UAV movement in different countries. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Telecom IT*. 2016;4(4):13–23 (in Russ.). Available from URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/20164/13-23.pdf>
2. Podrezov Yu.V. Features of the use of unmanned aerial vehicles to monitor the forest fire emergency situations. *Problemy bezopasnosti i chrezvychainykh situatsii = Safety and Emergencies Problems*. 2019;3:64–72 (in Russ.). Available from URL: <http://lamb.viniti.ru/sid2/sid2free?sid2=J17785461>
3. Juniper A. *The Complete Guide to Drones: Whatever your budget - Build + Choose + Fly + Photograph*. New York: Wellfleet Press; 2016. 144 p. [Juniper A. *Drones. Complete practical guide*. Moscow: KoLibri; 2019. 159 p. (in Russ.). ISBN 978-5-389-15611-1]
4. Gololobov V.N., Ul'yanov V.I. *Bespilotniki dlya lyuboznatel'nykh (Drones for the curious)*. Saint-Petersburg: Nauka i Tekhnika (NiT); 2018. 249 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94387-878-7

6. Luukkonen T. *Modelling and Control of Quadcopter. School of Science*. Espoo; 2011. 26 p. URL: https://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11_public.pdf
7. Рокачевский О.А., Слепцов В.В., Аблаева А.Е., Динь Ба Фыонг. Синтез контура управления координатой высоты информационно-измерительной и управляющей системы квадрокоптера. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2021;1:38–43.
8. Чулин Н.А., Миронова И.В. Система управления беспилотным летательным аппаратом. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2018;9(81):1–11. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1802>
9. Куликов Г.В., Тамбовский С.С. Оценка качества связи с БПЛА в условиях городской застройки. *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2015;1(6):205–217.
10. Соловьев В.В., Финаев В.И., Шадрина В.В., Пушкина И.В. Навигация для обеспечения коммуникаций в группе подвижных объектов. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2018;3(197):102–112. <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-3-102-112>
11. Чугунов М.В., Полунина И.Н., Попков М.А. Проектирование квадрокоптера на базе интегрированной модельной среды. *Инженерные технологии и системы*. 2019;29(2):169–186. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>
12. Высоцкий В.Е., Воронин С.М., Горшков Р.Г. Имитационное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов вентильного двигателя. *Вестник ИГЭУ*. 2011;1:54–57. URL: http://vestnik.ispu.ru/sites/vestnik.ispu.ru/files/publications/54-57_2.pdf
13. Савицкий А.В., Павловский В.Е. Модель квадрокоптера и нейросетевой алгоритм управления. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2017;77. 20 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-77>
14. Павловский В.Е., Савицкий А.В. Исследование обратной задачи для вычисления управляющих воздействий для квадрокоптера. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2017;17. 19 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2017-17>
15. Красовский А.Н., Суслова О.А. Об оптимальном управлении движением дрона-квадрокоптера по критерию качества затрат энергии. *Успехи современной науки и образования*. 2017;4(3):193–197.
16. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Савин А.И. Метод генерации оптимальных траекторий квадрокоптера посредством выпуклого программирования. *Вестник ВГТУ*. 2018;14(5):54–63. URL: https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/vestnik-voronezhskogo-gosudarstvennogo-tekhnicheskogo-universiteta/-bulletin-of-voronezh-state-technical-university/the-issues-of-the-journal-the-bulletin-of-voronezh-state-technical-university/14_5.pdf
17. Гарипов В.К., Прокуратов И.И., Слепцов В.В. *ИИУС электроприводов для автоматизированного производства*. Саарбрюккен: Lap Lambert, Academic Publishing; 2014. 131 с.
5. Yushenko A.S., Lebedev K.R., Zabihaifar S.H. The adaptive neural network control of quadrotor helicopter. *Nauka i Obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman. = Science & Education. Scientific Education of Bauman MSTU*. 2017;7:262–267 (in Russ.).
6. Luukkonen T. *Modelling and Control of Quadcopter. School of Science*. Espoo; 2011. 26 p. Available from URL: https://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluu11_public.pdf
7. Rokachevsky O.A., Sleptsov V.V., Ablaeva A.E., Dinh Ba Phuong. Synthesis of the height coordinate control loop of the information-measuring and control system of the quadcopter. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya. = Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2021;1:38–43 (in Russ.).
8. Chulin N.A., Mironova I.V. Control system of unmanned aerial vehicle. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering J: Science and Innovation*. 2018;9(81):1–11 (in Russ.). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2018-9-1802>
9. Kulikov G.V., Tambovsky S.S. Assessment of the quality of communication with the UAV in urban terrain. *Vestnik MGTU MIREA = Herald of MSTU MIREA*. 2015;1(6):205–217 (in Russ.).
10. Solov'ev V.V., Finaev V.I., Shadrina V.V., Pushkina I.V. Navigation for communication in a group of vehicles. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2018;3(197):102–111 (in Russ.). <https://doi.org/10.23683/2311-3103-2018-3-102-112>
11. Chugunov M.V., Polunina I.N., Popkov M.A. The quadcopter design based on integrated model environment. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy = Engineering technologies and systems*. 2019;29(2):169–186 (in Russ.). <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.169-186>
12. Vysocky V.E., Voronin S.M., Gorshkov R.G. Simulation of electromagnetic and electromechanical processes of thyatron motor. *Vestnik IGEU = Vestnik of Ivanovo Power Engineering Institute*. 2011;1:54–57 (in Russ.). Available from URL: http://vestnik.ispu.ru/sites/vestnik.ispu.ru/files/publications/54-57_2.pdf
13. Savickij A.V., Pavlovsky V.E. Model of quadcopter and algorithm of vehicle control based on neural network. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Keldysh Institute Preprints*. 2017;77. 20 p. (in Russ.). <https://doi.org/10.20948/prepr-2017-77>
14. Pavlovskiy V.E., Savickij A.V. The solving of the inverse problem for computation control action for quadcopter. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Keldysh Institute Preprints*. 2017;17. 19 p. (in Russ.). <http://doi.org/10.20948/prepr-2017-17>
15. Krasovskij A.N., Suslova O.A. On the optimal control of the movement of a drone - quadcopter by the criterion of the quality of energy consumption. *Uspekhi sovremennoi nauki i obrazovaniya = Achievements of modern science and education*. 2017;4(3):193–197 (in Russ.).
16. Savin S.I., Vorochaeva L.Yu., Savin A.I. Optimal trajectory generation for a quadrotor using convex programming. *Vestnik VGTU = The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018;14(5):54–63 (in Russ.). Available from URL: https://cchgeu.ru/science/nauchnye-izdaniya/vestnik-voronezhskogo-gosudarstvennogo-tekhnicheskogo-universiteta/-bulletin-of-voronezh-state-technical-university/the-issues-of-the-journal-the-bulletin-of-voronezh-state-technical-university/14_5.pdf

17. Garipov V.K., Prokuratov I.I., Sleptsov V.V. *IIUS elektropivodov dlya avtomatizirovannogo proizvodstva (Information-Measuring and Control Systems of Electric Drives for Automated Production)*. Saarbrücken: Lap Lambert, Academic Publishing; 2014. 131 p. (in Russ.).

Об авторах

Слепцов Владимир Владимирович, д.т.н., профессор, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sleptsov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1003-8411>

Афонин Вячеслав Леонидович, д.т.н., главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101990, Россия, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4). E-mail: afoninwl@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3824-0707>

Аблаева Анна Евгеньевна, старший преподаватель, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ablaeva@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1767-5413>

Динь Ба Фьонг, аспирант, кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: nhoht_ck49@yahoo.com. <https://orcid.org/0000-0001-6153-4776>

About the authors

Vladimir V. Sleptsov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Instruments, Information and Measurement Systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sleptsov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1003-8411>

Vyacheslav L. Afonin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (4, Maly Kharitonyevsky pereulok, Moscow, 101990 Russia). E-mail: afoninwl@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3824-0707>

Anna E. Ablaeva, Senior Lecturer, Department of Instruments, Information and Measurement Systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ablaeva@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1767-5413>

Dinh Ba Phuong, Postgraduate Student, Department of Instruments, Information and Measurement Systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: nhoht_ck49@yahoo.com. <https://orcid.org/0000-0001-6153-4776>

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.621
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-37-45>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Проектирование преселектора радиоприемника в диапазоне метровых волн

Е.В. Гуров ¹,
С.У. Увайсов ^{2, @},
В.В. Черновверская ²,
Р.М. Увайсов ²

¹ ООО «Сименс», Москва, 115184 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Резюме.

Цели. Качество преселектора радиоприемника в значительной мере определяет его основные характеристики, в том числе чувствительность. Преселектор обычно состоит из линейных элементов – катушек индуктивности, конденсаторов, малошумящих усилителей и ключей. При работе на высоких частотах нельзя считать эти компоненты идеальными, так как активные и реактивные паразитные параметры вносят значительный вклад в частотную характеристику цепей. Поэтому для моделирования высокочастотных схем требуются более сложные модели компонентов, учитывающие паразитные составляющие. Однако при применении для всех компонентов уточненных моделей или S-параметров вероятность получения неудовлетворительных результатов сохраняется, поскольку соединительные линии и контактные площадки также вносят заметные искажения в частотную характеристику. Это наблюдается и для коротких линий длиной около 5 мм, которые оказывают влияние на частотах порядка 100 МГц. Поэтому подобные явления необходимо учитывать при разработке. Цель работы – обеспечение требуемых характеристик преселектора в процессе его автоматизированного схемотехнического проектирования на основе компьютерного моделирования.

Методы. Использована методика Гурова Е.В. для проектирования аналоговых фильтров диапазона метровых волн, но применительно к преселектору радиоприемника. Она включает в себя методы дискретной оптимизации, имитационного моделирования Монте-Карло, метод моментов для электромагнитного моделирования с использованием функции Грина. Экспериментальные результаты получены путем изготовления опытного образца и измерений с помощью векторного анализатора цепей.

Результаты. Представлен процесс проектирования преселектора радиоприемника диапазона метровых волн, состоящего из двух аналоговых ключей, полосового фильтра на сосредоточенных компонентах, малошумящего усилителя и фильтра высоких частот. Приведены результаты моделирования и экспериментальные результаты, их сравнение.

Выводы. Проведенные численные и натурные исследования позволяют говорить о том, что методика Гурова Е.В. для проектирования аналоговых LC-фильтров в диапазоне метровых волн применима и для более сложных цепей, таких как преселектор радиоприемника.

Ключевые слова: радиоприемник, преселектор, SPICE-модель, матрица рассеивания, математическое моделирование, электронный компонент, микрополосковая линия, диапазон частот, паразитные параметры

• Поступила: 28.09.2021 • Доработана: 12.10.2021 • Принята к опубликованию: 19.10.2021

Для цитирования: Гуров Е.В., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Увайсов Р.М. Проектирование преселектора радиоприемника в диапазоне метровых волн. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):37–45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-37-45>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Very high frequency radio receiver preselector design

Egor V. Gurov ¹,
Saygid U. Uvaysov ^{2, @},
Victoria V. Chernoverskaya ²,
Ruslan M. Uvaysov ²

¹ Siemens LLC, Moscow, 115184 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Abstract.

Objectives. The quality of a radio receiver preselector largely determines its main characteristics, including sensitivity. A preselector usually consists of linear elements: inductors, capacitors, low noise amplifiers, and switches. At high frequencies, the components cannot be considered as ideal ones, since active and reactive parasitic parameters significantly affect the frequency response of the components and, as a consequence, the network. Therefore, simulation of the networks requires more sophisticated component models, which take into account parasitic parameters. However, if refined components models are applied, it is still possible to obtain unsatisfactory results, since interconnections and footprint pads also affect the frequency response. This is true even if short lines with a length of about 5 mm are used at frequencies of about 100 MHz. These features must be taken into account for RF network design. The purpose of the work is to ensure the required characteristics of the preselector in the design process based on computer simulation.

Methods. Egor Gurov's methodology for analog VHF LC-filters was applied to radio receiver preselector design. The methodology contains the methods of discrete optimization, Monte-Carlo method, momentum analysis with Green's functions. Experimental results were obtained by prototype implementation and measurement with a vector network analyzer. The purpose of the work is to ensure the required preselector characteristics in the design process based on computer simulation.

Results. The article presents the preselector design process. The preselector contains two analog switches, an analog band-pass filter, an analog high-pass filter, and a low-noise amplifier. Simulation and experimental results with their comparison are presented in the article.

Conclusions. Satisfactory results were obtained. It means that Egor Gurov's method can be applied for more complex networks design such as radio receiver preselectors.

Keywords: radio receiver, preselector, SPICE model, scattering matrix, mathematical modeling, electronic component, microstrip line, frequency range, parasitic parameters

• Submitted: 28.09.2021 • Revised: 12.10.2021 • Accepted: 19.10.2021

For citation: Gurov E.V., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Uvaysov R.M. Very high frequency radio receiver preselector design. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):37–45 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-37-45>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Максимальная чувствительность радиоприемника определяется уровнем его собственных шумов. Для достижения высокой чувствительности требуется тщательное проектирование узлов радиоприемных устройств [1, 2]. Наибольшее влияние на уровень внутренних шумов имеет преселектор, подключенный непосредственно к антенне. Это следует из формулы Фрииса для коэффициента шума в случае последовательного соединения нескольких каскадов:

$$F_{\text{total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}, \quad (1)$$

где F_{total} – суммарный выходной шум; n – число каскадов; F_1 – коэффициент шума первого каскада; G_1 – коэффициент усиления по мощности первого каскада и т.д. Значения коэффициентов шума и коэффициентов усиления являются безразмерными величинами.

Можно отметить, что коэффициент шума первого каскада присутствует полностью в суммарном выходном шуме, а коэффициент шума второго каскада делится на коэффициент усиления первого [1]. Отсюда можно предположить, что для получения максимальной чувствительности радиоприемника необходимо установить малошумящий усилитель в непосредственной близости от антенны. Однако в [3] показано, что такой подход не всегда обеспечивает минимальное значение собственного шума. В условиях большого числа мощных излучающих станций, например, в крупных городах, широкополосный малошумящий усилитель может давать более высокий выходной шум, чем ожидается. Решением данной проблемы является установка перед малошумящим усилителем полосового фильтра, выделяющего интересующую полосу частот.

В диапазоне частот от нескольких десятков мегагерц до гигагерца для получения произвольной частотной характеристики (произвольной полосы пропускания и полосы задерживания) удобно использовать пассивные LC-фильтры. Процесс проектирования таких фильтров в настоящее время полностью автоматизирован (например, с помощью программного обеспечения *Nuhertz Technologies FilterSolutions*). Здесь используется хорошо

известный метод аппроксимации амплитудно-частотной характеристики, что позволяет сформировать электрическую схему фильтра с номинальными значениями параметров компонентов, а также получить передаточную функцию [4–7].

Данный метод предполагает, что используются идеальные пассивные компоненты (катушки индуктивности и конденсаторы), межсоединения не оказывают влияния на частотную характеристику. Однако в диапазоне частот выше 10 МГц неидеальность компонентов и влияние топологии оказывают существенное влияние на частотную характеристику [8]. В программном обеспечении *Nuhertz Technologies FilterSolutions* есть возможность учесть добротность компонентов и даже заменить их на S-параметры, однако отсутствует возможность учесть влияние топологии. Компания Keysight в своем программном обеспечении *Genesys* пытается полностью автоматизировать процесс проектирования фильтров с учетом паразитных параметров и топологии. В работе [9] представлен метод проектирования LC-фильтров в программе *Keysight Genesys* с учетом паразитных параметров компонентов, допусков и топологии.

Преселектор радиоприемника, помимо фильтра, может содержать малошумящий усилитель, который обычно имеет неравномерную амплитудно-частотную характеристику, а его входной и выходной импедансы могут отличаться от стандартных 50 Ом. Возможно применение нескольких полосовых фильтров, что требует использования аналоговых ключей.

В данной статье приведен пример проектирования преселектора радиоприемника, состоящего из аналоговых ключей, переключающих полосовые фильтры, одного полосового фильтра, малошумящего усилителя и фильтра высоких частот. По результатам моделирования был изготовлен макетный образец и представлены практические результаты, полученные с помощью векторного анализатора цепей [10]. Полученные данные можно рассматривать как развитие метода [9] для синтеза более сложных цепей, чем LC-фильтры.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается проектирование преселектора супергетеродинного радиоприемника с рабочей полосой частот 114...122 МГц (на частоте 121.5 МГц

необходимо получить максимальную чувствительность) и промежуточной частотой 87 МГц. Предполагается использование трех поддиапазонов, но в рамках данной статьи рассмотрен только один, при этом учтено влияние аналоговых ключей, осуществляющих переключение фильтров. Структурная схема входной цепи представлена на рис. 1.

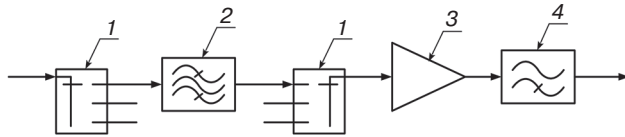


Рис. 1. Структурная схема преселектора:

1 – аналоговый ключ; 2 – полосовой фильтр;
3 – малошумящий усилитель; 4 – фильтр высоких частот

В качестве аналоговых ключей, переключающих полосовые фильтры, использована микросхема PE42430 компании Peregrine Semiconductor, а в качестве малошумящего усилителя – микросхема TQP3M9035 производителя Qorvo. Фильтр высоких частот необходим для дополнительного подавления входных сигналов, которые являются нежелательными, на частоте, равной промежуточной. Кроме того, он увеличивает крутизну спада и улучшает подавление мощных радиовещательных станций в диапазоне 88...108 МГц. Полосовой фильтр также должен подавлять зеркальный канал не менее чем на 50 дБ.

Таким образом, требования ко всей цепи можно описать следующими выражениями:

$$\begin{cases} A(f) > A_{\text{pass}}, & f_{\text{pass1}} \leq f \leq f_{\text{pass2}}, \\ A(f) < A_{\text{stop}}, & f < f_{IF}, f > f_{IM}, \\ K(f) > 1, \\ B_1(f) > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $A(f)$ – амплитудно-частотная характеристика цепи (зависимость коэффициента усиления цепи от частоты); f – частота; A_{pass} – минимально допустимое усиление сигнала в полосе пропускания;

A_{stop} – максимально допустимое усиление сигнала в полосе задерживания; f_{pass1} и f_{pass2} – минимальная и максимальная частота полосы пропускания, соответственно; f_{IF} – значение промежуточной частоты; f_{IM} – минимальная частота полосы зеркального канала; K и B_1 – коэффициенты стабильности, описание которых приведено на сайте Keysight Knowledge Center¹. Так как цепь имеет активный компонент, необходимо также удостовериться, что в нем не будет происходить самовозбуждения, для чего и вводятся требования на коэффициенты стабильности. Ограничения на коэффициенты стабильности должны выполняться на всех частотах. В частном случае можно ограничиться частотами моделирования, так как самовозбуждения каскада не будет, если он не усиливает сигнал. Стоит отметить, что представленные коэффициенты стабильности применяются для цепей, содержащих только один усилительный каскад.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕСЕЛЕКТОРА

Моделирование преселектора было проведено в программе *Keysight Genesys* 2018. В качестве моделей аналоговых ключей и малошумящего усилителя использованы их S-параметры, размещенные на сайте производителя. Указанная программа позволяет проводить моделирование цепей с применением S-параметров, SPICE моделей, а также проводить электромагнитный анализ топологии печатной платы методом моментов. Таким образом, учтены как влияния паразитных параметров компонентов, так и влияние межсоединений.

Функциональная схема преселектора представлена на рис. 2. С целью минимизации размеров

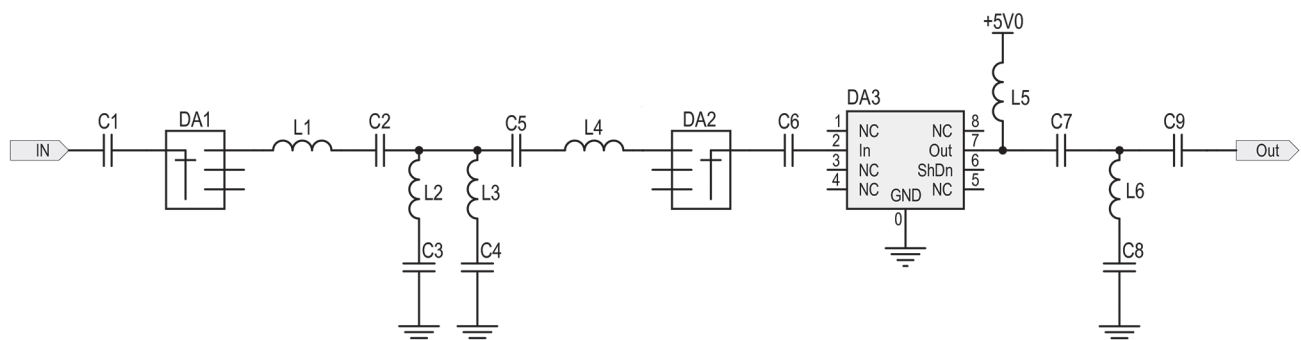


Рис. 2. Функциональная схема преселектора

¹ URL: <https://edadocs.software.keysight.com/genesys2018/simulation/getting-started-with-genesys-simulation/getting-started-with-measurements/stability-factor-and-measure>, дата обращения 25.10.2021. [URL: <https://edadocs.software.keysight.com/genesys2018/simulation/getting-started-with-genesys-simulation/getting-started-with-measurements/stability-factor-and-measure>. Accessed October 25, 2021.]

преселектора и удовлетворения условиям (2) использован полосовой фильтр третьего порядка. Сигнал с частотой, равной промежуточной частоте, подавляется с помощью шунтирующего последовательного LC-контура и последовательных конденсаторов.

Все конденсаторы использованы типоразмером 0402, катушки индуктивности – типоразмером 0603 или 1206. Применены блокирующие конденсаторы C1 и C6 с номинальным значением емкости 0.01 мкФ.

Далее была составлена схема для моделирования в среде *Keysight Genesys* с топологией. Все компоненты были соединены с помощью микрополосковых линий. Топологическая модель представлена на рис. 3. Помимо металлизации и посадочных мест она также содержит контуры компонентов на слое шелкографии.

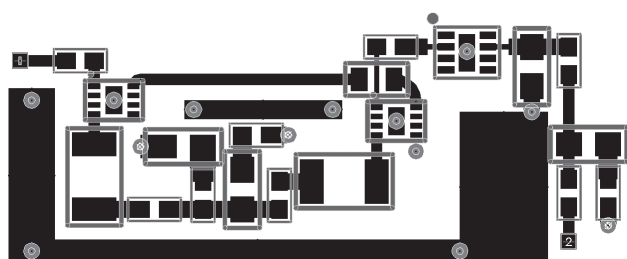


Рис. 3. Топология входной цепи

В качестве моделей катушек индуктивности и конденсаторов изначально были выбраны соответствующие модели с добротностью (идеальная катушка/конденсатор с добротностью или идеальная катушка/конденсатор с последовательно соединенным активным сопротивлением). Это позволяет осуществить вариацию номинальных значений параметров компонентов, чего не позволяют осуществить более сложные и точные модели. Предполагалось, что абсолютное активное последовательное сопротивление не окажет значительного влияния на точность расчета на данном этапе^{2,3} [11, 12]. Начальные значения параметров компонентов были получены с помощью

² Керамические конденсаторы MLCC: особенности применения. URL: <https://www.compel.ru/lib/56541>, дата обращения 25.10.2021. [Ceramic capacitors MLCC: application features. URL: <https://www.compel.ru/lib/56541>. Accessed October 25, 2021. (in Russ.).]

³ Физический смысл групповой задержки фильтра. Цифровые фильтры с линейной фазочастотной характеристикой. Теория и практика цифровой обработки сигналов. URL: <http://www.dsplib.ru/content/filters/linphase/linphase.html> [The physical meaning of the group delay of the filter. Digital filters with a linear phase-frequency characteristic. Theory and practice of digital signal processing. URL: <http://www.dsplib.ru/content/filters/linphase/linphase.html>. Accessed October 25, 2021. (in Russ.).]

встроенных средств автоматического синтеза фильтров.

Расчет номинальных значений параметров компонентов осуществлялся путем оптимизации в соответствии с методикой, приведенной в [9]. Согласно данной методике, сначала применяются простые модели компонентов и осуществляется подбор номинальных значений компонентов. После проведения оптимизации проводится анализ чувствительности и наименее чувствительный компонент заменяется более сложной моделью, где уже нельзя свободно в широком диапазоне менять значение основного параметра. Затем повторно проводят оптимизацию. И так до тех пор, пока все компоненты не будут заменены на более сложные и точные модели.

В результате все модели катушек индуктивности и конденсаторов были заменены соответствующими S-параметрами, предоставляемые производителями. Граничные условия, позволившие получить требуемую частотную характеристику всей цепи, установленные в программе *Keysight Genesys*, представлены на рис. 4. Весовые коэффициенты (Weight) были установлены, чтобы придать желаемый вид частотной характеристике. Изначально они все были равны 1, а в процессе оптимизации были изменены вручную. Ошибка по критерию умножается на данный коэффициент. Целью оптимизации являлась минимизация суммарной ошибки.

Optimization Properties

Use	Measurement	Op	Target	Target Units	Weight	Min	Max	Units
☒	S21	>	24.5	dB	4	112	125	MHz
☒	S21	>	26	dB	5	118	124	MHz
☒	S21	<	-29	dB	1		80	MHz
☒	S21	<	-42	dB	1	255		MHz
☒	S21	<	-39	dB	2	80	89	MHz
☒	S22	<	-20	dB	1	112	125	(MHz)
☒	S11	<	-12	dB	1	112	125	(MHz)
☒		<		None				None

Рис. 4. Граничные условия оптимизации

Далее приведены результаты моделирования после оптимизации. На рис. 5 представлены амплитудно-частотная характеристика (S21), а также возвратные потери (S11, S22). Затененная область отображает указанные на рис. 4 граничные условия. На рис. 6 приведены значения коэффициентов стабильности (K , B_1), а также групповая задержка (ГВЗ) всей цепи³. В данном случае требования к групповой задержке не предъявлялись, и она представлена в ознакомительных целях.

Перечень компонентов, использованных при проведении моделирования, представлен в табл. 1.

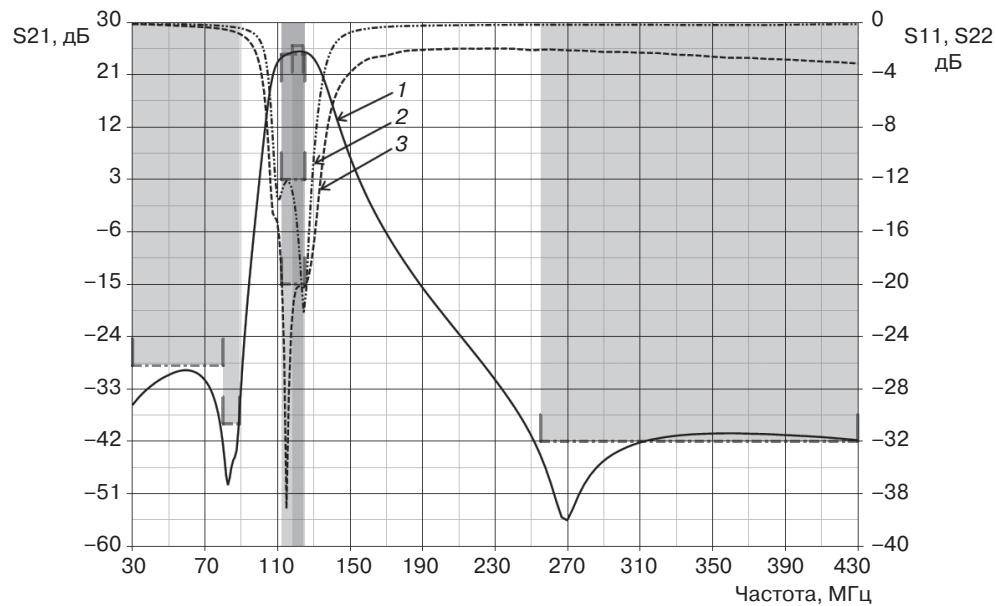


Рис. 5. АЧХ и возвратные потери преселектора:
1 – амплитудно-частотная характеристика (S_{21}); 2 – возвратные
потери (S_{11}); 3 – возвратные потери (S_{22})

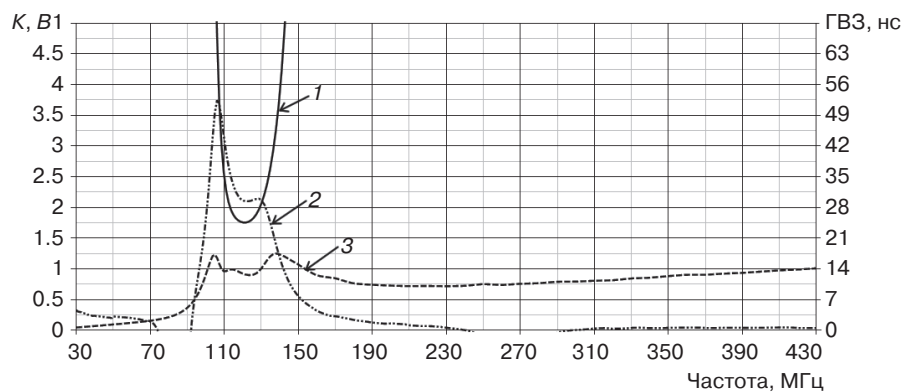


Рис. 6. Коэффициенты стабильности и групповая задержка преселектора: 1 – коэффициент стабильности K (должен быть больше 1);
2 – групповая задержка (ГВЗ); 3 – коэффициент стабильности B_1
(должен быть больше 0)

Таблица 1. Перечень компонентов входной цепи

Позиционные обозначения	Номинальные значения	Серийный номер	Производитель
C1, C6, C9	0.01 мкФ 5%	GRM1555C1E103JE01	Murata
C2	3.9 ± 0.1 пФ	GJM1555C1H3R9BB01	Murata
C3, C4, C8	43 пФ 2%	GJM1555C1H430GB01	Murata
C5	3.3 ± 0.05 пФ	GJM1555C1H3R3WB01	Murata
C7	33 пФ 5%	GJM1555C1H330JB01	Murata
DA1, DA2	–	PE42430	Peregrine
DA3	–	TQP3M9035	Qorvo
L1	390 нГн 2%	1206CS-391XGEB	Coilcraft
L2	75 нГн 2%	LQW18AN75NG80	Murata
L3	8.2 ± 0.2 нГн	LQW18AN8N2C80	Murata
L4	470 нГн 2%	1206CS-470XGEB	Coilcraft
L5	47 нГн 5%	LQW18AN47NJ80	Murata
L6	82 нГн 2%	LQW18AN82NG80	Murata

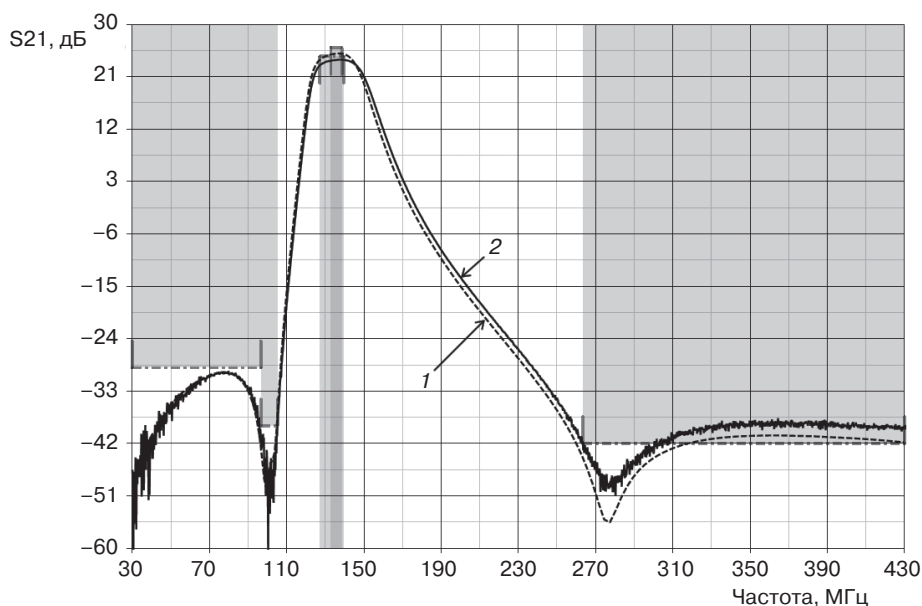


Рис. 7. АЧХ входной цепи: моделирование и экспериментальные данные:
1 – результат моделирования; 2 – экспериментальная характеристика

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотренный преселектор радиоприемника был выполнен на 4-слойной печатной плате из стеклотекстолита FR-4. Топология, представленная на рис. 3, была выполнена на верхнем слое, на ближайшем внутреннем слое присутствовал сплошной полигон, подключенный к «земле», то есть, являлся опорным слоем [8]. Входной сигнал подавался с разъема типа SMA, установленного на печатной плате, выходной сигнал снимался через разъем типа U.FL-R-SMT. Частотная характеристика была получена с помощью векторного анализатора цепей Rohde and Schwarz ZVA8.

Вместо конденсаторов серии GJM были установлены аналогичные конденсаторы серии GRM, имеющие статус «не рекомендовано для новых разработок», поскольку на момент монтажа данной цепи необходимые конденсаторы еще не были закуплены. Они имеют меньшую добротность, поэтому можно ожидать большее затухание в полосе, чем на модели, но без существенного искажения формы частотной характеристики.

Экспериментальные результаты и их сравнение приведены на рис. 7. На графике приведена только амплитудно-частотная характеристика (S_{21}). Возвратные потери и коэффициенты стабильности имели удовлетворительные характеристики.

В полосе пропускания коэффициент усиления экспериментальной характеристики оказался примерно на 1 дБ ниже, чем в модели. Как было указано ранее, это связано с применением низкодобротных керамических конденсаторов, отличных от тех, которые были использованы в модели. В целом, обе

характеристики имеют хорошее соответствие, особенно на низких частотах. В методе, описанном в [9], сказано, что можно добиться более качественной частотной характеристики путем подбора наиболее чувствительных компонентов уже на макетном образце. В данном случае этого сделано не было, так как частотная характеристика цепи удовлетворяет заданным требованиям. Тщательный подбор компонентов может быть полезен в составе уже готового устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Входная схема преселектора радиоприемника является наиболее важной, так как в значительной степени определяет его чувствительность. В статье рассмотрен процесс проектирования конкретной входной схемы преселектора радиоприемника в диапазоне метровых волн, состоящей из аналоговых ключей, одного полосового фильтра, малошумящего усилителя и дополнительного фильтра высоких частот. Аналоговые ключи и малошумящий усилитель имеют свои индивидуальные входные и выходные импедансы и неравномерность частотной характеристики. Проектирование проводилось с учетом этих параметров.

Спроектированный преселектор реализован на макетном образце, а экспериментальная характеристика получена с помощью векторного анализатора цепей. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальной характеристики приведено на рис. 7. Можно отметить хорошее соответствие между ними. Несоответствие усиления в полосе пропускания на значение около 1 дБ обусловлено

применением конденсаторов из другой серии с меньшей добротностью, так как выбранных в процессе моделирования не было в наличии на этапе монтажа макетной платы, что и привело к некоторому росту активных потерь. Кроме того, улучшения частотной характеристики можно добиться подбором наиболее чувствительных компонентов непосредственно на макете, но для решения конкретных задач, для которых эта цепь проектировалась, этого не требовалось.

В [9] показано, что в диапазоне метровых волн на частотную характеристику аналогового фильтра значительное влияние оказывают паразитные параметры составных компонентов и межсоединения топологии печатной платы. По аналогии с предложенным в [9] методом проектирования аналоговых LC-фильтров спроектирована схема преселектора

радиоприемника. Показано, что метод также позволяет учитывать частотные характеристики аналоговых ключей и малошумящих усилителей, а также контролировать стабильность усилительных трактов.

Таким образом, представленные в статье результаты позволяют сделать вывод о том, что границы применимости метода проектирования аналоговых LC-фильтров, описанного в [9], могут быть расширены на разработку более сложных схем, имеющих в своем составе, в том числе и активные компоненты.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brannon B. Basics of designing a digital radio receiver (Radio 101). *Analog Devices*. 1998. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/basics-designing-digital-radio-receiver.html>, дата обращения 25.10.2021
2. Гуров Е.В., Роткевич А.С. Экспериментальная оценка чувствительности радиоприемника при различных структурах входной цепи. В сб.: *Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов имени Е.В. Арменского: материалы конференции*. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ; 2018. С. 135–136.
3. Гуров Е.В. Влияние радиочастотного фильтра на ухудшение соотношения сигнал/шум малошумящего усилителя: экспериментальная оценка. *Технологии электромагнитной совместимости*. 2017;2(61):49–55.
4. Paarmann L.D. *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*. NY: Kluwer Academic Publishers; 2001. 440 p.
5. Гуров Е.В., Увайсов С.У., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Алгоритм дискретной параметрической оптимизации для решения задач синтеза аналоговых фильтров диапазона очень высоких частот. *Качество. Инновации. Образование*. 2019;2(160):53–63. <https://doi.org/10.31145/1999-513x-2019-2-53-63>
6. Смирнов А.В. Метод одновременной оптимизации характеристик электрических фильтров в частотной и временной областях. *Российский технологический журнал*. 2018;6(6):13–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>
7. Hassan A.H. *Design and Size Reduction Analysis of Micro Strip HBP Filters*. Master's Thesis in Electronics. Master's Program in Electronics/Telecommunications. Sweden, Gävle: University of Gävle. January, 2015. 68 p.
8. Кечиев Л.Н. *Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры*. М.: Группа ИДТ; 2007. 616 с. ISBN 978-5-94833-024-2
9. Gurov E., Uvaysova A.S., Uvaysov S.U., Uvaysov R.M. Design method for non-tunable LC-filters. In: *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/MWENT47943.2020.9067472>

REFERENCES

1. Brannon B. Basics of designing a digital radio receiver (Radio 101). *Analog Devices*. 1998. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/basics-designing-digital-radio-receiver.html>. Accessed October 25, 2021.
2. Gurov E.V., Rotkevich A.S. Experimental evaluation of the sensitivity of a radio receiver for various structures of the input circuit. In: *Mezhvuzovskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov imeni E.V. Armenskogo: materialy konferentsii* (Collection of materials of the Interuniversity scientific and Technical Conference of students, Postgraduates and Young Professionals named after E.V. Armensky). Moscow: MIEM NIU VShE; 2018, p. 135–136. (in Russ.).
3. Gurov E.V. The influence of radio frequency filter on a low-noise amplifier signal to noise ratio degradation: experimental assessment. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti = Technologies of Electromagnetic Compatibility*. 2017;2(61):49–55 (in Russ.).
4. Paarmann L.D. *Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective*. NY: Kluwer Academic Publishers; 2001. 440 p.
5. Gurov E.V., Uvaysov S.U., Uvaysova A.S., Uvaysova S.S. Discrete parametric optimization for very high frequency analog filters synthesis. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie. = Quality. Innovation. Education*. 2019;2(160):53–63 (in Russ.). <https://doi.org/10.31145/1999-513x-2019-2-53-63>
6. Smirnov A.V. Method of simultaneous optimization of radio devices performance in frequency and time domains. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(6):13–27 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>
7. Hassan A.H. *Design and Size Reduction Analysis of Micro Strip HBP Filters*. Master's Thesis in Electronics. Master's Program in Electronics/Telecommunications. Sweden, Gävle: University of Gävle. January 2015. 68 p.
8. Kechiev L.N. *Proektirovanie pechatnykh plat dlya tsifrovoi bystrodeistvuyushchei apparatury* (Design of printed circuit boards for digital high-speed equipment). Moscow: Gruppya IDT; 2007. 616 p. ISBN 978-5-94833-024-2

10. Хибель М. Основы векторного анализа цепей: пер. с англ. М.: Издательский дом МЭИ; 2009. 501 с. ISBN 978-5-383-01305-2
11. Гуров Е.В., Увайсов С.У., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Номинальные и эффективные значения параметров катушек индуктивности и конденсаторов на высоких частотах. *Российский технологический журнал*. 2019;7(4):44–53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-44-53>
12. Cain J. Parasitic Inductance of Multilayer Ceramic Capacitors. KYOCERA AVX Components Corporation. February 2002. URL: <https://www.avx.com/docs/techinfo/CeramicCapacitors/parasitc.pdf>
9. Gurov E., Uvaysova A.S., Uvaysov S.U., Uvaysov R.M. Design Method for Non-Tunable LC-Filters. In: *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/MWENT47943.2020.9067472>
10. Hiebel M. *Fundamentals of Vector Network Analysis*. 3rd ed. München: Rohde & Schwarz GmbH & Co.; 2008. 420 p.
[Hiebel M. *Osnovy vektornogo analiza tsepei*. Moscow: Izdatel'skii dom MEI; 2009. 501 p. ISBN 978-5-383-01305-2]
11. Gurov E.V., Uvaysov S.U., Uvaysova A.S., Uvaysova S.S. Nominal and actual values of inductor and capacitor parameters at high frequencies. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(4):44–53 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-44-53>
12. Cain J. Parasitic Inductance of Multilayer Ceramic Capacitors. KYOCERA AVX Components Corporation. February 2002. Available from URL: <https://www.kyocera-avx.com/docs/techinfo/CeramicCapacitors/parasitc.pdf>

Об авторах

Гуров Егор Владимирович, к.т.н., ведущий инженер (Исследования и разработки) ООО «Сименс» (115184, Россия, Москва, ул. Большая Татарская, д. 9). E-mail: gurov.yegor@gmail.com.

Увайсов Сайгид Увайсович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvaysov@yandex.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Черновверская Виктория Владимировна, к.т.н., доцент, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: chernoverskaya@mirea.ru.

Увайсов Руслан Магомедович, магистрант 2-го года обучения, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: uvajsov.r.m@edu.mirea.ru.

About the authors

Egor V. Gurov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer (Research and Design), Siemens LLC (9, ul. Bolshaya Tatarskaya, Moscow, 115184 Russia). E-mail: gurov.yegor@gmail.com.

Saygid U. Uvaysov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Design and Production of Radio-electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvaysov@yandex.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Victoria V. Chernoverskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Production of Radio-electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: chernoverskaya@mirea.ru.

Ruslan M. Uvaysov, 2nd year Undergraduate Student, Department of Design and Production of Radio-electronic Means, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: uvajsov.r.m@edu.mirea.ru.

УДК 621.391.072
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-46-56>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оптимальная нелинейная фильтрация сигналов М-ФМ на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой

Г.В. Куликов[®],
До Чунг Тиен,
Е.В. Самохина

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: kulikov@mirea.ru

Резюме.

Цели. Широкое распространение радиосистем передачи данных с использованием сигналов с многопозиционной фазовой манипуляции (М-ФМ) обусловлено их высокой помехоустойчивостью и простотой построения передающей и приемной частей аппаратуры. Проведенные исследования показали, что наличие в радиоканале, кроме шумовой, нефлуктуационных, в частности, гармонических помех существенно снижает помехоустойчивость приема дискретной информации, энергетический проигрыш в этом случае в зависимости от интенсивности помехи может составлять от долей дБ до 10 дБ и более, поэтому борьба с ними является важной задачей для таких радиосистем. Цель работы – синтез и анализ алгоритма оптимальной нелинейной фильтрации сигналов М-ФМ на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой.

Методы. Использованы положения теории оптимальной нелинейной фильтрации сигналов и методы статистической радиотехники.

Результаты. Проведены синтез и анализ алгоритма оптимальной нелинейной фильтрации сигналов М-ФМ на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой. Синтезированный приемник содержит блок оценки дискретного символа, две схемы фазовой автоподстройки частоты опорных генераторов, формирующих оценочные копии сигнала и помехи, и перекрестные связи между ними, получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум и интенсивности помехи μ . Установлено, что нескомпенсированные флуктуации начальной фазы полезного сигнала оказывают большее влияние на помехоустойчивость приемника, чем аналогичные флуктуации фазы гармонической помехи, особенно при малой позиционности сигналов.

Выводы. Сравнение полученных результатов с результатами, полученными в случае отсутствия цепи компенсации гармонической помехи, показывает, что использование полученных алгоритмов фильтрации фаз позволяет обеспечить практически полное подавление гармонической помехи. Так, при $\mu = 0.5$ для вероятности ошибки $P_{\text{об}} = 10^{-2}$ энергетический выигрыш при $M = 2$ составляет около 2.5 дБ, при $M = 4$ – около 6 дБ, при $M = 8$ и $M = 16$ – не менее 10 дБ.

Ключевые слова: многопозиционная фазовая манипуляция, гармоническая помеха, оптимальная нелинейная фильтрация, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 08.02.2021 • Доработана: 17.02.2021 • Принята к опубликованию: 25.07.2021

Для цитирования: Куликов Г.В., До Чунг Тиен, Самохина Е.В. Оптимальная нелинейная фильтрация сигналов М-ФМ на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):46–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-46-56>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Optimal nonlinear filtering of M-PSK signals against a background of harmonic interference with a random initial phase

Gennady V. Kulikov[@],
Do Trung Tien,
Elena V. Samokhina

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: kulikov@mirea.ru

Abstract.

Objectives. The widespread use of radio data transmission systems using signals with multiposition phase shift keying (MPSK) is due to their high noise immunity and the simplicity of constructing the transmitting and receiving parts of the equipment. The conducted studies have shown that the presence of non-fluctuation interference, in particular, harmonic interference, in the radio channel significantly reduces the noise immunity of receiving discrete information. The energy loss in this case, depending on the interference intensity, can range from fractions of dB to 10 dB or more. Therefore, interference suppression is an important task for such radio systems. The aim of the work is to synthesize and analyze an algorithm for optimal nonlinear filtering of MPSK signals against a background of harmonic interference with a random initial phase.

Methods. The provisions of the theory of optimal nonlinear signal filtering and methods of statistical radio engineering are used.

Results. The synthesis and analysis of the algorithm of optimal nonlinear filtering of MPSK signals against the background of harmonic interference with a random initial phase are carried out. The synthesized receiver contains a discrete symbol evaluation unit, two phase-locked frequency circuits of reference generators that form evaluation copies of the signal and interference, and cross-links between them. Analytical expressions are obtained that allow calculating the dependences of the bit error probability on the signal-to-noise ratio and the interference intensity μ . It is established that uncompensated fluctuations of the initial phase of the useful signal have a greater effect on the receiver noise immunity than similar fluctuations of the phase of harmonic interference, especially with low positional signals.

Conclusions. Comparison of the obtained results with the results obtained in the case when there are no harmonic interference compensation circuits shows that the use of the obtained phase filtering algorithms allows for almost complete suppression of harmonic interference. Thus, if $\mu = 0.5$ and the probability of error is 10^{-2} , the energy gain at $M = 2$ is about 2.5 dB, at $M = 4$ – about 6 dB, at $M = 8$ and $M = 16$ – at least 10 dB.

Keywords: multi-position phase manipulation, harmonic interference, optimal nonlinear filtering, noise immunity, bit error probability

• Submitted: 08.02.2021 • Revised: 17.02.2021 • Accepted: 25.07.2021

For citation: Kulikov G.V., Do Trung Tien, Samokhina E.V. Optimal nonlinear filtering of M-PSK signals against a background of harmonic interference with a random initial phase. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):46–56 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-46-56>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией (М-ФМ) в современных цифровых системах передачи информации обусловлено их высокими энергетическими и спектральными характеристиками. Однако как показывают исследования [1–7], качество связи значительно снижается, если в радиоканале кроме шумовой помехи присутствуют еще и нефлуктуационные помехи разных видов. Особенно это касается случаев, когда такая помеха является узкополосной (гармонической), совпадающей по частоте с частотой полезного сигнала [1, 2]. Энергетический проигрыш в этом случае в зависимости от интенсивности помехи может составлять от долей дБ до 10 дБ и более.

Такое снижение качества приема объясняется тем, что алгоритмы работы демодуляторов оптимизированы для приема сигналов на фоне только белого гауссовского шума и не учитывают характеристики нефлуктуационных помех. Введение в их структуру блоков компенсации таких помех может значительно повысить помехоустойчивость приема сигналов. Целью работы является синтез и анализ алгоритма оптимальной нелинейной фильтрации сигналов М-ФМ на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой.

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Рассмотрим процесс, поступающий на вход приемника на промежутке времени $t \in (0, kT]$:

$$\begin{aligned} x(t) &= s_{\Sigma}(C_k, t, \varphi_c) + s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}) + n(t) = \\ &= s_{\Sigma}(C_k, t, \varphi_c, \varphi_{\Pi}) + n(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Он представляет собой аддитивную смесь сигнала М-ФМ $S_{\Sigma}(C_k, t, \varphi_c)$, который на некотором k -м тактовом интервале имеет вид:

$$\begin{aligned} s_k(C_k = i, t, \varphi_c) &= A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_c), \\ \varphi_i &= i2\pi/M, t \in ((i-1)T, iT], i = 0, 1, \dots, M-1, \end{aligned} \quad (2)$$

гармонической помехи со случайной начальной фазой:

$$s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}) = \mu A_0 \cos(\omega_{\Pi} t + \varphi_{\Pi})$$

и шумовой помехи $n(t)$ с параметрами

$$\langle n(t) \rangle = 0; \langle n(t_1) n(t_2) \rangle = \frac{N_0}{2} \delta(t_2 - t_1).$$

Здесь C_k – вектор дискретных информационных символов.

Будем рассматривать сигнал М-ФМ как дискретно-непрерывный марковский процесс, в котором смена состояний дискретного параметра может производиться в определенные моменты времени, кратные T , а случайные начальные фазы сигнала φ_c и помехи φ_{Π} являются винеровскими процессами [8]:

$$\dot{\varphi}_c(t) = n_{\varphi_c}(t), \quad \dot{\varphi}_{\Pi}(t) = n_{\varphi_{\Pi}}(t).$$

Здесь $n_{\varphi_c}(t)$ и $n_{\varphi_{\Pi}}(t)$ – белые гауссовские шумы с нулевыми средними и односторонними спектральными плотностями N_{φ_c} и $N_{\varphi_{\Pi}}$. Такое представление этих случайных процессов хорошо описывает флуктуационные изменения фаз автогенераторов сигналов [9]. Обычно на практике, особенно в узкополосных каналах связи, непрерывные процессы $\varphi_c(t)$ и $\varphi_{\Pi}(t)$ являются медленно меняющимися по сравнению со скоростью смены информационных и канальных символов, т.е.

$$\tau_{\varphi_c} \gg T, \tau_{\varphi_{\Pi}} \gg T,$$

где τ_{φ_c} , $\tau_{\varphi_{\Pi}}$ – время корреляции этих процессов.

Априорные сведения о каждом из диффузионных марковских процессов $\varphi_c(t)$ и $\varphi_{\Pi}(t)$ задаются уравнением Фоккера – Планка – Колмогорова [8].

Все вышесказанное дает основание использовать при синтезе структурной схемы приемника таких дискретно-непрерывных процессов алгоритм фильтрации, предложенный в [10]. В этом случае смешанная апостериорная плотность вероятности реализации $s_{\Sigma}(C_k, t, \varphi_c, \varphi_{\Pi})$, содержащей вектор C_k , равна:

$$p_{ps}(t, C_k, \varphi_c, \varphi_{\Pi}) = w_{ps}(t, \varphi_c, \varphi_{\Pi}) p_{ps}(t, C_k | \varphi_c, \varphi_{\Pi}),$$

где $w_{ps}(t, \varphi_c, \varphi_\Pi)$ – апостериорная плотность вероятности независимых параметров φ_c и φ_Π , безусловная относительно вектора дискретных символов; $p_{ps}(t, \mathbf{C}_k | \varphi_c, \varphi_\Pi)$ – условная апостериорная вероятность состояния вектора дискретных символов при фиксированных значениях φ_c и φ_Π .

Для условной апостериорной вероятности $p_{ps}(t, \mathbf{C}_k | \varphi_c, \varphi_\Pi)$ справедливо уравнение [10]:

$$\dot{p}_{ps}(t, \mathbf{C}_k | \varphi_c, \varphi_\Pi) = p_{ps}(t, \mathbf{C}_k | \varphi_c, \varphi_\Pi) \times \{F(t, \mathbf{C}_k, \varphi_c, \varphi_\Pi) - \langle F(t, \varphi_c, \varphi_\Pi) \rangle\}, \quad (3)$$

где

$$F(t, \mathbf{C}_k, \varphi_c, \varphi_\Pi) = \sum_{j=1}^k F_j(t, \mathbf{C}_j, \varphi_c, \varphi_\Pi),$$

$$F_j(t, \mathbf{C}_j, \varphi_c, \varphi_\Pi) = -\frac{1}{N_0} \left[x(t) - s_{\text{спж}}(\mathbf{C}_j, t, \varphi_c, \varphi_\Pi) \right]^2, \quad (4)$$

$$\langle F(t, \varphi_c, \varphi_\Pi) \rangle = \sum_{C_1=0}^{M-1} \sum_{C_2=0}^{M-1} \dots \sum_{C_k=0}^{M-1} F(t, \mathbf{C}_k, \varphi_c, \varphi_\Pi) p_{ps}(t, \mathbf{C}_k | \varphi_c, \varphi_\Pi).$$

При условии, что априорные вероятности значений информационных символов (для многопозиционной манипуляции) в радиосвязи можно принять одинаковыми и равными $1/M$, а также положить одинаковыми вероятности перехода дискретного символа из одного состояния в другое, решение уравнения (3) в момент $t = kT$ запишем в следующем виде:

$$p_{ps}(kT, \mathbf{C}_k | \varphi_c, \varphi_\Pi) = \frac{\exp \left[\sum_{j=1}^k \int_{(j-1)T}^{jT} F_j(\tau, \mathbf{C}_j, \varphi_c, \varphi_\Pi) d\tau \right]}{\sum_{\mathbf{C}_k} \exp \left[\sum_{j=1}^k \int_{(j-1)T}^{jT} F_j(\tau, \mathbf{C}_j, \varphi_c, \varphi_\Pi) d\tau \right]}.$$

Здесь для информативности записи в списке аргументов функции $F_j(\cdot)$ отдельно выделен дискретный символ C_j .

Для получения апостериорной вероятности того или иного значения символа C_k следует усреднить последнее выражение по M возможным значениям $C_1, C_2, \dots, C_{k-1}$. В результате получим:

$$p_{ps}(kT, \mathbf{C}_k | \varphi_c, \varphi_\Pi) = \sum_{\mathbf{C}_{k-1}} \left\{ \frac{\exp \left[\sum_{j=1}^k \int_{(j-1)T}^{jT} F_j(\tau, \mathbf{C}_j, \varphi_c, \varphi_\Pi) d\tau \right]}{\sum_{\mathbf{C}_k} \exp \left[\sum_{j=1}^k \int_{(j-1)T}^{jT} F_j(\tau, \mathbf{C}_j, \varphi_c, \varphi_\Pi) d\tau \right]} \right\}.$$

Выражение существенно упростится, если принять дополнительное предположение о хорошем качестве приема. При этом в нем можно заменить символы, по которым уже принято решение до момента времени $t = kT$, их оценочными значениями, т.е. заменить вектор $\mathbf{C}_{k-1}$ на $\mathbf{C}_{k-1}^* = \{C_1^*, C_2^*, \dots, C_{k-1}^*\}$. Объединяя члены, не зависящие от C_k , в коэффициент K и учитывая независимость символов в информационной последовательности соответствующих посылок сигнала М-ФМ, получим следующую формулу:

$$p_{ps}(T, \mathbf{C}_k | \varphi_c, \varphi_\Pi) = \frac{\exp \left[\int_0^T F_k(\tau, \mathbf{C}_k, \varphi_c, \varphi_\Pi) d\tau \right]}{K \sum_{C_k=0}^{M-1} \exp \left[\int_0^T F_k(\tau, \mathbf{C}_k, \varphi_c, \varphi_\Pi) d\tau \right]}.$$

Алгоритм оценки дискретного информационного символа вытекает из условия максимума этой апостериорной вероятности в момент времени $t = T$:

$$(C_k = i) \Rightarrow \max \{p_{ps}(t, \mathbf{C}_k | \varphi_c, \varphi_\Pi)\}. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$J_0 = \int_0^T F_k(\tau, C_k = 0, \varphi_c, \varphi_\Pi) d\tau, \dots$$

$$J_{M-1} = \int_0^T F_k(\tau, C_k = M-1, \varphi_c, \varphi_\Pi) d\tau. \quad (6)$$

Подынтегральные выражения в этих формулах определяются из (4). В результате алгоритм (5) можно переписать в следующем виде:

$$(C_k = i) \Rightarrow \max \{\exp(J_i)\} \quad (7)$$

или

$$(C_k = i) \Rightarrow \max \{J_i\} \quad (8)$$

Преобразуем записи интегралов (6) с учетом (1) и (2). Получим:

$$J_0 = \frac{2}{N_0} \int_0^T [x(t) - s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi})] s_k(t, C_k = 0, \varphi_c) dt, \\ \dots \\ J_{M-1} = \frac{2}{N_0} \int_0^T [x(t) - s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi})] \times \\ \times s_k(t, C_k = M-1, \varphi_c) dt. \quad (9)$$

Алгоритм (8) по структуре подобен алгоритму обработки сигнала М-ФМ для случая, когда прием осуществляется только на фоне белого гауссовского шума [11]. Отличие заключается в наличии процедуры вычитания из принимаемой смеси $x(t)$ копии помехи, формируемой на приемной стороне. Схема содержит набор корреляторов (9), определяющих степень схожести компенсированной смеси с опорными сигналами, соответствующими всем возможным значениям информационного символа C_k .

Опорные сигналы и копия помехи содержат информацию о начальных фазах φ_c и φ_{Π} . Истинные значения этих величин можно заменить их оценочными значениями φ_c^* и φ_{Π}^* . Разработаем алгоритмы формирования этих оценок.

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом гауссовской аппроксимации [8, 12] апостериорной плотности вероятности этих случайных параметров, применение которого справедливо при больших отношениях сигнал/шум и большом времени наблюдения. В данном случае такое допущение справедливо, что позволяет перейти от труднорешаемых дифференциальных уравнений для плотностей вероятностей, вытекающих из уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова [8], к приближенным соотношениям для математических ожиданий φ_{α}^* и апостериорных дисперсий $K_{\alpha\beta}$ аппроксимирующего многомерного (размерности z) гауссовского распределения:

$$\dot{\varphi}_{\alpha}^* = a_{\alpha}(\varphi^*) + \sum_{\beta=1}^z K_{\alpha\beta} \frac{\partial \langle F(t, \varphi^*) \rangle}{\partial \varphi_{\beta}^*}, \\ \dot{K}_{\alpha\beta} = \sum_{\nu=1}^z \left[\frac{\partial a_{\alpha}(\varphi^*)}{\partial \varphi_{\nu}^*} K_{\nu\beta} + \frac{\partial a_{\beta}(\varphi^*)}{\partial \varphi_{\nu}^*} K_{\alpha\nu} \right] + \\ + b_{\alpha\beta}(\varphi^*) + \sum_{\nu=1}^z \sum_{\gamma=1}^z K_{\alpha\nu} \frac{\partial^2 \langle F(t, \varphi^*) \rangle}{\partial \varphi_{\nu}^* \partial \varphi_{\gamma}^*} K_{\gamma\beta}.$$

Для независимых винеровских процессов $\varphi_c(t)$ и $\varphi_{\Pi}(t)$ коэффициенты сноса и диффузии равны [8, 13]:

$$a(\varphi_c) = a(\varphi_{\Pi}) = 0, \quad b(\varphi_c) = \frac{N_{\varphi_c}}{2}; \quad b(\varphi_{\Pi}) = \frac{N_{\varphi_{\Pi}}}{2},$$

а $K_{\varphi_c \varphi_{\Pi}} = K_{\varphi_{\Pi} \varphi_c} = 0$.

Полагая, что подстройка фаз осуществляется за время, меньшее T_s , получим уравнения оптимальной нелинейной фильтрации параметров φ_c^* и φ_{Π}^* :

$$\dot{\varphi}_c^* = K_{\varphi_c \varphi_c} \frac{\partial \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \rangle}{\partial \varphi_c^*}, \\ \dot{\varphi}_{\Pi}^* = K_{\varphi_{\Pi} \varphi_{\Pi}} \frac{\partial \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \rangle}{\partial \varphi_{\Pi}^*}, \quad (10)$$

где значения апостериорных дисперсий $K_{\varphi_c \varphi_c}$ и $K_{\varphi_{\Pi} \varphi_{\Pi}}$ определяются из следующей системы уравнений:

$$\dot{K}_{\varphi_c \varphi_c} = \frac{N_{\varphi_c}}{2} + K_{\varphi_c \varphi_c}^2 \frac{\partial^2 \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \rangle}{\partial \varphi_c^{*2}}, \\ \dot{K}_{\varphi_{\Pi} \varphi_{\Pi}} = \frac{N_{\varphi_{\Pi}}}{2} + K_{\varphi_{\Pi} \varphi_{\Pi}}^2 \frac{\partial^2 \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \rangle}{\partial \varphi_{\Pi}^{*2}}, \quad (11)$$

а

$$\langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \rangle = F_k(t, C_k = 0, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \frac{\exp J_0}{\sum_{i=0}^{M-1} \exp J_i} + \\ + F_k(t, C_k = 1, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \frac{\exp J_1}{\sum_{i=0}^{M-1} \exp J_i} + \\ + F_k(t, C_k = 2, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \frac{\exp J_2}{\sum_{i=0}^{M-1} \exp J_i} + \dots + \\ + F_k(t, C_k = M-1, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \frac{\exp J_{M-1}}{\sum_{i=0}^{M-1} \exp J_i}.$$

С учетом (4):

$$\frac{\partial \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_{\Pi}^*) \rangle}{\partial \varphi_c^*} = \\ = \frac{2A_0}{N_0} [x(t) - s_{\Pi}(t, \varphi_{\Pi}^*)] \times \\ \times \sum_{i=0}^{M-1} s_k^h(t, C_k = i, \varphi_c^*) \frac{\exp J_i}{\sum_{l=0}^{M-1} \exp J_l},$$

$$\frac{\partial \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_n^*) \rangle}{\partial \varphi_n^*} = -\frac{2\mu A_0}{N_0} \sin(\omega_n t + \varphi_n^*) \times \\ \times \left[x(t) - \sum_{i=0}^{M-1} s_k(t, C_k = i, \varphi_c^*) \frac{\exp J_i}{\sum_{l=0}^{M-1} \exp J_l} \right].$$

Здесь

$$s_k^h(t, C_k = i, \varphi_c^*) = \\ = \frac{ds_k(t, C_k = i, \varphi_c^*)}{d\varphi_c^*} = -A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_i + \varphi_c^*).$$

При большом отношении сигнал/шум последние выражения упрощаются. Если еще учесть четность и симметричность сигнального созвездия сигнала М-ФМ, то:

$$\frac{\partial \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_n^*) \rangle}{\partial \varphi_c^*} \approx \\ \approx \frac{2A_0}{N_0} \left[x(t) - s_n(t, \varphi_n^*) \right] \sum_{i=0}^{M/2-1} s_k^h(t, C_k = i, \varphi_c^*) \operatorname{th} J_i,$$

$$\frac{\partial \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_n^*) \rangle}{\partial \varphi_n^*} \approx \\ \approx -\frac{2\mu A_0}{N_0} \sin(\omega_n t + \varphi_n^*) \left[x(t) - \sum_{i=0}^{M/2-1} s_k(t, C_k = i, \varphi_c^*) \operatorname{th} J_i \right].$$

Проведя статистическое усреднение и полагая, что в установившемся режиме при малой ошибке фильтрации:

$$\cos(\varphi_n - \varphi_n^*) \approx 1, \quad \cos(\varphi_c - \varphi_c^*) \approx 1,$$

получим

$$\frac{\partial^2 \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_n^*) \rangle}{\partial \varphi_c^{*2}} \approx -\frac{A_0^2}{2N_0} \left(1 + \operatorname{th} \frac{A_0^2 T}{2N_0} \right), \\ \frac{\partial^2 \langle F_k(t, \varphi_c^*, \varphi_n^*) \rangle}{\partial \varphi_n^{*2}} \approx -\frac{\mu^2 A_0^2}{N_0}.$$

В установившемся режиме фильтрации непрерывных параметров φ_c и φ_n решение уравнений (11) стремится к стационарным значениям $\overline{K_{\varphi_c \varphi_c}}$ и $\overline{K_{\varphi_n \varphi_n}}$, производные от которых равны нулю. Следовательно,

$$\overline{K_{\varphi_c \varphi_c}} = \sqrt{\frac{N_{\varphi_c} N_0}{A_0^2 \left(1 + \operatorname{th} \frac{A_0^2 T}{2N_0} \right)}}, \quad \overline{K_{\varphi_n \varphi_n}} = \sqrt{\frac{N_{\varphi_n} N_0}{2\mu^2 A_0^2}}.$$

В результате алгоритмы (10) фильтрации случайных начальных фаз сигнала и помехи примут вид:

$$\dot{\varphi}_c^* = S_1 K_1 A_0 \left[x(t) - s_n(t, \varphi_n^*) \right] \times \\ \times \sum_{i=0}^{M/2-1} s_k^h(t, C_k = i, \varphi_c^*) \operatorname{th} J_i, \quad (12)$$

$$\dot{\varphi}_n^* = -S_2 K_2 \mu A_0 \sin(\omega_n t + \varphi_n^*) \times \\ \times \left[x(t) - \sum_{i=0}^{M/2-1} s_k(t, C_k = i, \varphi_c^*) \operatorname{th} J_i \right]. \quad (13)$$

где S_1, S_2 – крутизна характеристик управляющих элементов (УЭ) в каждом канале подстройки фазы;

$$K_1 = \frac{2K_{\varphi_c \varphi_c}}{N_0 S_1}, \quad K_2 = \frac{2K_{\varphi_n \varphi_n}}{N_0 S_2}.$$

Структурная схема квазикогерентного приемника, в котором реализуются взаимосвязанные алгоритмы (7)–(9), (12) и (13), приведена на рис. 1. Приемник содержит блок оценки дискретного символа C_k^* , две схемы фазовой автоподстройки частоты опорных генераторов Г1 и Г2 и перекрестные связи между ними.

Генераторы Г1 и Г2 формируют оценочные копии сигнала и помехи, синхронизированные по фазе с соответствующими колебаниями, содержащимися в принимаемой смеси $x(t)$. На входе приемника установлены два вычитателя. Вычитатель В1 осуществляет компенсацию гармонической помехи в принимаемой смеси, после него сигнал подается на демодулятор для принятия решения о принимаемом символе. С помощью вычитателя В2 осуществляется компенсация сигнала в принимаемой смеси, и полученное колебание в идеальном случае содержит только гармоническую помеху и шум. Оно используется схемой ФАПЧ канала помехи.

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИНТЕЗИРОВАННОГО ПРИЕМНИКА

Перейдем к анализу помехоустойчивости синтезированного квазикогерентного приемника сигналов М-ФМ. Для этого применим методику, использованную в [2]. Вероятности символьной и битовой ошибки можно определить следующим образом:

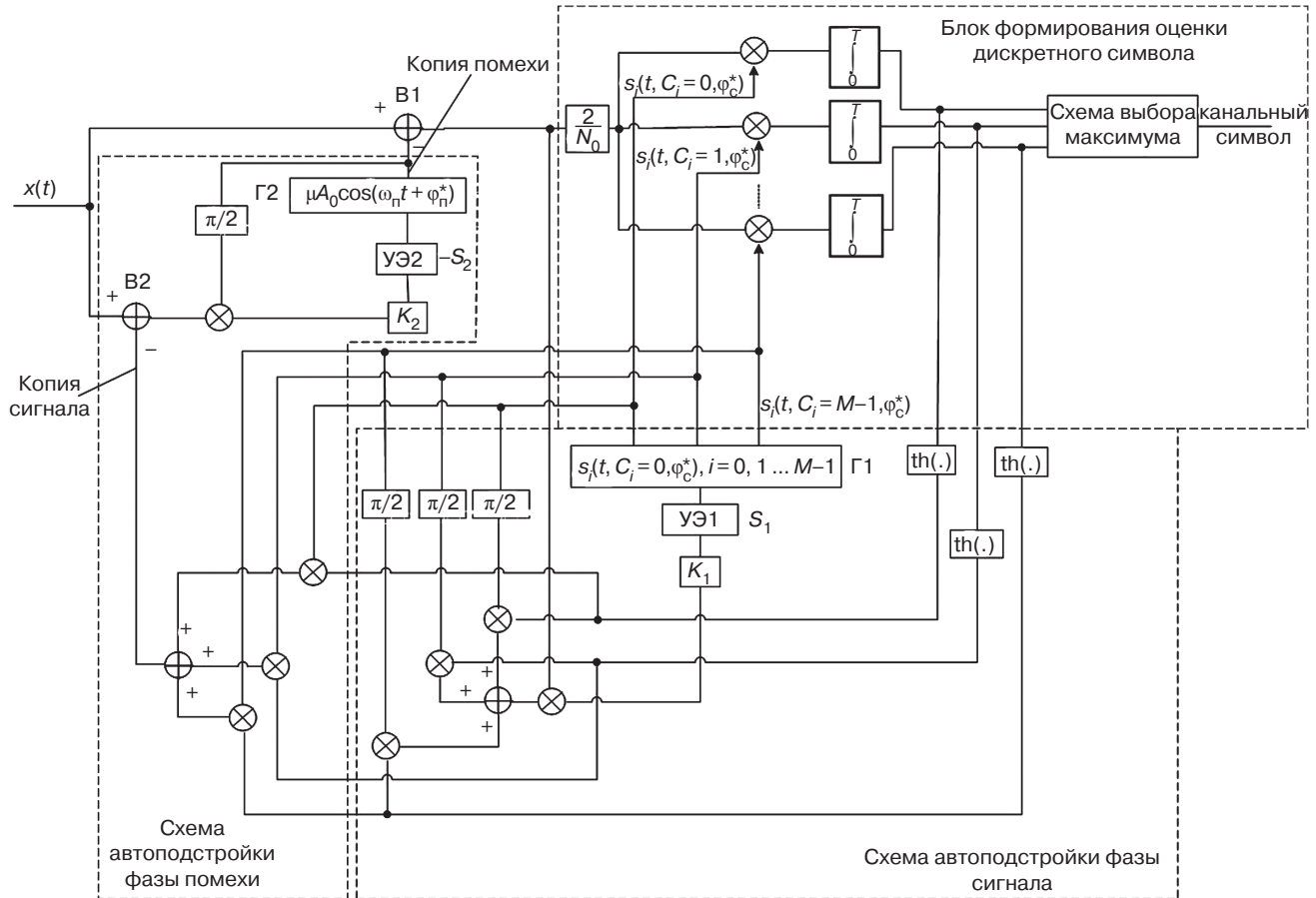


Рис. 1. Структурная схема квазикогерентного приемника сигнала М-ФМ на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой

$$P_{es} = 1 - \prod_{i=1}^{M-1} p(u_i = J_0 - J_i > 0) \Big|_0,$$

$$P_{eb} = P_{es} / \log_2 M,$$

$$\text{где } p(u_i = J_0 - J_i > 0) \Big|_0 = 1 - \Phi \left(\frac{m_{ui}}{\sqrt{D_{ui}}} \right),$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt.$$

Используя (1), (2), (9), получим

$$\begin{aligned} m_{ui} &= \langle J_0 - J_i \rangle = \frac{2E_s}{N_0} \times \\ &\times [\cos(\varphi_c - \varphi_c^*) (1 - \cos(i2\pi/M)) - \\ &- \sin(\varphi_c - \varphi_c^*) \sin(i2\pi/M)] + \\ &+ \mu \frac{2E_s}{N_0} \frac{\sin x}{x} [(\cos \eta_\Pi - \cos \eta_\Pi^*) (1 - \cos(i2\pi/M)) - \\ &- (\sin \eta_\Pi - \sin \eta_\Pi^*) \sin(i2\pi/M)], \\ D_{ui} &= \frac{4E_s}{N_0} (1 - \cos(i2\pi/M)), \end{aligned}$$

где $x = \Delta\omega_\Pi T/2$; $\Delta\omega_\Pi = \omega_\Pi - \omega_0$; $\eta_\Pi = \Delta\omega_\Pi T/2 + \varphi_\Pi - \varphi_c^*$; $\eta_\Pi^* = \Delta\omega_\Pi T/2 + \varphi_\Pi^* - \varphi_c^*$.

Параметры m_{ui} и D_{ui} являются условными по значениям φ_c , φ_c^* , φ_Π и φ_Π^* . Для получения безусловных вероятностей ошибки нужно провести соответствующее усреднение в предположении о гауссовском характере апостериорных плотностей вероятностей случайных фаз φ_c , φ_Π :

$$w(\varphi_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi K_{\varphi_c \varphi_c}}} \exp \left[-\frac{(\varphi_c - \varphi_c^*)^2}{2 K_{\varphi_c \varphi_c}} \right],$$

$$w(\varphi_\Pi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi K_{\varphi_\Pi \varphi_\Pi}}} \exp \left[-\frac{(\varphi_\Pi - \varphi_\Pi^*)^2}{2 K_{\varphi_\Pi \varphi_\Pi}} \right]$$

и о равномерном распределении величин φ_c^* , φ_Π^* на интервале $(0, 2\pi]$. Кроме того, в этом случае можно использовать приближенную формулу [8]:

$$\begin{aligned} &\ll p(u_i > 0) \Big|_0 \gg_{\varphi_c \varphi_\Pi} = \\ &= 1 - \Phi \left(\ll \frac{m_{ui}}{\sqrt{D_{ui}}} \gg_{\varphi_c \varphi_\Pi} \right) = 1 - \Phi \left(\frac{\ll m_{ui} \gg_{\varphi_c \varphi_\Pi}}{\sqrt{D_{ui}}} \right). \end{aligned}$$

Усреднение по параметрам φ_c, φ_n дает [14, 15]:

$$\begin{aligned} \langle\langle m_{ui} \rangle\rangle_{\varphi_c \varphi_n} = & \\ = \frac{2E_s}{N_0} & \left[(1 - \cos(i2\pi / M)) \exp\left(-\overline{K_{\varphi_c \varphi_n}} / 2\right) + \right. \\ + \mu \frac{\sin x}{x} & \left(\exp\left(-\overline{K_{\varphi_n \varphi_n}} / 2\right) - 1 \right) \left((1 - \cos(i2\pi / M)) \cos \eta_n^* - \right. \\ & \left. \left. - \sin(i2\pi / M) \sin \eta_n^* \right) \right]. \end{aligned}$$

Усреднить выражение по параметру η_n^* аналитически не удастся, поэтому это усреднение было проведено численным методом.

На рис. 2 показаны зависимости вероятности битовой ошибки P_{eb} от отношения сигнал/шум E_b/N_0 для квазикогерентного приемника сигналов М-ФМ разной позиционности на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой, $\Delta\omega_n = 0$ и относительной интенсивностью $\mu = 0.5$. Здесь параметрами являются априорные дисперсии набегов фаз φ_c и φ_n за время одного тактового интервала сигнала T :

$$\sigma_{\varphi_c}^2 = \frac{N_{\varphi_c} T}{2}, \quad \sigma_{\varphi_n}^2 = \frac{N_{\varphi_n} T}{2}.$$

Для сравнения на рисунке приведены кривые 1, построенные при $\mu = 0$. Далее следуют: 2 – $\sigma_{\varphi_n}^2 = 0.25$, $\sigma_{\varphi_c}^2 = 0$; 3 – $\sigma_{\varphi_n}^2 = 0$, $\sigma_{\varphi_c}^2 = 0.25$; 4 – $\sigma_{\varphi_n}^2 = 0.25$, $\sigma_{\varphi_c}^2 = 0.25$.

Анализ графиков показывает работоспособность полученных алгоритмов. При этом видно, что некомпенсированные флуктуации начальной фазы полезного сигнала оказывают большее влияние на помехоустойчивость приемника, чем аналогичные флуктуации фазы гармонической помехи. Особенно отчетливо это проявляется при малых M . Этот факт объясняется тем, что именно в фазовой структуре сигнала М-ФМ содержится информация о дискретном символе.

Влияние интенсивности помехи μ на вероятность битовой ошибки иллюстрируется кривыми на рис. 3.

Одна из них построена без цепей компенсации помехи, две другие – при совместном использовании алгоритмов (12) и (13). Видно, что в первом случае с ростом μ вероятность ошибки значительно увеличивается (от одного до нескольких порядков), а во втором случае наблюдается практически полное подавление гармонической помехи при любых значениях μ .

Сравнение полученных результатов с результатами, полученными в [2] для случая, когда цепи компенсации гармонической помехи отсутствуют, показывает, что использование полученных выше алгоритмов фильтрации фаз значительно улучшает помехоустойчивость приемника. Так, например, при $\mu = 0.5$ для вероятности ошибки $P_e = 10^{-2}$ энергетический выигрыш при $M = 2$ составляет около 2.5 дБ, при $M = 4$ – около 6 дБ, при $M = 8$ и $M = 16$ – не менее 10 дБ.

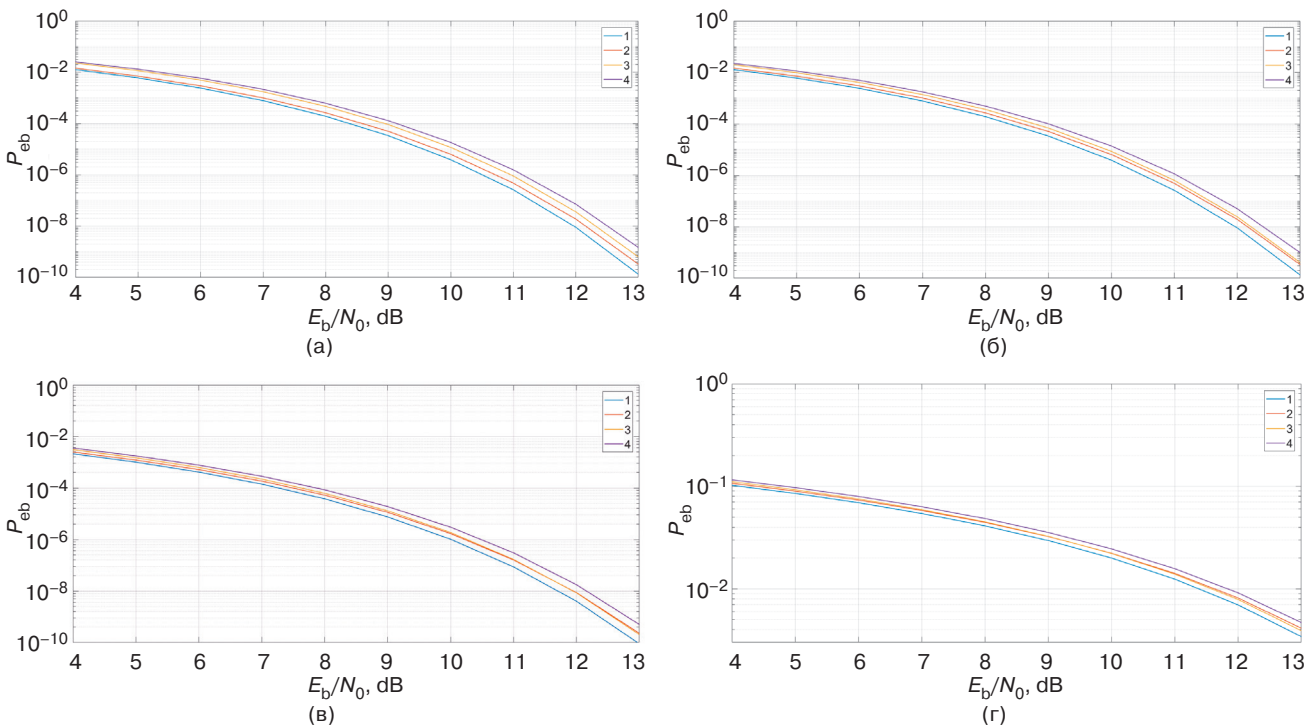


Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум при приеме сигналов М-ФМ на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой:
(а) – $M = 2$; (б) – $M = 4$; (в) – $M = 8$; (г) – $M = 16$

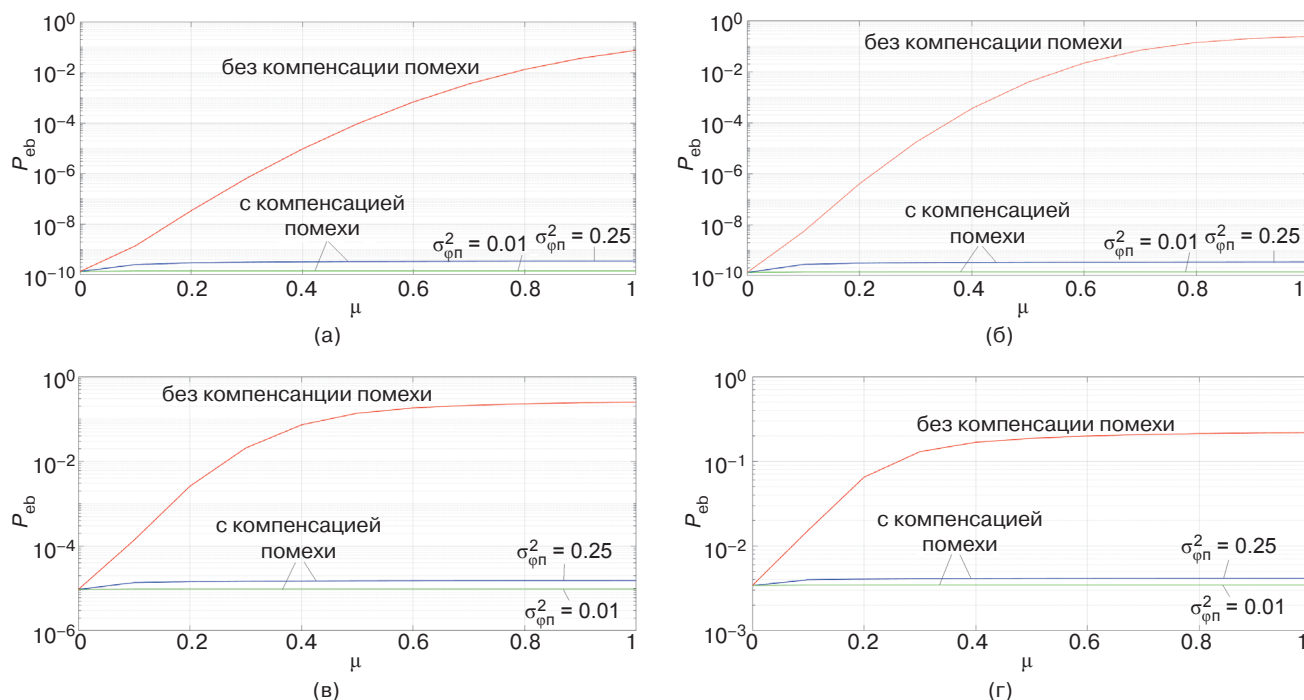


Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки от относительной интенсивности помехи ($E_b/N_0 = 13$ дБ):
(а) – $M = 2$; (б) – $M = 4$; (в) – $M = 8$; (г) – $M = 16$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированный алгоритм оптимальной нелинейной фильтрации сигналов М-ФМ на фоне гармонической помехи со случайной начальной фазой позволяет значительно повысить помехоустойчивость приема дискретной информации в сложных помеховых условиях и обеспечить значительный энергетический выигрыш радиосистемы. Вместе с тем, необходимо отметить значительную структурную сложность такого приемника. Кроме

того, на приемной стороне должны быть априорно известны частота и уровень помехи, что на практике трудно обеспечить. В связи с этим, полученные характеристики следует оценивать как потенциально достижимые, на которые нужно ориентироваться при разработке устройств компенсации помех.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин А.И., Ялин А.К. Помехоустойчивость приема цифровых фазоманипулированных сигналов на фоне синусоидальной помехи и гауссовского шума. *Телекоммуникации*. 2013;10:19–26.
2. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многофазной фазовой манипуляцией при наличии гармонических помех. *Наукоемкие технологии*. 2018;11:32–38.
3. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, До Чунг Тиен. Влияние фазоманипулированной помехи на помехоустойчивость корреляционного демодулятора сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией. *Российский технологический журнал*. 2019;7(2):18–28. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-18-28>
4. Нгуен Ван Зунг. Помехоустойчивость когерентного приема сигналов с многофазной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированных помех. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>

REFERENCES

1. Fomin A.I., Yalin A.K. Noise immunity of receiving digital phase-shift keyed signals against the background of sinusoidal interference and Gaussian noise. *Telekommunikatsii = Telecommunications*. 2013;10:19–26 (in Russ.).
2. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Nesterov A.V., Lelyuh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2018;11:32–38 (in Russ.).
3. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Do Trung Tien. Effect of phase-shift interference on the noise immunity of correlation demodulator of signals with multiple phase shift keying. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(2):18–28 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-18-28>
4. Nguyen Van Dung. Noise immunity of a coherent reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of a retranslated interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2019;3 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>

5. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Kulagin V.P. Simulation of a coherent demodulator of M-ary phase shift keying signals in the presence of non-fluctuation interferences. In: *2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*. 2019, p. 149–152. <https://doi.org/10.1109/RCAR47638.2019.9044009>
6. Петров А.В. Помехоустойчивость приема сигналов с двоичной фазовой манипуляцией при воздействии хаотической импульсной помехи со случайной длительностью и фазой радиоимпульса. *Радиотехника*. 2018;8:28–33.
7. Звонарев В.В., Карабельников И.А., Попов А.С. Вероятность ошибки приема BPSK-сигнала в присутствии подобной помехи. *Вопросы радиоэлектроники*. 2019;3:55–59. <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2019-3-55-59>
8. Тихонов В.И., Кульман Н.К. *Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов*. М.: Сов. Радио; 1975. 704 с.
9. Тихонов В.И. *Статистическая радиотехника*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь; 1982. 624 с.
10. Тихонов В.И., Харисов В.И., Смирнов В.А. Оптимальная фильтрация дискретно-непрерывных процессов. *Радиотехника и электроника*. 1978;23(7):1441–1452.
11. Прокис Дж. *Цифровая связь*: пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь; 2000. 800 с. ISBN 5-256-01434-X
12. Ярлыков М.С., Миронов М.А. О применимости гауссовой аппроксимации в марковской теории оптимальной нелинейной фильтрации. *Радиотехника и электроника*. 1972;17(11):2285–2294.
13. Ярлыков М.С. *Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике*. М.: Сов. Радио; 1980. 258 с.
14. Градштейн И.С., Рыжик И.М. *Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений*. М.: Наука; 1971. 1108 с.
15. Бейтмен Г., Эрдейи А. *Таблицы интегральных преобразований*: в 2 т.; пер с англ. М.: Наука; 1968. Т. 1. 344 с.
5. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Kulagin V.P. Simulation of a coherent demodulator of M-ary phase shift keying signals in the presence of non-fluctuation interferences. In: *2019 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*. 2019, p. 149–152. <https://doi.org/10.1109/RCAR47638.2019.9044009>
6. Petrov A.V. Anti-jam robustness of binary phase shift keyed signals receiving under the impact of chaotic impulsive jamming with random duration and phase of radio-impulse. *Radiotekhnika = J. Radioengineering*. 2018;8:28–33 (in Russ.).
7. Zvonarev V.V., Karabelnikov I.A., Popov A.S. Probability of BPSK signal reception error in presence of similar hindrance. *Voprosy radioelektroniki = Issues of Radio electronics*. 2019;3:55–59 (in Russ.). <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2019-3-55-59>
8. Tikhonov V.I., Kul'man N.K. *Nelineinaya fil'tratsiya i kvazikogerentnyi priem signalov (Nonlinear filtering and quasi-coherent signal reception)*. Moscow: Sovetskoe Radio; 1975. 704 p. (in Russ.).
9. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika (Statistical radio engineering)*: 2nd ed. Moscow: Radio i svyaz'; 1982. 624 p. (in Russ.).
10. Tikhonov V.I., Kharisov V.I., Smirnov V.A. Optimal filtration of discrete-continuous processes. *Radiotekhnika i elektronika = Radio Engineering and Electronics*. 1978;23(7):1441–1452 (in Russ.).
11. Proakis J.G. *Digital communications*. 3th ed. McGraw-Hill Book Co.; 1995. 956 p. [Prokis J. *Tsifrovaya svyaz' (Digital communication)*. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 800 p. (in Russ.). ISBN 5-256-01434-X]
12. Yarlykov M.S., Mironov M.A. On the applicability of the Gaussian approximation in the Markov theory of optimal nonlinear filtering. *Radiotekhnika i elektronika = Radio Engineering and Electronics*. 1972;17(11):2285–2294 (in Russ.).
13. Yarlykov M.S. *Primenenie markovskoi teorii nelineinoy fil'tratsii v radiotekhnike (Application of the Markov theory of nonlinear filtering in radio engineering)*. Moscow: Sovetskoe Radio; 1980. 258 p. (in Russ.).
14. Gradshtein I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedenii (Tables of integrals, sums, series and products)*. Moscow: Nauka; 1971. 1108 p. (in Russ.).
15. Bateman H., Erdelyi A. *Tables of integral transforms*. V. 1. New York: McGraw-Hill Book Co.; 1954. 344 p. [Beitmen G., Erdeii A. *Tablitsy integral'nykh preobrazovaniy (Tables of integral transforms)*: in 2 v. Moscow: Nauka; 1968. V. 1. 344 p. (in Russ.).]

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

До Чунг Тиен, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: dotrungtien1993@gmail.com.

Самохина Елена Викторовна, к.т.н., доцент, кафедра телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: samohina@mirea.ru.

About the authors

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio electronic systems and complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Do Trung Tien, Postgraduate Student, Department of Radio electronic systems and complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: dotrungtien1993@gmail.com.

Elena V. Samokhina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Telecommunications, Institute of Radio Engineering and Telecommunications Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: samokhina@mirea.ru.



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метод повышения информативности рентгеновских снимков

Н.Е. Староверов ^{1, @},
А.Ю. Грязнов ¹,
И.Г. Камышанская ^{2, 3},
Н.Н. Потрахов ¹,
Е.Д. Холопова ¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 197376 Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

³ СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница», Санкт-Петербург, 191014 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: nik0205st@mail.ru

Резюме. Описан основанный на высокочастотной фильтрации и морфологической обработке изображения метод обработки микрофокусных рентгеновских снимков, повышающий контраст деталей рентгенограммы. Одной из наиболее информативных методик рентгенографии является микрофокусная рентгенография. В ряде случаев микрофокусные рентгеновские изображения не могут быть достоверно проанализированы из-за особенностей способа съемки. Так, основными недостатками микрофокусных рентгеновских изображений чаще всего являются неравномерный фон, искаженные яркостные характеристики и наличие шумов. Предлагаемый метод повышения контраста мелких деталей изображения основан на идее сочетания высокочастотной фильтрации и морфологической обработки изображений. Метод состоит из следующих шагов: подавление шумов на изображении, высокочастотная фильтрация, морфологическая обработка изображения, получение результирующего изображения. В результате применения метода усиливается яркость контуров на изображении. На полученном изображении все объекты будут иметь двойные контуры. Метод был апробирован при обработке 50 рентгенограмм органов грудной клетки пациентов с разнообразной патологией. Рентгенограммы были выполнены в городской Мариинской больнице Санкт-Петербурга на цифровых стационарных и передвижных рентгеновских аппаратах. На большей части рентгенограмм удалось улучшить контраст снимков, выделить границы объектов. Также метод был применен в микрофокусной рентгеновской томографии для улучшения информативности проекционных данных и улучшения восстановления 3D-образа объекта исследования. Как для первого, так и для второго случаев метод показал удовлетворительные результаты. Разработанный метод позволяет существенно повысить информативность микрофокусных рентгеновских снимков. Полученные практические результаты позволяют рассчитывать на широкие перспективы применения метода, особенно в микрофокусной рентгенографии.

Ключевые слова: микрофокусная рентгенография, цифровая обработка изображений, фильтрация изображений

• Поступила: 18.03.2021 • Доработана: 19.08.2021 • Принята к опубликованию: 20.08.2021

Для цитирования: Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Камышанская И.Г., Потрахов Н.Н., Холопова Е.Д. Метод повышения информативности рентгеновских снимков. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):57–63. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-57-63>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

The method of increasing the information content of microfocus X-ray images

Nikolay E. Staroverov ^{1, @},
Artem Y. Gryaznov ¹,
Irina G. Kamyshanskaya ^{2, 3},
Nikolay N. Potrakhov ¹,
Ekaterina D. Kholopova ¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, 197376 Russia

² St. Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia

³ City Mariinsky Hospital, Saint Petersburg, 191014 Russia

@ Corresponding author, e-mail: nik0205st@mail.ru

Abstract. A method for processing microfocus X-ray images is described. It is based on high-frequency filtration and morphological image processing, which increases the contrast of the X-ray details. One of the most informative X-ray techniques is microfocus X-ray. In some cases, microfocus X-ray images cannot be reliably analyzed due to the peculiarities of the shooting method. So, the main disadvantages of microfocus X-ray images are most often an uneven background, distorted brightness characteristics and the presence of noise. The proposed method for enhancing the contrast of fine image details is based on the idea of combining high-frequency filtering and morphological image processing. The method consists of the following steps: noise suppression in the image, high-frequency filtering, morphological image processing, obtaining the resulting image. As a result of applying the method, the brightness of the contours in the image is enhanced. In the resulting image, all objects will have double outlines. The method was tested in the processing of 50 chest radiographs of patients with various pathologies. Radiographs were performed at the Mariinsky Hospital of St. Petersburg using digital stationary and mobile X-ray machines. In most of the radiographs, it was possible to improve the images contrast, to highlight the objects boundaries. Besides, the method was applied in microfocus X-ray tomography to improve the information content of projection data and improve the reconstruction of the 3D image of the research object. In both the first and second cases, the method showed satisfactory results. The developed method makes it possible to significantly increase the information content of microfocus X-ray images. The obtained practical results make it possible to count on broad prospects for the method application, especially in microfocus X-ray.

Keywords: microfocus X-ray, digital image processing, image filtering

• Submitted: 18.03.2021 • Revised: 19.08.2021 • Accepted: 20.08.2021

For citation: Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kamyshanskaya I.G., Potrakhov N.N., Kholopova E.D. The method of increasing the information content of microfocus X-ray images. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):57–63 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-57-63>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, рентгенография – метод изучения структуры объекта исследования с помощью рентгеновского излучения. Одной из наиболее информативных методик ее применения является микрофокусная рентгенография, которая проводится с использованием источников излучения, имеющих размер фокусных пятен менее 100 мкм.

Применение этих источников дает возможность получать изображения с прямым геометрическим (проекционным) увеличением изображения в 5–20 раз. Сегодня микрофокусная рентгенография широко используется в медицине, при оценке качества сельскохозяйственных культур, а также в неразрушающем промышленном контроле [1–6].

Однако в ряде случаев микрофокусные рентгеновские изображения не могут быть достоверно проанализированы из-за неудовлетворительного качества изображения. Так, основными недостатками микрофокусных рентгеновских изображений чаще всего являются неравномерный фон, искаженные яркостные характеристики и наличие шумов. Широко распространенные алгоритмы повышения контраста [4–10] в ряде случаев не позволяют увеличить контраст рентгеновских изображений, сохраняя при этом уровень шума на приемлемом уровне.

Разработанный метод решает эту проблему, повышая контраст деталей структуры объекта без значимого увеличения шума на изображении.

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТА МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Предлагаемый метод повышения контраста мелких деталей изображения основан на идее сочетания высокочастотной фильтрации и морфологической обработки изображений. Метод состоит из следующих шагов: подавление шумов на изображении, высокочастотная фильтрация, морфологическая обработка изображения, получение результирующего изображения.

Для шумоподавления использовался адаптивный медианный фильтр [4, 11].

Высокочастотная фильтрация осуществлялась изменением Фурье-образа изображения при помощи его умножения на образ фильтра Гаусса высоких частот.

Фильтр Гаусса в частотной области задавался согласно выражению:

$$H(u, v) = 1 - e^{-D^2(u, v) / 2D_0^2},$$

где D_0 – заданная константа, принимающая значения больше нуля, а $D(u, v)$ – расстояние в частотной области от точки (u, v) до начала координат.

Таким образом, после этого фильтра на изображении были значительно ослаблены составляющие низких частот, в то время как составляющие высоких частот остались без изменений. Иными словами, яркость участков с медленным изменением этого параметра была значительно снижена, а участки, где происходят резкие перепады яркости (границы объектов), остались без изменений.

Следующим шагом являлась морфологическая обработка изображения [12]. Для морфологического наращивания (дилатации) применяется структурный элемент квадратной формы размером 9 пикселей. После выполнения данной операции толщина всех объектов на изображении увеличивается на 2 пикселя.

Наращивание изображения A структурным элементом B обозначается $A \oplus B$ и задается выражением:

$$A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b.$$

Структурный элемент B применяется ко всем пикселям изображения. Каждый раз, когда начало координат структурного элемента совмещается с единичным пикселем, ко всему структурному элементу применяется перенос и последующее логическое сложение с соответствующими пикселями изображения.

На следующем этапе изображение после высокочастотного фильтра умножается на константу (в зависимости от яркости и контраста изображения значение константы изменяется от 1.2 до 1.8), после чего производится вычитание из него изображения, полученного морфологическим наращиванием и также умноженного на константу [13]. Получаемое изображение описывается выражением:

$$I_{res} = I + I_s \times C_1 - I_m \times C_2,$$

где I – исходное изображение; I_s – изображение, полученное после высокочастотной фильтрации; C_1, C_2 – положительные константы; I_m – изображение, полученное морфологическим наращиванием.

В результате усиливается яркость контуров на изображении. На полученном изображении все объекты будут иметь двойные контуры: в случае негативного изображения (на котором более плотные структуры имеют большую яркость) появятся внутренний контур, пиксели которого имеют большую яркость, чем объект, и внешний контур, пиксели которого имеют меньшую яркость, чем объект [14, 15]. Для позитивного изображения алгоритм реализуется схожим образом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пример работы алгоритма иллюстрируется на рис. 1, где показаны рентгеновские снимки грудной клетки до и после применения методики. На снимке значительно возросли как резкость, так и контраст небольших деталей изображения. При этом не фиксируется повышение шума на изображении, проще становится визуальный анализ. Применение

предложенного метода позволяет более точно обнаружить поражения легкого.

Метод был апробирован в обработке 50 рентгенограмм органов грудной клетки (ОГК) пациентов с разнообразной патологией. Рентгенограммы были выполнены в городской Мариинской больнице Санкт-Петербурга на цифровых стационарных и передвижных рентгеновских аппаратах. На серии рентгенограмм с синдромом обширного неоднородного

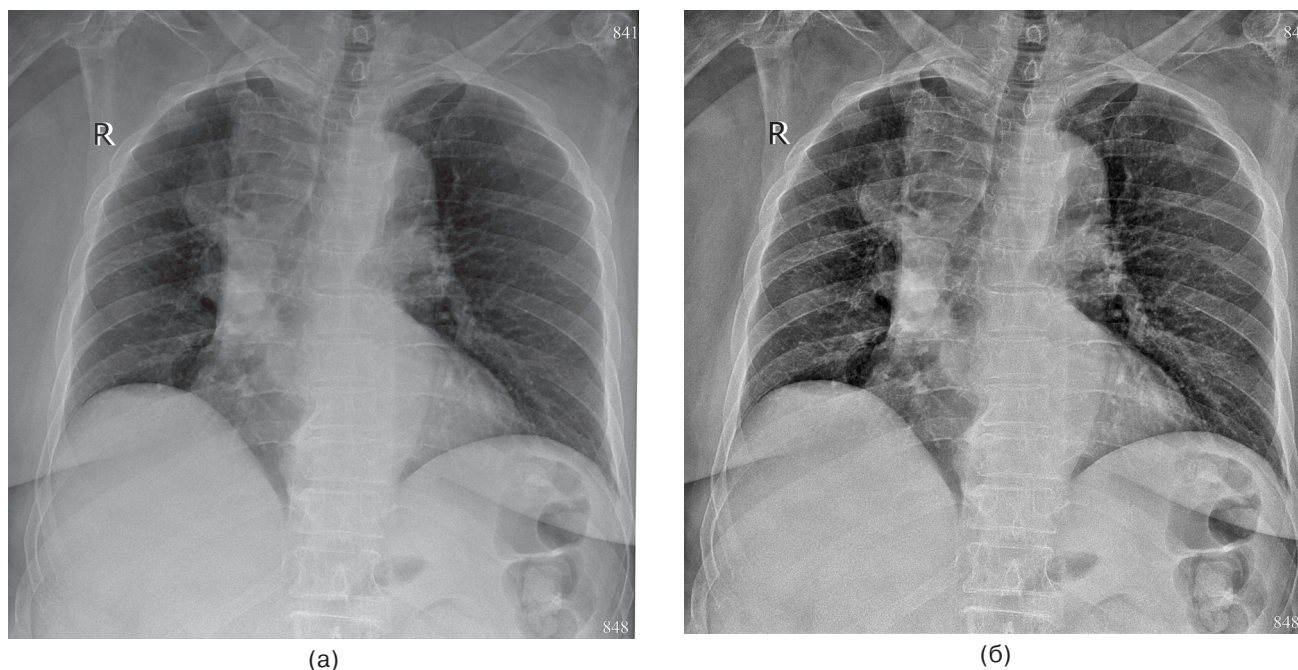


Рис. 1. Рентгеновские снимки грудной клетки:
(а) – до обработки; (б) – после обработки

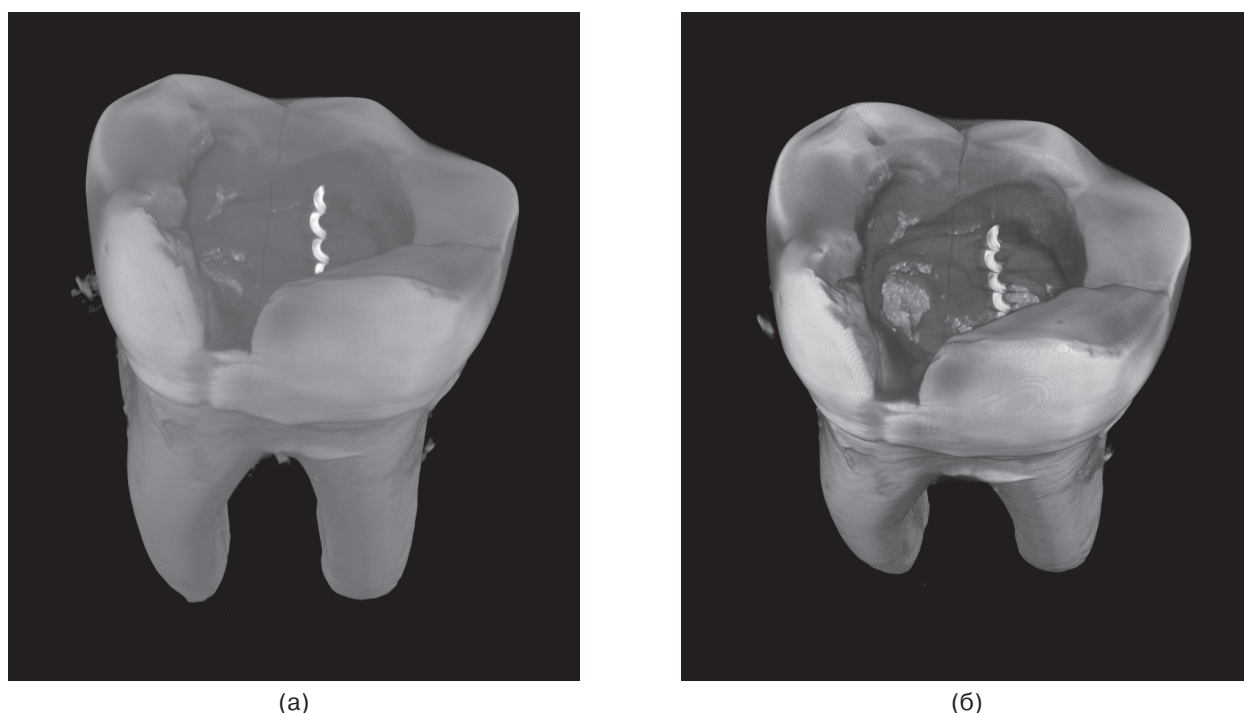


Рис. 2. Восстановленные результаты томографического исследования зуба:
(а) – до обработки; (б) – после обработки

затенения обоих легких цифровая обработка данным методом позволила локализовать и выделить: ограниченные участки повышенной прозрачности; неравномерность утолщения деформированного легочного рисунка за счет интерстициального компонента; неоднородность инфильтрации легочной ткани; границы плеврального выпота. На серии рентгенограмм с синдромом очагового поражения легких метод позволил четко визуализировать границы малоинтенсивных очагов, выявив в них едва заметные участки деструкции. На рентгенограммах ОГК пациентов с ковид-пневмонией постобработка улучшила контраст и границы полисегментарных, разнокалиберных очагов и зон инфильтрации. На рентгенограммах пациентов с травматическим повреждением ОГК метод позволит обозначить едва уловимые признаки перелома ребер, пневмомедиастина и плащевидного пневмоторакса.

Также метод был применен в микрофокусной рентгеновской томографии для улучшения информативности проекционных данных и улучшения восстановления 3D-образа объекта исследования. Как для первого, так и для второго случая метод показал удовлетворительные результаты. Для анализа

томографических данных были использованы срезы, полученные на микрофокусном рентгеновском томографе МРКТ-04 при исследовании препаратов человеческих зубов. Результаты восстановления без использования разработанного метода показаны на рис. 2а, с использованием разработанного метода – на рис. 2б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено алгоритмическое обеспечение метода повышения информативности рентгеновских изображений, в первую очередь – контраста. В целом ряде областей применения рентгенографии метод позволяет существенно повысить обнаружение на изображении объекта исследования малоконтрастных и малоразмерных деталей его структуры.

Полученные практические результаты позволяют рассчитывать на широкие перспективы применения метода, особенно в микрофокусной рентгенографии.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., *et al.* X-ray computer methods for studying the structural integrity of seeds and their importance in modern seed science. *Tech. Phys.* 2019;64(4):582–592. <https://doi.org/10.1134/S1063784219040030>
2. Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Бессонов В.Б., Ободовский А.В., Староверов Н.Е., Холопова Е.Д. Микрофокусная рентгенография в медицине: физико-технические особенности и современные средства рентгенодиагностики. *Биотехносфера*. 2015;5(41):55–63.
3. Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kholopova E.D. Digital x-ray image processing with using adaptive histogram equalization and adaptive background correction. *Biomedicine Radioengineering = Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2018;5:56–58.
4. Staroverov N.E., Kholopova E.D., Gryaznov A.Yu., Zhamova K.K. The methods of processing of microfocus X-ray images. In: *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2017, p. 745–747. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2017.7910665>
5. Мазуров А.И., Потрахов Н.Н. Возможности и ограничения микрофокусной рентгенографии в медицине. *Биотехносфера*. 2010;4(10):20–23.
6. Грязнов А.Ю., Потрахов Е.Н., Потрахов Н.Н. Портативная установка для рентгеновского экспресс-контроля качества пищевой продукции. *Биотехносфера*. 2009;6(6):26–28.
7. Stark J.A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization. *IEEE Trans. Image Process.* 2000;9(5):889–896. <https://doi.org/10.1109/83.841534>

REFERENCES

1. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., *et al.* X-ray computer methods for studying the structural integrity of seeds and their importance in modern seed science. *Tech. Phys.* 2019;64(4):582–592. <https://doi.org/10.1134/S1063784219040030>
2. Potrakhov N.N., Gryaznov A.Yu., Zhamova K.K., Bessonov V.B., Obodovskii A.V., Staroverov N.E., Kholopova E.D. Microfocus X-ray diagnostics in medicine: physical and technical features and modern device. *Biotechnosfera*. 2015;5(41):55–63 (in Russ.).
3. Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kholopova E.D. Digital x-ray image processing with using adaptive histogram equalization and adaptive background correction. *Biomedicine Radioengineering = Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2018;5:56–58.
4. Staroverov N.E., Kholopova E.D., Gryaznov A.Yu., Zhamova K.K. The methods of processing of microfocus X-ray images. In: *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2017, p. 745–747. <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2017.7910665>
5. Mazurov A.I., Potrakhov N.N. Possibilities and limitations of microfocus radiography in medicine. *Biotechnosfera*. 2010;4(10):20–23 (in Russ.).
6. Gryaznov A.Yu., Potrakhov E.N., Potrakhov N.N. Portable unit for X-ray express quality food products. *Biotechnosfera*. 2009;6(6):26–28 (in Russ.).
7. Stark J.A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization. *IEEE Trans. Image Process.* 2000;9(5):889–896. <https://doi.org/10.1109/83.841534>

8. Mukhopadhyay S., Chanda B. A multiscale morphological approach to local contrast enhancement. *Signal Process.* 2000;80(4):685–696. [https://doi.org/10.1016/S0165-1684\(99\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0165-1684(99)00161-9)
9. Parihar A.S., Verma O.P., Khanna C. Fuzzy-contextual contrast enhancement. *IEEE Trans. Image Process.* 2017;26(4):1810–1819. <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2665975>
10. Pogany A., Gao D., Wilkins S.W. Contrast and resolution in imaging with a microfocus x-ray source. *Rev. Sci. Instrum.* 1997;68(7):2774–2782. <https://doi.org/10.1063/1.1148194>
11. Pizer S.M., Amburn E.P., Austin J.D., et al. Adaptive histogram equalization and its variations. *Comput. Vis. Graph. Image Process.* 1987;39(3):355–368. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(87\)80186-X](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(87)80186-X)
12. Vincent L. Morphological grayscale reconstructions in image analysis: Applications and efficient algorithms. *IEEE Trans. Image Process.* 1993;2(2):176–201. <https://doi.org/10.1109/83.217222>
13. Грязнов А.Ю., Гук К.К., Староверов Н.Е., Холопова Е.Д. Метод повышения резкости и контрастности деталей рентгеновских изображений. *Физические основы приборостроения.* 2019;8(4(34)):34–37. <https://doi.org/10.25210/jfop-1904-034037>
14. Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Потрахов Н.Н., Холопова Е.Д., Гук К.К. Новые методы цифровой обработки микрофокусных рентгеновских изображений. *Медицинская техника.* 2018;52(6):53–55.
15. Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kholopova E.D., Guk K.K. Microelectronic devices digital X-ray image processing method development. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018;967(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/967/1/012016>
8. Mukhopadhyay S., Chanda B. A multiscale morphological approach to local contrast enhancement. *Signal Process.* 2000;80(4):685–696. [https://doi.org/10.1016/S0165-1684\(99\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0165-1684(99)00161-9)
9. Parihar A.S., Verma O.P., Khanna C. Fuzzy-contextual contrast enhancement. *IEEE Trans. Image Process.* 2017;26(4):1810–1819. <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2665975>
10. Pogany A., Gao D., Wilkins S.W. Contrast and resolution in imaging with a microfocus x-ray source. *Rev. Sci. Instrum.* 1997;68(7):2774–2782. <https://doi.org/10.1063/1.1148194>
11. Pizer S.M., Amburn E.P., Austin J.D., et al. Adaptive histogram equalization and its variations. *Comput. Vis. Graph. Image Process.* 1987;39(3):355–368. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(87\)80186-X](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(87)80186-X)
12. Vincent L. Morphological grayscale reconstructions in image analysis: Applications and efficient algorithms. *IEEE Trans. Image Process.* 1993;2(2):176–201. <https://doi.org/10.1109/83.217222>
13. Gryaznov A.Yu., Guk K.K., Staroverov N.E., Kholopova E.D. Method for sharpening and contrasting details of X-ray images. *Fizicheskie osnovy priborostroeniya = Physical Bases of Instrumentation.* 2019;8(4(34)):34–37 (in Russ.). <https://doi.org/10.25210/jfop-1904-034037>
14. Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu., Potrakhov N.N., Kholopova E.D., Guk K.K. New methods of digital processing of microfocus X-ray images. *Biomed. Eng.* 2019;52:435–438. <https://doi.org/10.1007/s10527-019-09864-6> [Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu., Potrakhov N.N., Kholopova E.D., Guk K.K. New methods of digital processing of microfocus X-ray images. *Meditinskaya tekhnika.* 2018;52(6):53–55 (in Russ.).]
15. Staroverov N.E., Gryaznov A.Y., Kholopova E.D., Guk K.K. Microelectronic devices digital X-ray image processing method development. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018;967(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/967/1/012016>

Об авторах

Староверов Николай Евгеньевич, аспирант, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5). E-mail: nik0205st@mail.ru. Scopus Author ID 57193738290, <https://orcid.org/0000-0002-4404-5222>

Грязнов Артем Юрьевич, д.т.н., профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5). E-mail: ay.gryaznov@yandex.ru. Scopus Author ID 12142307400. <https://orcid.org/0000-0003-2062-2213>

Камышанская Ирина Григорьевна, к.м.н., доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9); врач-рентгенолог рентгеновского отделения, СПб ГБУЗ «Городская Мариинская больница» (191014, Россия, Санкт-Петербург, Литейный пр., д. 56). E-mail: o.kafedra@mail.ru. Scopus Author ID 15834578000.

Потрахов Николай Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5). E-mail: kzhamova@gmail.com. Scopus Author ID 8689381700. <https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Холопова Екатерина Дмитриевна, аспирант, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5). E-mail: wkhlopova@gmail.com. Scopus Author ID 57193737033. <https://orcid.org/0000-0002-9103-0066>

About the authors

Nikolay E. Staroverov, Post-graduate Student, Saint Petersburg Electrotechnical University (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376 Russia). E-mail: nik0205st@mail.ru. Scopus Author ID: 57193738290, <https://orcid.org/0000-0002-4404-5222>

Artem Y. Gryaznov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376 Russia). E-mail: ay.gryaznov@yandex.ru. Scopus Author ID 12142307400. <https://orcid.org/0000-0003-2062-2213>

Irina G. Kamyshanskaya, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, St. Petersburg State University (7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034 Russia); Radiologist of the X-ray Department, St. Petersburg State Budgetary Educational Institution «Mariinsky City Hospital» (56, Liteiny pr., St. Petersburg, 191014 Russia). E-mail: o.kafedra@mail.ru. Scopus Author ID 15834578000.

Nikolay N. Potrakhov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376 Russia). E-mail: kzhamova@gmail.com. Scopus Author ID 8689381700. <https://orcid.org/0000-0001-8806-0603>

Ekaterina D. Kholopova, Post-graduate Student, Saint Petersburg Electrotechnical University (5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376 Russia). E-mail: wkhlopova@gmail.com. Scopus Author ID 57193737033. <https://orcid.org/0000-0002-9103-0066>

Математическое моделирование
Mathematical modeling

УДК 334.71: 656: 338.245
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-64-72>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Методы оценки сложности тестирования в сфере образования

А.С. Сигов,
В.Я. Цветков[@],
И.Е. Рогов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] Автор для переписки, e-mail: cvj2@mail.ru

Резюме. Проблема тестирования в сфере образования является актуальной для многих стран. Тестирование решает три задачи: проводит оценку качества текущего обучения, дает инструмент для сравнительного анализа результатов обучения, дает инструмент для управления образовательным процессом в отдельном учебном заведении и по отрасли. Это определяет актуальность тестирования и разработки новых методов оценки результатов тестирования. Статья предлагает новый метод оценки результатов тестирования для разных ситуаций: «преподаватель – учащийся», компьютерный тест, виртуальная тестирующая модель, тест на модели смешанной реальности и другие. Для решения этой задачи вводится квазисигмоидальная функция. Она является аналогом логистической функции, но учитывает особенности реального тестирования. Логистическая функция лежит в интервале от минус до плюс бесконечности. В образовании отрицательных оценок не бывает. Введенная функция лежит только в положительной области аргумента, то есть оценок тестирования. Эту функцию авторы называют функцией сложности. Предварительно исследуется функция логарифмов шансов, логистическая регрессия и вытекающий из этого метод Раша. Отмечены два недостатка метода Раша. Определяется принцип тестирования, который используется в функции сложности. Статья вводит два новых понятия: функция сложности тестирования и интегральная оценка тестирования. Интегральная оценка тестирования является интегральной функцией от точечных оценок. Она переводит точечные результаты тестирования в непрерывную функцию и создает корреляцию между оценками. Приводятся результаты эксперимента с участием студентов РТУ МИРЭА. Результаты эксперимента анализируются. Показана возможность применения метода в образовательных процессах. Метод является альтернативой методу Раша.

Ключевые слова: алгоритм, образование, тестирование, сложность, программные компоненты, логиты, логистическое уравнение, модель Раша

• Поступила: 27.08.2021 • Доработана: 04.10.2021 • Принята к опубликованию: 11.10.2021

Для цитирования: Сигов А.С., Цветков В.Я., Рогов И.Е. Методы оценки сложности тестирования в сфере образования. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):64–72. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-64-72>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Method for assessing testing difficulty in educational sphere

Alexander S. Sigov,
Viktor Ya. Tsvetkov[@],
Igor E. Rogov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: cvj2@mail.ru

Abstract. The problem of testing in education is relevant for many countries. Testing solves three problems. The first task is to assess the quality of current training. The second task is to conduct a comparative analysis of learning outcomes. The third task is the management of the educational process in a particular educational institution and in the education sector. This determines the relevance of testing and the relevance of developing new methods for assessing test results. The article proposes a new method for assessing test results for different situations: “teacher–student”, computer test, virtual testing model, test on a mixed reality model and others. To solve the problem, a special quasi-sigmoidal function is introduced. It is analogous to the logistic function, but takes into account the peculiarities of real testing of students. The logistic function ranges from minus infinity to plus infinity. There are no negative assessments in education. The introduced function lies only in the positive range of the argument. It describes actual positive scores when testing students. The authors called this function the complexity function. With its help, the complexity of the subject is assessed according to the test results. To substantiate the method, the function of the logarithms of the odds, logistic regression and the resulting Rush method are investigated. The article notes two shortcomings of the Rush method. The testing principle has been defined for the new function, which is used to estimate complexity. The article introduces two new concepts: the test difficulty function and the integral test score. Integral assessment of testing is a smooth function and makes it possible to go from a stepwise dependence to a continuous one. The cumulative test score translates the point test results into a continuous function and creates a correlation between the scores. The results of an experiment with the participation of RTU MIREA students are presented. The experimental results are analyzed. The possibility of using the method in educational processes is shown. The method is an alternative to the Rush method.

Keywords: algorithm, education, testing, complexity, software components, logits, logistic equation, Rush model

• Submitted: 27.08.2021 • Revised: 04.10.2021 • Accepted: 11.10.2021

For citation: Sigov A.S., Tsvetkov V.Ya., Rogov I.E. Method for assessing testing difficulty in educational sphere. *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):64–72 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-64-72>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема оценки сложности тестирования и тестирующих программ [1–3] является одной из важных в сфере образования. При этом различают сложность программных компонент [4] как вычислительного объекта и сложность теста как технологического объекта с учетом когнитивных факторов. Алгоритмы тестирования качественно отличаются от вычислительных алгоритмов. Они рассчитаны на включение человека в цепочку обработки информации в системе

«человек-тест». Алгоритмы тестирования включают две группы: алгоритмы информационного взаимодействия «учащийся – тест» и алгоритмы обработки результатов тестирования. Между ними существует разница. Алгоритмы информационного взаимодействия «учащийся – тест» являются интерактивными и алгоритмами второго рода. Алгоритмы обработки результатов тестирования являются прямыми или алгоритмами первого рода. Само по себе тестирование может быть рассмотрено как человеко-машинное взаимодействие. Соответственно, тестирующая

конструкция или система может быть рассмотрена как человеко-машинная система (ЧМС). В настоящее время ЧМС включает разные системы, в том числе информационные ЧМС. Примером информационной ЧМС является геоинформационная система, в которой происходит интерактивная обработка информации, и решение поставленной задачи осуществляется методом итераций человека и компьютера. Тестирующая система может быть рассмотрена как информационная человеко-машинная система. В настоящее время ЧМС (или MMS) [5] включает следующие компоненты: человеческие ресурсы, технику, технологии, организационные компоненты, информационные компоненты (данные или модели), когнитивные компоненты, учитывающие рецепцию, перцепцию и апперцепцию информации. Все компоненты ЧМС должны быть комплементарными [6]. Человеческие ресурсы и когнитивные компоненты особенно важны для тестирующих систем, предназначенных для работы с учащимися определенного уровня знаний и определенных форм когнитивного восприятия. Поэтому важно в процессе использования тестирующих систем оценивать сложность тестов, приспосабливать их к определенным уровням знаний учащихся. Такое приспособление возможно на основе анализа результатов тестирования и выработке методов сравнительной оценки сложности тестирующих программ по результатам прямого тестирования. Данная статья посвящена этому вопросу.

1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой исследования является логический, статистический, качественный и сравнительный анализ. В качестве материалов использованы публикации в области разработки алгоритмов тестирования и применения методов тестирования в образовании.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Теоретическое обоснование

В 1934 году Честер Итнер Блисс использовал интегральную функцию нормального распределения для выполнения его отображения и назвал его «пробитом» [7] как некую вероятностную единицу. В 1944 году Джозеф Берксон использовал логарифм шансов и назвал эту функцию «logit», сокращение от «log istic un it» по аналогии с «пробит». Эта единица имеет логарифмический подтекст и может быть рассмотрена как логарифмическая единица. В статистике логит-функция или лог-фора (log-odds) является логарифмом шансов или логарифмическими шансами, а шансом называют отношение [8] $p/(1 - p)$, где p – вероятность появления события,

$(1 - p)$ – вероятность неоявления события. Шанс – это вероятностная характеристика, поэтому логит связывает логарифмическую и вероятностную составляющие.

Логит-функция (log-odds) играет важную роль в логистической регрессии. Каждую вероятность можно легко преобразовать в логит, найдя отношение $p/(1 - p)$. Несмотря на простое преобразование, логарифмические шансы могут быть не всегда понятными физически. Жаккар [9, с. 10] называет их «...нелогичными и сложными для интерпретации, особенно если у вас нет большой статистической базы. Однако формулы их расчета относительно просты, даже если результаты сложно расшифровать».

Шанс – это отношение вероятности успеха к вероятности неудачи. В качестве уравнения – это $p(A)/p(-A)$, где $p(A)$ – это вероятность события A , а $p(-A)$ – вероятность «не A » (то есть дополнение к A). Логарифм шансов (логит) дает нам логарифмические шансы A , которые можно записать как

$$\log(A) = \log(p(A)/p(-A)). \quad (1)$$

Обобщенно можно описать логарифмические шансы (логит) как

$$\log\text{-odds} = \log[p/(1 - p)]. \quad (2)$$

Математически логит является инверсией стандартной логистической функции $\sigma(x) = 1/(1 + e^{-x})$, поэтому логит определяется как

$$\text{logit}(p) = \sigma^{-1}(p) = \log[p/(1 - p)] \quad (3)$$

для $p \in (0, 1)$.

Таким образом, логит-функция $f(x)$ – это тип функции (рис. 1), которая отображает значения вероятности из $(0, 1)$ на действительные числа в $(-\infty, +\infty)$ [10].

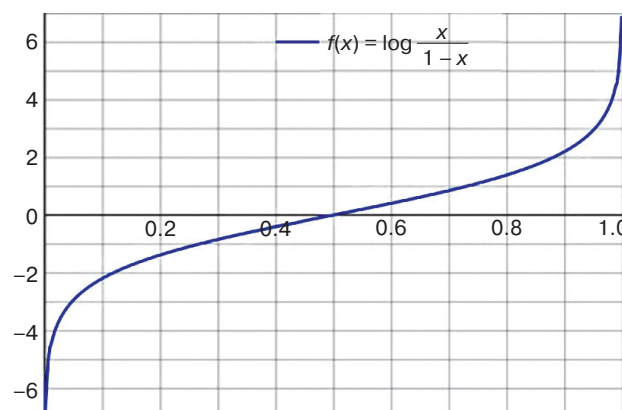


Рис. 1. График логит-функции

На рис. 1 по горизонтальной оси отложены вероятности, по вертикальной – вещественные числа в условном масштабе. Масштаб выбирают по условиям конкретной задачи.

С понятием логитов связано понятие логистической регрессии. Простая логистическая регрессия идеологически близка линейной регрессии. Существуют два различия. Линейная регрессия использует линейную зависимость между двумя измерениями (x , y). Логистическая регрессия использует логистическую зависимость или логистическую функцию между одним измерением x и его вероятностью p .

Логистическая функция может быть однопараметрической, двухпараметрической, трехпараметрической и четырехпараметрической [11]. Чаще используют однопараметрическую функцию, которая хорошо согласуется с теорией логитов.

Логистическая функция относится к классу сигмоидальных функций. Сигмоидой или сигмоидальной функцией обычно называют гладкую монотонную функцию [12], по форме напоминающую букву «S», которая имеет две асимптоты и описывает реакцию и насыщение (рис. 1). Каноническим примером сигмоиды считают однопараметрическую логистическую функцию

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (4)$$

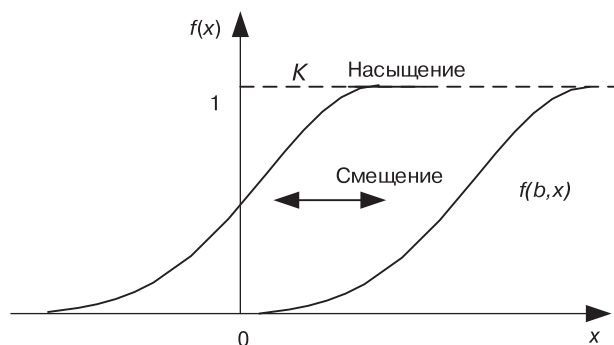


Рис. 2. Возрастающая сигмоида

Сигмоида ограничена двумя горизонтальными асимптотами (рис. 2), к которым стремится при стремлении аргумента к $\pm\infty$. Обычно этими асимптотами (для однопараметрической функции) являются «0» (при $x = -\infty$) и некоторая константа (при $x = +\infty$). Во многих случаях константа при $x = +\infty$ есть 1. Это упрощает связь между вероятностью и логистической функций. В теории оценивания Раша модель на рис. 2 используют для оценки успеваемости групп. Этот вид сигмоиды можно назвать возрастающей. Такая сигмоида имеет положительные значения функции при отрицательных значениях аргумента. Для ее смещения необходимо вводить специальный параметр b (рис. 2). Существует другой вид сигмоиды, которую называют убывающей (рис. 3). Для этой сигмоиды реакция показывает переход от верхней асимптоты к нижней.

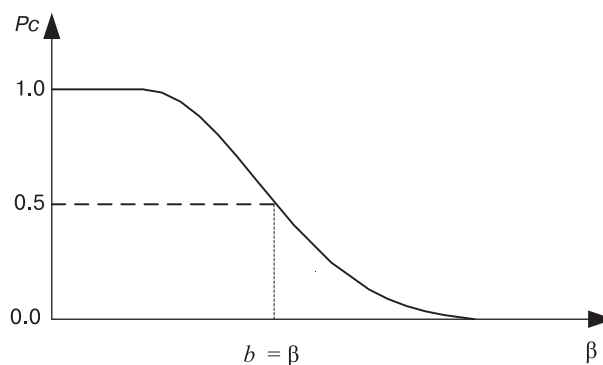


Рис. 3. Убывающая сигмоида

На рис. 3 показана убывающая сигмоида, у которой по вертикальной оси отложена вероятность, а по горизонтали характеристика сложности теста.

Производная любой сигмоиды представляет собой «гауссоподобную» кривую с максимумом в нуле, асимптотически стремящуюся к нулю при $x = \pm\infty$. К семейству класса сигмоид относят арктангенс, гиперболический тангенс и другие функции.

Если сравнивать логит-функцию (рис. 1) и убывающую сигмоиду (рис. 3), то поворот рис. 1 на 90° по часовой стрелке приведет к полной схожести графиков рис. 1 и рис. 3. Это имеют в виду, говоря об инверсии логит-функции. Убывающую сигмоиду (рис. 3) обычно используют для оценки трудности тестирования.

Таким образом, для оценки трудности тестирования используют функции, имеющие две асимптоты (верхнюю и нижнюю) и связывающий их гладкий участок.

2.2. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились в учебных группах Института информационных технологий РТУ МИРЭА. Недостаток модели Раша при оценке сложности тестирования состоит в том, что ее аргумент существует от $-\infty$ до $+\infty$, а в реальном тестировании отрицательных значений аргумента не бывает. Математически это объяснимо, если анализировать логит-функцию (рис. 1). Это приводит к тому, что большая часть асимптоты (рис. 3) лежит в отрицательной области аргумента, и сдвиг самой кривой на рис. 3 используют как сравнительную характеристику сложности теста.

Основная концепция модели Раша такова, что необходимы функции, имеющие две асимптоты и переходной участок между ними. Для реализации этой идеи авторы вводят «функцию сложности» $f_c(x)$ или «функцию сложности теста», которая существует в положительной области аргумента и имеет асимптотическое ограничение по сложности только снизу. Можно говорить о

квазисигмоидальной функции, поскольку она имеет ограниченную область аргумента, только в положительной области. Ее начальное значение при $x = 0$ равно константе «с». Эта функция позволяет оценивать сложность разных учебных предметов по результатам тестирования одной группы. Таких функций можно построить много. Авторы исследовали ряд функций и выбрали простой вид функции сложности

$$f_c(x) = c \frac{1}{1 + kx}. \quad (5)$$

В выражении (5) x – вещественный аргумент, $f_c(x)$ – функция оценки. Для $x > 0$, $k > 1$, $c \geq 1$. Для нормированной функции f_c равна 1 при $x = 0$ и асимптотически стремится к 0 при $x \rightarrow +\infty$. Эта функция есть квазисигмоида в положительной области аргумента.

В качестве аргумента выбирался упорядоченный номер студента в учебной группе. Это строго точечная величина. Функция определялась по оценке данного студента. Упорядоченный номер студента означает, что студенты в группе предварительно ранжировались по уровню их оценок в порядке возрастания от меньшей к большей. Условно это могут быть номера, которым соответствуют реальные фамилии. Если сопоставить упорядоченные номера студентов их оценкам, то получается примерная картина, приведенная на рис. 4.

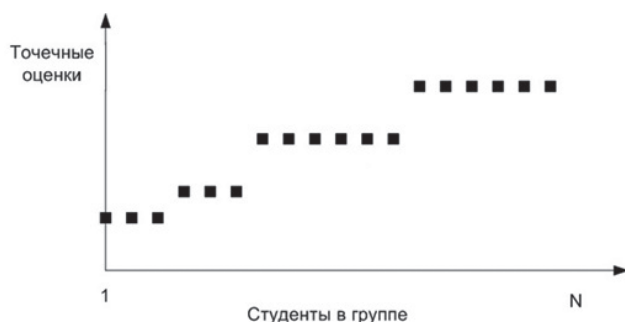


Рис. 4. Группировка оценок внутри группы

На рис. 4 показаны дискретные значения оценок для дискретного значения аргумента (номер студента в группе). Ни о какой непрерывности в такой ситуации говорить не приходится. Студенты могут иметь одинаковые оценки, что соответствует «полке» на графике. В ходе исследований выяснилось, что для устойчивого оценивания целесообразно выбирать функцию в виде кумулятивной или интегральной величины. Формирование x осуществляется следующим образом.

1. Фиксируются оценки учащихся группы z , полученные в ходе тестирования. Получают статистику в виде «гребенки».

2. Ранжируются оценки z , получают ранжированные значения z^* и ступенчатую возрастающую статистику (рис. 4)

$$z \rightarrow z^*.$$

3. Формируют интегральные оценки x по правилу

$$x_i = \sum_{j=1}^i z_j^*.$$

На рис. 5 показаны интегральные и точечные оценки.

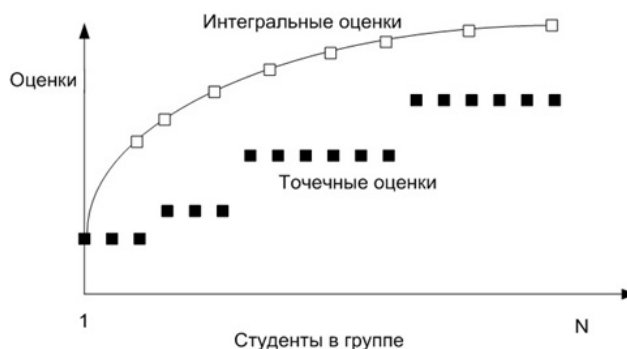


Рис. 5. Интегральные и точечные оценки

На рис. 5 интегральные оценки (выборочно) показаны светлыми квадратами. Формирование интегральных оценок, как метод, слабо напоминает сглаживание дискретных значений методом скользящего среднего. Даже одинаковые точечные оценки имеют разные значения в интегральных оценках. При этом создается корреляция и непрерывность в формировании оценок.

Функция сложности строится согласно выражению (5). Название функции обусловлено тем, что она характеризует сложность теста или предмета для данной учебной группы. В табл. 1 приведены исходные данные точечных оценок для четырех предметов учащихся «Предмет 1 – Предмет 4». В группах было выбрано по 21 учащемуся.

Оценивание учащихся проводилось по 10-балльной системе. Допустима и 20-балльная оценка и даже 100-балльная, как рекомендует Хлебников [1]. Опыт показал, что оценки лучше нормировать, то есть задавать интервал оценивания для обработки от 0 до 1. В табл. 2 приведены интегральные нормированные оценки для тех же групп.

В табл. 3 приведен расчет функции сложности для четырех предметов, сдаваемых одной и той же группой.

На рис. 6 приведен график функции по данным табл. 3.

Таблица 1. Исходные ранжированные оценки z^* для четырех предметов одной группы

Номер	Предмет 1	Предмет 2	Предмет 3	Предмет 4
1	4	4.5	5	5.5
2	5	5.5	6	6.5
3	5.5	6	6.5	7
4	6	6.5	7	7.5
5	6	6.5	7	7.5
6	6	6.5	7	7.5
7	6.5	7	7.5	8
8	7	7.5	8	8.5
9	7	7.5	8	8.5
10	7.5	8	8.5	9
11	7.5	8	8.5	9
12	8	8.5	9	9.5
13	8	8.5	9	9.5
14	8	8.5	9	9.5
15	8.5	9	9.5	10
16	8.5	9	9.5	10
17	8.5	9	9.5	10
18	9	9.5	10	10
19	9	9.5	10	10
20	9	9.5	10	10
21	9	9.5	10	10

Таблица 3. Расчет функции сложности для четырех предметов

Номер	Предмет 1	Предмет 2	Предмет 3	Предмет 4
1	0.714286	0.689655	0.666667	0.645161
2	0.526316	0.5	0.47619	0.454545
3	0.408163	0.384615	0.363636	0.344828
4	0.327869	0.307692	0.289855	0.273973
5	0.273973	0.25641	0.240964	0.227273
6	0.235294	0.21978	0.206186	0.194175
7	0.204082	0.190476	0.178571	0.168067
8	0.178571	0.166667	0.15625	0.147059
9	0.15873	0.148148	0.138889	0.130719
10	0.141844	0.13245	0.124224	0.116959
11	0.128205	0.11976	0.11236	0.10582
12	0.116279	0.108696	0.102041	0.096154
13	0.106383	0.099502	0.093458	0.088106
14	0.098039	0.091743	0.086207	0.081301
15	0.090498	0.084746	0.079681	0.075188
16	0.084034	0.07874	0.074074	0.06993
17	0.078431	0.073529	0.069204	0.065359
18	0.07326	0.068729	0.064725	0.06135
19	0.068729	0.064516	0.06079	0.057803
20	0.064725	0.06079	0.057307	0.054645
21	0.061162	0.057471	0.054201	0.051813

Таблица 2. Интегральные нормированные оценки для четырех предметов

Номер	Предмет 1	Предмет 2	Предмет 3	Предмет 4
1	0.4	0.45	0.5	0.55
2	0.9	1	1.1	1.2
3	1.45	1.6	1.75	1.9
4	2.05	2.25	2.45	2.65
5	2.65	2.9	3.15	3.4
6	3.25	3.55	3.85	4.15
7	3.9	4.25	4.6	4.95
8	4.6	5	5.4	5.8
9	5.3	5.75	6.2	6.65
10	6.05	6.55	7.05	7.55
11	6.8	7.35	7.9	8.45
12	7.6	8.2	8.8	9.4
13	8.4	9.05	9.7	10.35
14	9.2	9.9	10.6	11.3
15	10.05	10.8	11.55	12.3
16	10.9	11.7	12.5	13.3
17	11.75	12.6	13.45	14.3
18	12.65	13.55	14.45	15.3
19	13.55	14.5	15.45	16.3
20	14.45	15.45	16.45	17.3
21	15.35	16.4	17.45	18.3

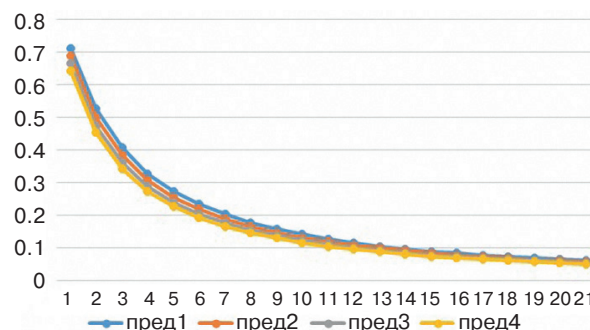


Рис. 6. График функции сложности для 4 предметов

Особенностью реального тестирования (рис. 6) является то, что график отображает только часть сигмоиды (рис. 3), поскольку нулевых оценок и низких оценок типа 1 и 2 студенты РТУ МИРЭА не получают. Значение $f_c = 1$ соответствует нулевому результату в оценке тестирования. В реальности учащиеся всегда набирают какие-то баллы, и поэтому значение функции $f_c < 1$ для условий обучения в РТУ МИРЭА (рис. 6).

Как показывает опыт, графическая близость функций сложности не является наглядной. Поэтому основой сравнения являются табличные данные. Таблицы типа табл. 3 позволяют найти числовые характеристики, характеризующие сравнительную сложность предметов для данной группы.

Таких характеристик две: интегральная и точечная. Интегральная оценка определяется как интеграл под кривыми. Точечная оценка определяется как среднее по столбцам табл. 3.

Отличием динамики функции сложности от функции в модели Раша является то, что модель Раша смещается по горизонтали, а функция сложности смещается по вертикали. Чем сложнее предмет, тем ниже кривая. В отличие от методики применения модели Раша с вычислением логитов, функция сложности вычисляется просто с использованием минимума вычислений. Для табл. 3 были получены оценки групповой успеваемости, приведенные в табл. 4.

Таблица 4. Итоговые сравнительные характеристики сложности 4 предметов для одной тестируемой группы

	Предмет 1	Предмет 2	Предмет 3	Предмет 4
Интегральный показатель сложности	4.139	3.904	3.695	3.510
Относительное приращение интегрального показателя		0.235	0.443	0.629
Точечный показатель сложности	0.197	0.186	0.176	0.167
Относительное приращение точечного показателя		0.011	0.021	0.030

По данным табл. 4 видно, что наиболее сложным предметом для данного эксперимента оказался предмет 1. Самый легкий для тестирования студентов РТУ МИРЭА – предмет 4 (Математическая логика). Данные показатели обладают сопоставимостью и могут применяться для разных предметов, но для данной группы внутри одного вуза. Каждая группа является носителем коллективного интеллекта. Она является самоорганизующейся системой, в которой участники группы «подтягивают» друг друга до общего уровня. Для другой группы возможно качественное соответствие между сложностью предметов, но количественное различие. Данный метод является альтернативой модели Раша и служит основой построения достаточно простых программных компонент и алгоритмов обработки результатов тестирования. Методика позволяет проводить сопоставительный анализ и обладает устойчивостью.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В тестировании можно выделить функциональный подход [13] и статистический подход. Примером статистического подхода является применение

модели Раша [14, 15]. Существенный недостаток этой модели при оценке сложности тестирования состоит в том, что в ней некорректно используют понятие вероятности, что непонятно для специалистов, не знающих статистику. И неизвестно знал ли ее сам Раш? Многие гуманитарии применяют формулу, не понимая ее смысл и ограничения. В статистике обычно приравнивают к вероятности только частоту наблюдений. Обычно статистическая величина приравнивается к статистической величине. Но при использовании модели Раша вероятность определяют не по статистике наблюдений (интервальной оценке), а по одной (точечной) оценке учащегося. В этом подходе считают, что вероятность равна 1, если учащийся (разовое оценивание) получает высший балл, то есть выбирают некий норматив, который приравнивают к вероятности, равной 1. Отношение оценки одного учащегося к нормативной оценке объявляют вероятностью и применяют модель Раша. На самом деле оценка характеризует интеллектуальный уровень учащегося с учетом его ментального состояния (волнение, физическая усталость, психическая усталость и др.). В разном состоянии учащийся может получать разные оценки при одном интеллектуальном уровне. Соответственно, применение метода Раша к одной и той же группе будет давать разные оценки, то есть является статистически неустойчивой характеристикой. Различие в такой оценке объясняется наличием объективной причинно-следственной связи, а не вероятностной характеристикой, как в модели Раша. Поэтому модель Раша проста и хороша, но полностью недостоверна.

Результаты исследования функции сложности показали ее приемлемость для оценки сложности предметов и простоту использования. Применение функции дает сравнительные оценки [16] и групповые оценки [17].

ВЫВОДЫ

Предлагаемый метод применим для большинства тестов типа «преподаватель – учащийся», «компьютерная программа – учащийся», «виртуальная тестирующая модель – учащийся», «модель смешанной реальности – обучаемый» и другие. Качество оценки тестирования повышается при увеличении шкалы оценок от десятибалльной и выше. Отличием данного метода от большинства методов оценивания является введение интегральной оценки, которая связывает оценки в группе и уменьшает случайные ошибки. Метод и алгоритм на его основе достаточно понятны по сравнению с моделью Раша, которая является условной. Модель Раша использует однопараметрическую логистическую функцию, которая имеет одну асимптоту

на нулевом значении функции и вторую на единичном. Такую функцию удобно привязывать к вероятности. Однако за рамками этой модели остается смысл крутизны участка сигмоиды. Исследования, проведенные Арнольдом [18], показали, что в отдельных случаях крутизна может меняться в зависимости от параметра двухпараметрической логистической модели и характеризует скорость расхода ресурса. Предложенный метод включает простые алгоритмы ранжирования, вычисления

интегральной переменной, вычисления функции сложности и статистическую обработку результатов. Он прост и доступен для использования большинству преподавателей вузов. В то же время он открыт для дальнейших исследований других функций сложности.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Ю.М., Хлебников В.А. *Введение в теорию моделирования и параметризации педагогических тестов*. М.: Прометей; 2000. 168 с. ISBN 5-7042-1068-6
2. Сафиулин Р.З. Развитие технологий тестирования в образовании. *Управление образованием: теория и практика*. 2015;1(17):139–149. URL: <https://emreview.ru/index.php/emr/issue/view/17>
3. Kolster R. Structural ambidexterity in higher education: excellence education as a testing ground for educational innovations. *Eur. J. High. Educ.* 2021;11(1):64–81. <https://doi.org/10.1080/21568235.2020.1850312>
4. Кудж С.А., Цветков В.Я., Рогов И.Е. Поддержка жизненного цикла программных компонент. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):19–33. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-19-33>
5. Mgbemena E. Man-machine systems: A review of current trends and applications. *FUPRE J. Sci. Ind. Res. (FJSIR)*. 2020;4(2):91–117.
6. Богоутдинов Б.Б., Цветков В.Я. Применение модели комплементарных ресурсов в инвестиционной деятельности. *Вестник Мордовского университета*. 2014;24(4):103–116. <https://doi.org/10.15507/VMU.024.201403.103>
7. Bliss C.I. The method of probits. *Science*. 1934;79(2037):38–39. <https://doi.org/10.1126/science.79.2037.38>
8. Viera A.J. Odds ratios and risk ratios: what's the difference and why does it matter? *South. Med. J.* 2008;101(7):730–734. <https://doi.org/10.1097/smj.0b013e31817a7ee4>
9. Jaccard J. Interaction effects in logistic regression. USA: Sage Publishing; 2001. V. 135. 80 p. <https://dx.doi.org/10.4135/9781412984515>
10. Cramer J.S. The origins and development of the logit model. In book: *Logit models from economics and other fields*. Cambridge University Press; 2003. Ch. 9. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511615412.010>
11. Jokar M., Subbey S., Gjosæter H. A logistic function to track time-dependent fish population dynamics. *Fisheries Research*. 2021;236:105840. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105840>
12. Muñoz García D.A., Cardona Gómez D.C., Hoyos Mendez Y.C. Vólvulo del sigmoide: revisión narrativa. *Revista Facultad Ciencias de la Salud: Universidad del Cauca*. 2020;22(1):36–44. <https://doi.org/10.47373/rfcs.2020.v22.1575>
13. Цветков В.Я., Рогов И.Е. Функциональный подход к оценке успеваемости учебных групп. *Образовательные ресурсы и технологии*. 2021;1(34):61–68.

REFERENCES

1. Neiman Yu.M., Khlebnikov V.A. *Vvedenie v teoriyu modelirovaniya i parametrizatsii pedagogicheskikh testov (Introduction to the theory of modeling and parametrization of pedagogical tests)*. Moscow: Prometei; 2000. 168 p. (in Russ.). ISBN 5-7042-1068-6
2. Safiulin R.Z. Technology development of testing in education. *Upravlenie obrazovaniem: teoriya i praktika = Education management review*. 2015;1(17):139–149 (in Russ.). Available from URL: <https://emreview.ru/index.php/emr/issue/view/17>
3. Kolster R. Structural ambidexterity in higher education: excellence education as a testing ground for educational innovations. *Eur. J. High. Educ.* 2021;11(1):64–81. <https://doi.org/10.1080/21568235.2020.1850312>
4. Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya., Rogov I.E. Life cycle support software components. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):19–33 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-19-33>
5. Mgbemena E. Man-machine systems: A review of current trends and applications. *FUPRE J. Sci. Ind. Res. (FJSIR)*. 2020;4(2):91–117.
6. Bogoutdinov B.B., Tsvetkov V.Ya. Application of the model of complementary resources in investing activities. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Engineering Technologies and Systems*. 2014;24(4):103–116 (in Russ.). <https://doi.org/10.15507/VMU.024.201403.103>
7. Bliss C.I. The method of probits. *Science*. 1934;79(2037):38–39. <https://doi.org/10.1126/science.79.2037.38>
8. Viera A.J. Odds ratios and risk ratios: what's the difference and why does it matter? *South. Med. J.* 2008;101(7):730–734. <https://doi.org/10.1097/smj.0b013e31817a7ee4>
9. Jaccard J. Interaction Effects in Logistic Regression. USA: Sage Publishing; 2001. V. 135. 80 p. <https://dx.doi.org/10.4135/9781412984515>
10. Cramer J.S. The origins and development of the logit model. In book: *Logit models from economics and other fields*. Cambridge University Press; 2003. Ch. 9. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511615412.010>
11. Jokar M., Subbey S., Gjosæter H. A logistic function to track time-dependent fish population dynamics. *Fisheries Research*. 2021;236:105840. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105840>
12. Muñoz García D.A., Cardona Gómez D.C., Hoyos Mendez Y.C. Vólvulo del sigmoide: revisión narrativa. *Revista Facultad Ciencias de la Salud: Universidad del Cauca*. 2020;22(1):36–44. <https://doi.org/10.47373/rfcs.2020.v22.1575>

14. Seif N.A.S.M.A. *Building and standardizing a school readiness battery for kindergarten children in light of classical theory and item response theory (A comparative study)*. MA Thesis. Fayoum University; 2018. URL: <http://www.fayoum.edu.eg/english/Education/Psychology/pdf/MsnadaMscE.pdf>
15. Цветков В.Я., Войнова Е.В. Модификация модели Раша для оценки свободного тестирования. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2018;1(63):90–94. <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-63-1-90-94>
16. Кудж С.А. Методы сравнительного анализа. *Славянский форум*. 2019;3(25):140–150.
17. Кудж С.А. Оценка групповой когнитивной сложности. *Славянский форум*. 2018;2(20):36–43.
18. Арнольд В.И. Теория катастроф. *Итоги науки и техники. Серия «Современные проблемы математики. Фундаментальные направления»*. 1986;5:219–277.
13. Tsvetkov V.Ya., Rogov I.E. Functional approach to the assessment of academic performance of study groups. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii = Educational Resources and Technologies*. 2021;1(34):61–68 (in Russ.).
14. Seif N.A.S.M.A. *Building and standardizing a school readiness battery for kindergarten children in light of classical theory and item response theory (A comparative study)*. MA Thesis. Fayoum University; 2018. Available from URL: <http://www.fayoum.edu.eg/english/Education/Psychology/pdf/MsnadaMscE.pdf>
15. Tsvetkov V.Ya., Voinova E.V. Modification of Rush model for free testing assessment. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of RSREU*. 2018;1(63):90–94 (in Russ.). <https://doi.org/10.21667/1995-4565-2018-63-1-90-94>
16. Kudzh S.A. Methods for comparative analysis. *Slavyanskii forum = Slavic Forum*. 2019;3(25):140–150 (in Russ.).
17. Kudzh S.A. Assessment of group cognitive complexity. *Slavyanskii forum = Slavic Forum*. 2018;2(20):36–43 (in Russ.).
18. Arnol'd V.I. Catastrophe theory. *Itogi nauki i tekhniki. "Seriya Sovremennye problemy matematiki. Fundamental'nye napravleniya"*. 1986;5:219–277 (in Russ.).

Об авторах

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru. ResearcherID: L-4103-2017, Scopus Author ID: 35557510600.

Цветков Виктор Яковлевич, д.т.н., д.э.н., профессор, советник ректората ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: cvj2@mail.ru. Scopus Author ID: 56069916700.

Рогов Игорь Евгеньевич, директор Института довузовской подготовки ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: rogov@mirea.ru.

About the authors

Alexander S. Sigov, Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: sigov@mirea.ru. ResearcherID: L-4103-2017, Scopus Author ID: 35557510600.

Viktor Ya. Tsvetkov, Dr. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Econ.), Professor, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: cvj2@mail.ru. Scopus Author ID: 56069916700.

Igor E. Rogov, Director of the Institute of Pre-University Training, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: rogov@mirea.ru.

Мировоззренческие основы технологии и общества
Philosophical foundations of technology and society

УДК 001.5+621.3
<https://doi.org/10.32362/2500-316x-2021-9-6-73-87>



РЕЦЕНЗИЯ

Дискуссия по книге С.М. Крылова «Неокибернетика» (2008)

Е.С. Горнев¹, И.В. Матюшкин^{1, 2, @}

¹ АО «НИИ молекулярной электроники», Москва, Зеленоград, 124460 Россия

² НИУ «Московский институт электронной техники», Москва, Зеленоград, 124498 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: imatyushkin@niime.ru

Резюме. В контексте вышедшей книги авторов «Общая теория технологий и микроэлектроника» (2020) проводится сравнительный анализ «общей формальной технологии (ОФТ)» С.М. Крылова на основе его работы 2008 года. Несмотря на абстрактность алгебраико-алгоритмического подхода, Крылову удалось предложить ряд конкретных конструкций, востребованных в ходе четвертой промышленной революции и для будущего развития промышленной технологии нанoeлектроники и биотехнологии. Промышленная технология рассматривается как сложный объект управления, т.е. выступает объектом изучения новой дисциплины «неокибернетика». Хотя основы данного подхода закладывались в 1930–1960 годах в рамках логико-математических исследований, но его расширение неизбежно при использовании процессов самоорганизации для получения функциональных надмолекулярных структур в технологических процессах нанoeлектроники (например, инженерия ДНК-оригами). Вопросы исчисления сложности самого изделия (конструкции) и технологии его изготовления, или, по Крылову, сложности технологических автоматов, стали еще более актуальными, чем раньше. Теоретические вопросы самоорганизации, разработки искусственной жизни, создания самовоспроизводящихся технических систем также представляются перспективными для решения. Формальная технология Крылова выступает, по нашему мнению, важным «блоком» при построении общей теории технологий (ОТТ), полезным для описания технологии на уровне технологических: операции, маршрута и процесса. Хочется побудить широкий круг читателей к прочтению книги и сформировать устойчивый интерес к общетехнологической проблематике. Значение ОТТ и ОФТ простирается за пределы сферы техники и, в узком смысле, заводских производств, в область «тонкой» регуляции физиологии в биологических объектах и фармацевтика, а также в проблемное поле когнитивных наук, психологии, образования, когда в центре внимания оказываются структура личности и гетерогенные конструкты, «плавающие в море бессознательного». Мы, как и С.М. Крылов, демонстрируем, что вопросы промышленной технологии нельзя рассматривать без абстрактной формализации и без обращения к философии.

Ключевые слова: общая теория технологий, формальная технология, неокибернетика, конечные автоматы, самоорганизация, сложность

• Поступила: 26.04.2021 • Доработана: 20.09.2021 • Принята к опубликованию: 27.09.2021

Для цитирования: Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Дискуссия по книге С.М. Крылова «Неокибернетика» (2008). *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):73–87. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-73-87>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REVIEW ARTICLE

A discussion of S.M. Krylov's book «Neocybernetics» (2008)

Evgeny S. Gornev¹, Igor V. Matyushkin^{1, 2, @}

¹ JSC Molecular Electronics Research Institute, Moscow, Zelenograd, 124460 Russia

² National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd, 124498 Russia

@ Corresponding author, e-mail: imatyushkin@niime.ru

Abstract. A comparative analysis of the “general formal technology (GFT)” by S. M. Krylov is carried out in the context of the published book of the authors “General Theory of Technologies and Microelectronics” (2020) and on the basis of his work of 2008. Despite the abstractness of the algebraic-algorithmic approach, Krylov offers a number of specific constructions that are in demand during the fourth industrial revolution and for the future development of industrial technology in nanoelectronics and biotechnology. Industrial technology is considered as a complex object of management, i.e., it is the object of study of the new discipline «neocybernetics». Although the foundations of this approach were laid in 1930s–1960s within the framework of logical and mathematical research, its expansion is inevitable when using self-organization processes to obtain functional supramolecular structures in technological processes of nanoelectronics (for example, DNA origami engineering). The issues of complexity quantification for a product itself (structure) and its manufacturing technology, or, according to Krylov, the complexity of technological automata, have become even more relevant than before. The theoretical issues of self-organization, the development of artificial life, and the creation of self-replicating technical systems also seem promising for solution. In our opinion, Krylov's formal technology is an important “block” in the advancement of general theory of technologies (GTT) useful for describing the technology at the levels: operation, route, and process. We would like to encourage a wide range of readers to study the book and form a steady interest in general technological issues. The value of GTT and GFT extends beyond the sphere of technology and, in a narrow sense, factory production, but also into the area of «fine» regulation of physiology in biological objects and pharmacy, as well as into the problem field of cognitive sciences, psychology, and education. when the focus is on the personality structure and heterogeneous constructs «floating in the sea of the unconscious». Both S.M. Krylov and we demonstrate that the issues of industrial technology cannot be considered without abstract formalization and without reference to philosophy.

Keywords: general technology theory, formal technology, neocybernetics, finite-state machines, synergetics, complexity

• Submitted: 26.04.2021 • Revised: 20.09.2021 • Accepted: 27.09.2021

For citation: Gornev E.S., Matyushkin I.V. A discussion of S.M. Krylov's book «Neocybernetics» (2008). *Russ. Technol. J.* 2021;9(6):73–87 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-6-73-87>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Этой статьей мы отдаем дань памяти Сергею Михайловичу Крылову (1948–2020), д.т.н., профессору кафедры вычислительной техники Самарского государственного технического университета, внесшему вклад в создание общей теории технологий (ОТТ) [1]. Комплекс идей Крылова по формальной, как он называл, теории технологий (ОФТ, иногда просто ФТ) представлен в некоторых статьях [2], его диссертации [3] и трех книгах [4–6]. Хотя нашей

главной целью является сравнение ОТТ и ОФТ, но уместным будет непосредственное обращение к только одной книге «Неокибернетика» [5] (рис. 1), перешедшей в разряд букинистических редкостей. Чтобы выйдя за рамки ОФТ/ОТТ, понять генезис и взаимосвязь идей Крылова, мы выбрали форму реферата-синописа. Сама книга написана скорее в научно-популярном стиле, нежели чем в научном. Следует сказать, что термин «неокибернетика» все чаще используется разными авторами [7], причем дистинкция с винеровской кибернетикой проходит

по линии сложности объекта управления и, соответственно, неполноте информации об его состоянии. Любую технологическую систему как раз можно рассматривать как объект управления, обладающий повышенной сложностью.



Рис. 1. С.М. Крылов и обложка его книги [5]¹

Для уточнения предмета изучения ОФТ и ОТТ уместно привести одну цитату, используемую и Крыловым, и другими авторами. В 1901 г. в статье «Технология», опубликованной в энциклопедическом словаре, Д.И. Менделеев характеризует технологию как науку о способах изготовления из природного сырья искусственных предметов, т.е. предметов, несуществующих в природе: «Возникновение Т. (технологии) или учения о выгодных (т.е. поглощающих наименее труда людского и энергии природы) приемах переработки природных продуктов в продукты потребные (необходимые или полезные или удобные) для применения в жизни людей. Хотя Т. по своему предмету глубоко отличается от социально-экономических учений, но в ней с ними много прямых и косвенных связей, так как экономия (сбережение) труда и материала (сырья), а чрез них времени и сил составляет первую задачу всякого производства и существо учения о фабрично-заводских производствах совершенно теряет почву, если утрачивается из виду выгодность (экономичность) производства ... задача Т. показывает, что в ней нет тех высших и абсолютных требований, какими отличаются абстрактные науки, касающиеся видимой или внутренней природы, что она содержит в себе приложение к жизни других более отвлеченных знаний и что ее содержание должно изменяться по обстоятельствам и условиям места и времени. Но эти, так сказать, отрицательные стороны Т. искупаются, во-первых, тем прямым и жизненным значением, какое имеют уже в наше время фабрики и заводы, и какое в будущем долженствует все более и более

усиливаться, а, во-вторых, тем, что учение о способах, применяемых заводами и фабриками, освещает научными началами то, что вырабатывается практикою и чрез это не только усовершенствуется производство, но и расширяется область научного понимания вещей и явлений» [8].

СТРУКТУРА КНИГИ

В Предисловии и Введении указываются три источника, вдохновившие автора: это «Тектология» Богданова [9], «Комментарии переводчика» Августы Ады Лавлейс (1843) и работы по синергетике. Напомним, что Богданов определял тектологию как всеобщую организационную науку, где основной акцент исследования сделан на формы организации (так, «формы регулирующие» предвосхищают кибернетику). Почему мир устроен организованно, – этот вопрос возникает и у Крылова, и он пишет: «Основная цель ОФТ – попытаться логически (и технологически) объяснить устройство окружающего нас мира на уровне, в первую очередь, нашего восприятия, то есть – на макроуровне, «маштабным центром» которого является сам человек. А как этот макроуровень может быть реализован с точки зрения различных возможных физических микроуровней – это уже как бы вопрос вторичный, который здесь практически не рассматривается» [5, с. 11]. При этом «формальная технология, наоборот, начинается от изучения наиболее общих свойств наиболее общих операций как над реальными, так и над воображаемыми (абстрактными) объектами, продвигаясь по иерархической лестнице вниз – ко все более и более конкретным свойствам все более конкретных объектов и операций» [5, с. 6–7]. Следует для лучшего понимания обратиться к самому Богданову [9, с. 79]: «При бесконечном богатстве материала Вселенной и бесконечном разнообразии форм, откуда берутся эти настойчиво, систематически повторяющиеся и возрастающие с познанием аналогии? Признать все их простыми «случайными совпадениями» – значит внести величайший произвол в мировоззрение и даже стать в явное противоречие с теорией вероятностей. Научно возможный вывод один: действительное единство организационных методов, единство их повсюду – в психических и физических комплексах, в живой и мертвой природе, в работе стихийных сил и сознательной деятельности людей». Формы формирующие, по Богданову, представлены у Крылова как развитие систем: «Развитие любой системы – материальной или информационной – есть процесс в той или иной степени технологический. Поэтому очень важной областью приложения формальной технологии являются самые различные процессы развития, которые мы в

¹ URL: <http://vt.samgtu.ru/index.php>, дата обращения: 25.10.2021. [URL: <http://vt.samgtu.ru/index.php>. Accessed: October 25, 2021.]

дальнейшем будем называть эволюционными – как естественные, существующие в окружающей природе, так и искусственные, реализуемые человеком или при его участии» [5, с. 9]. Следует сказать, что по сравнению с ОТТ Крылов более последовательно проводит идеи эволюции, хотя и у нас [1] эволюция рассматривается не только на уровне технологии, но и на уровне технологической операции (ТО). Эволюционность, проявляющая в техносфере через изобретательскую деятельность духа [1, с. 380], есть всеобщее закономерное свойство: «В природе сквозь хаос бесчисленных изменений прокладывают себе путь те же диалектические законы движения, которые и в истории господствуют над кажущейся случайностью событий, – те самые законы, которые, проходя красной нитью и через историю развития человеческого мышления, постепенно доходят до сознания мыслящих людей» [10].

Заимствованный у Ады Лавлейс, дочери Байрона, взгляд на ТО, помимо абстрактности, фиксирует еще и системность модифицируемого объекта: «Под словом *операция* мы понимаем любую процедуру, которая меняет взаимное отношение двух или большего числа вещей, какого бы рода эти отношения не были. Это максимально общее определение, которое может включать все объекты во Вселенной. Но наука о таких операциях, будучи особым образом выведенной из математики, является самостоятельной наукой, имеющей свою собственную теоретическую истинность и значимость, также как логика имеет свою собственную истинность – независимо от предметов, к которым мы применяем ее объяснения и методы». В ОТТ ТО вводилась как изменение состояния субстрата, но Крылов конкретизирует, что любое изменение есть изменение взаимного отношения частей. Далее, по роду объектов Крылов выделяет информационные и «обычные» материальные технологии. Первые изучаются классической теорией алгоритмов, что отмечается автором [5, с. 11]: «Будучи плоть от плоти порождением математики (точнее – теории алгоритмов), ОФТ имеет возможность без особых проблем адаптировать для своих нужд любые ее методы, наработанные на текущий момент. Более того, формальная технология очень четко определяет и место самой математики (как технологии вычислений) среди всего множества технологий». Это созвучно нашему определению технологии как «овеществление массово применяемых алгоритмов» [1, с. 30].

На вопросы сложности мы обращали внимание при рассмотрении уровня технологического маршрута (ТМ). Крылов идет чуть дальше, совершенно справедливо увязывая сложность с самоорганизацией и, следовательно, синергетикой (прежде всего, в лице Пригожина). Он пишет о синергетике и ОФТ:

«Взаимное признание и «обмен идеями» способны принести пользу обоим научным направлениям, тогда как возможная конфронтация скорее всего отразит лишь типичную социальную ситуацию «захвата власти». Необходимо отметить, что синергетика связывает целостное восприятие с отысканием параметров порядка в исследуемом объекте; т.е. в любом объекте должен быть порядок, и отыскание его есть задача синергетики. Автор также пишет о конструктивном характере ОФТ вплоть до конструирования новых «физических миров», и, на наш взгляд, это лишь еще больше заостряет внимание на технологиях проектирования как двойниковых по отношению к технологиям «производящим», о чем писал А.А. Ивлев [11]. Так или иначе, нельзя разрывать изучение проблем самоорганизации от проблем исчисления сложности.

Пожалуй, нацеленность на конструктивность представляет наиболее оригинальную черту подхода Крылова, заключающуюся в «предельном абстрагировании понятий объектов операций и механизмов связывания объектов друг с другом в различные конструкции и структуры – будь то слова, состоящие из символов, узлы и агрегаты, состоящие из деталей, или «молекулы», построенные из «атомов»... Следует заметить, что на выработку этого на первый взгляд слишком грубого и слишком упрощенного подхода ушло около десяти лет» [5, с. 15–16].

Первая глава «Формальная технология и метафизика» носит историко-библиографический характер, а вторая глава под названием «Что дает функциональность?» посвящена формулировке ОФТ. В своей книге мы поступили точно также, причем и понятия «изделия», «целевого продукта», а значит и функциональности, были выставлены нами в центр ОТТ. Третья глава «Вверх – по лестнице эволюционных технологий» привносит в ОФТ динамический и эволюционный характер, но одновременно естественным образом вводится идея иерархичности [1, с. 69]. Можно проанализировать определенные технологии и их эволюционные преобразования, операции и рабочие переходы этих операций, роль и характер операций, изменение этой роли в ходе эволюции, а не только изменения структур, реализующих каждую операцию. Так, эволюция микроэлектроники [1, глава IV] иллюстрирует общий случай эволюции технологий. При этом нужно рассматривать как эволюцию процессов, так и эволюцию средств реализации этих процессов.

Две последующие главы «Почему и как возникает жизнь» и «Эволюция систем» посвящены модным в 1960-х гг. проблемам, вокруг которых, конечно, всегда будут вестись дискуссии. Автор обращается к понятиям энтропии, негэнтропии, механизмам адаптации, и в этом легко увидеть параллели с

построением 4-й и 5-й глав [1]. При обсуждении промышленной технологии адаптивность и гомеостаз являются важными концепциями. Шестая и седьмая главы о программно-управляемых технологических системах будущего и о тезисе Черча, соответственно, иллюстрируют техническую сторону организации производства. Здесь также обнаруживается некоторая параллель с главами нашей книги об уровнях производственного процесса и технологии. Восьмая глава «Как и куда мы развиваемся? Социальные и экономические системы», где автор сфокусировался на гуманитарных аспектах, например, красоте, имеет аналогию с последней седьмой главой [1], во всяком случае, по рассматриваемой проблематике.

СОДЕРЖАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ ГЛАВЫ 1

Начинается глава с пространного рассуждения о познании человеком мира через религию, затем философию, через единство метафизики и математики через понятие числа: «Так появились пифагорейцы. Восхищенные красотой и стройностью арифметических и геометрических построений они попытались лишить число одного из главных его достоинств – абстрактности». В наше время математика приросла теорией алгоритмов и на новом уровне нужен возврат к метафизике для объяснения мира. Задается вопрос: «Но единой математической теории происхождения жизни – нет! Почему? Что есть в математике, как обобщенном универсальном методе описания и решения всех задач, такого, что радикально отличает его от тех методов, которые использует природа?». Дается ответ: «Во всех без исключения случаях математика оперирует исключительно с искусственными объектами – числами или некоторыми их «заменителями» (символами и/или кодами). Природа же «работает» только с физическими объектами... Говоря коротко, реальные физические объекты, находясь друг с другом в физическом контакте, всегда проявляют присущую им функциональность, связанную с заложенной в них физикой – то есть с физикой той Вселенной, в которой происходит взаимодействие» [5, с. 24–25].

Затронутая автором проблема достаточно деликатна и принадлежит утонченной метаматематике. С практической точки зрения Крылов прав, когда говорит о скрытой аксиоме математики: «При любых математических преобразованиях элементарным объектам математических операций (числам и кодам) присуще только одно абстрактное свойство – представлять некоторые количества». Тем не менее, мы знаем теорию множеств Кантора, качественную теорию дифференциальных уравнений, где число вторично. Это различие подходов к математике имеет место даже в самой математической логике, если

сравнить труды формалиста Гильберта и его современника Готлоба Фреге (исчисление предикатов). Синтаксическое мышление характерно для колмогоровской традиции и для цитируемой Крыловым работы (2000 г.) Юргена Шмидхубера «Алгоритмические теории всего» [12]. Нам ближе физико-семантический подход [1, с. 204]; такую же позицию разделяет и Крылов: «Всегда можно найти объекты, описание которых во «вселенных Шмидхубера» оказывается не просто неполноценным, но абсолютно неадекватным» [5, с. 28]. С другой стороны, любое исследование, в том числе и технологии, неизбежно упирается в проблемы языка и символики.

Здесь же используется понятие функциональности, но оно понимается автором нестандартно. При этом обращается внимание на объектно-ориентированную парадигму (ООП) программирования и триаду «объект – свойства – функциональность». Выписывается формула (с. 30), гласящая: 1) у объекта может быть несколько свойств; 2) каждое свойство зависит от свойств других объектов (и других свойств самого объекта), а сама функциональная связь и есть функциональность. Автор предупреждает: «Рассматривать только функциональности без связанных с ними физических свойств не имеет смысла – это будет просто частью давно существующего раздела математики под названием «общая теория вычислимых функций». Выделяются два уровня ОФТ: простой, основанный на диаде «объект – свойства», и более развитый, принимающий во внимание всю триаду. Также сразу выделяются два типа формальных ТО: синтеза, аналогичного сложению, и декомпозиции, т.е. разделению. Примечательно, что автор вводит и ТО анализа, по смыслу совпадающую с введенной нами [1, с. 116] контрольно-измерительной и аттестационной (КИА) ТО; математически это выражается как $F_i(x) \rightarrow \langle x, \beta \rangle$, где β – искомая характеристика (параметр) объекта x . Рассматривается и, по-видимому, некорректный случай, когда $\beta \in \{0, 1\}$ – знак отсутствия или присутствия объекта, а также общий случай измерения как сравнения конкретной формы объекта с эталоном.

На с. 35 дается определение ТО: «Под объектами в ФТ на самом деле может пониматься все, к чему могут быть применены ее «технологические операции» – то есть операции, тем или иным образом влияющие на сами объекты или/и на их свойства, или/и на их взаимное расположение». По аналогии с алфавитом в матлогике автор, «естественно» по его выражению, вводит базовые элементы или базу технологии. И ведь если мы рассмотрим историю микроэлектроники, то эта теоретическая идея, казалось бы взятая из математического ума, действительно была воплощена в перечне материалов, конструктивных элементов (электронной компонентной базы) и

типовых технологических процессов. Вместе с тем современные технологии открыты к новациям, они эволюционируют, меняя собственную «аксиоматику». На с. 36 дается алгебраическое по своему духу определение формальной технологии как совокупности базы и операций над ее элементами и конструкциями, т.е. получаемыми из элементов базы сложных объектов. Нетрудно увидеть аналогию с носителем и сигнатурой алгебраической системы.

Далее вводится понятие креативной технологии, на наш взгляд избыточное, потому что любая практическая технология всегда создает новое, если не брать экзотический для производства случай технологии копирования (пример – полимеразная цепная реакция) или аналогию с переносом изображения к микроэлектронике. Креативность, похоже, следует соотносить с «пользой». И в этом случае можно вспомнить мысль С. Лема об отнесении технологии к науке и сказать, что нет бесполезной науки в самом что ни на есть прагматическом значении слова «польза», потому что никогда не известно заранее, какая информация о природе пригодится, более того, окажется необыкновенно нужной и важной. С другой стороны, различение креативных и некреативных технологий дает основание автору говорить о самовоспроизводстве биологических клеток и усложнении форм жизни в процессе эволюции (вплоть до появления интеллекта) и вводить понятие «эволюционная технология» [5, с. 41]. Крылов, как и мы, при анализе суммы технологий и через понятие точек сопряжения [1, с. 355], приходит к идее эволюции через развитие и усложнении базы технологии, но альтернативным путем, через понятия креативности и базы.

Автор обращает внимание на то, что «новизна конструкций должна определяться исключительно средствами самой технологии». Такая мысль кажется нам глубокой и важной для анализа изобретательской деятельности и новаций, т.е. проектная деятельность становится подчиненной по отношению к производственно-технологической. Обычно в практике имеет место обратное: вначале определяется конструкция, а затем только маршруты изготовления. В более широком смысле лучше перейти не на уровень маршрута, а на уровень производственного процесса [1, с. 31]. В конце концов, главным становится не «что сделать?», а «как это сделать?». Только в этом случае новое получит право на жизнь. Вместе с тем мы указывали на неразрывное единство технологии и конструкции, а Крылов, исходя из алгебраических соображений, усиливает и вычленяет вторую сторону этого единства. Что касается самовоспроизводства, то мысль Крылова обращается к клеточным автоматам Кодда и достаточности небольшого

уровня функциональности, определяемого числом возможных локальных функций перехода и/или числом состояний ячеек.

По аналогии с функцией нескольких переменных автор вводит формально-технологическую функцию (ФТ-схема синтеза), результатом которой является новый объект/конструкция. При этом явным образом вводится множество допустимых параметров ТО; в нашей терминологии это технэ уровня ТО [1, с. 115]. Помимо схем синтеза вводится операция «фиксированной дезинтеграции», по смыслу сходная с «дозированием» в пищевой технологии. Даются математические определения для ряда частных типов ТО. И здесь следует сказать, что ТО у Крылова скорее эквивалентно микрооперациям [1, с. 108].

Формулируется теорема об «эффективности накопленных знаний», т.е. о возможности пронумеровать все ТМ. Автор поясняет: «Любая технология, будучи по определению конечной алгоритмической системой (т.е. системой с конечным числом типов начальных объектов операций и конечным числом самих операций над объектами) за конечное число шагов может породить лишь конечное множество объектов (синтезов или конструкций)». Теорема верна лишь абстрактно-математически. Некоторые операции меняют свойства объектов, а сочетание таких свойств, даже при конечном числе операций, может быть, с практической точки зрения, бесконечным. Отсюда следует несколько фантастическая, на наш взгляд, идея о конструкторе-анализаторе, представляющем машину Тьюринга, соединенную с технологическим блоком. По Крылову, технология полна, если она бесконечно креативна и по конструкции изделия можно восстановить технологию его синтеза. Восстановимость, по-видимому, понимается как существование с точностью до однозначности, поскольку, например, соединение можно выполнить различными технологическими способами сварки (лазерная, электрическая, ионная и т.п.), не включая различные присадки. Автор считает совпадение названия с полнотой в логике случайным, однако, как нам представляется, аналогия вполне адекватна, ведь формула доказуема, если существует цепочка формул, связывающих ее с аксиомами. Завершают главу несколько математизированных определений и утверждений, а также сводный рисунок подтипов технологий (с. 68) – рис. 2.

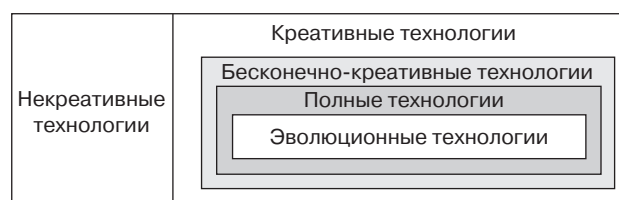


Рис. 2. Выделенные С.М. Крыловым типы технологий

СОДЕРЖАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ ГЛАВЫ 2

Глава посвящена абстрактным понятиям свойства и функциональности, весьма трудна для понимания, вторгается в область философии и опирается на труды М. Бунге и Е.М. Карпова. Автор сознает всю сложность вопроса: «Трактовка смысла термина «свойство» в каждом конкретном случае применительно к каждому варианту представления систем, их компонентов и отношений между компонентами – один из самых сложных моментов в исследованиях систем... Говоря о свойствах отдельных объектов и систем объектов, обычно не подчеркивают принципиальную разницу в свойствах, связанных с их поведением – динамикой, и в свойствах, как бы статически связанных с самими объектами – то есть таких, которые позволяют отличать одни объекты от других независимо от их динамики» [5, с. 74]. Автор примыкает к линии Дж. Клира – Е.М. Карпова и дает такое определение: «Свойство объекта (элемента или конструкции) – это некоторая числовая, геометрическая, физическая или любая другая, в том числе воображаемая, его характеристика, стабильная при определенных стабильных условиях, по которой (по которым) они (элементы, конструкции) могут отличаться друг от друга или от своего, предшествующего во времени и/или пространстве, состояния».

Крылов подчеркивает технический смысл этого определения и справедливо указывает, что «наличие свойств объектов не обязательно предполагает наличие среди аналитических операций соответствующей технологии операций, напрямую определяющих «присутствие» или «отсутствие» тех или иных свойств, и даже «измеряющих» их величину» [5, с. 78]. Также автор расширяет предикативный смысл свойства и прямо пишет, что вполне можно отображать свойство целым или конечным вещественным числом, а не только булевым. Заметим, что такой подход имеет место в теории вероятностей, когда случайному событию сопоставляется случайная величина. По Крылову, «в такой нотации становится вполне очевидной возможность ограничения реального (т.е. достаточно полного) списка свойств объектов тем его сокращенным вариантом, который представляет полноценную картину их поведения в конкретном контексте» [5, с. 80]. Для практики КИА ТО промышленной технологии и интерпретации их результатов эта проблема неполноты имеет существенное значение (см. в этой связи наши замечания по физико-статистическому подходу в теории надежности [1, с. 233]). Говоря о важности ООП, Крылов пишет: «Для нас же в этой концепции важно ее самое главное, центральное звено, а именно – любой объект должен представляться единой совокупностью как параметров, описывающих его особенности

(свойства!), так и методов (способов, функций), описывающие использование (взаимодействие) параметров как внутри объекта, так и вне его – то есть с другими объектами. Действительно, любой реальный объект реального мира – это не просто некоторый набор его статических характеристик. Это еще и процесс его существования в окружающем мире, его динамика, его эволюция» [5, с. 81].

Состояние объекта определяется как совокупность конкретных значений его свойств и интерпретируется как вектор в многомерном «пространстве» (такое пространство, как мы поняли, есть аналог фазового пространства в статистической физике). Заслуживает внимания «метод назначенных функциональностей», заключающийся в декомпозиции свойства со многими значениями на несколько свойств с немногими, например, бинарными значениями [5, с. 83]. И, как справедливо замечает Крылов, такой метод часто используется при проектировании клеточных автоматов.

Повторим, понятие «функциональность» вводится нетрадиционно; в ОТТ функциональность есть свойство конечного изделия выполнять полезную функцию, но можно, конечно, постулировать локальную функциональность элемента изделия или полуфабриката реагировать на внешнее воздействие при некоторых остальных заданных условиях «правильным», с точки зрения проектировщика, образом. Такая потребность действительно возникает в микроэлектронике при характеристике базовых конструктивных элементов, а степень «правильности» зафиксирована в «комплекте средств разработчика» (PDK). Хотя Крылов также упоминает внешнее воздействие (через изменение), но идет другим путем [5, с. 84]: «Свойство объекта (элемента или конструкции) называется функциональным, если оно позволяет изменять состояние другого объекта, с которым взаимодействует данное свойство данного объекта, при физическом сближении или соединении этих объектов». На наш взгляд, корректнее говорить о связывании, вводя абстракцию «связь», поскольку сложно представить физическое сближение для информационных объектов. Далее автор разбирает пример вентиля «2И-НЕ», где два его входа называются входными свойствами, а его выход, т.е. выходное свойство, становится функциональным только тогда, когда связан с другим вентилем. Однако функциональность все-таки есть и в отсутствии связи, будучи задана таблицей истинности и ее «правильностью». Затем обсуждается на языке функциональности работа четырехкомпонентного триггера [5, с. 90]. В качестве более сложного примера Крылов вводит так называемый «слабоструктурированный гетерогенный самосинхронный автомат

с индивидуальными именами объектов», причем в контексте вычислений с помощью химических реакций (достаточно хороший пример, на наш взгляд, здесь дает кинетическая машина Кирдина). Крылов обращается к другой реализации сети – булевому автомату Кауффмана.

Завершают главу несколько утверждений об эмерджентных свойствах. Если в ОТТ общесистемное положение об эмерджентности рассматривается только в том смысле, что каждый уровень описания технологии порождает новые, специфические понятия, то Крылов более классически связывает эмерджентность с функциональностью. Читаем на с. 100: «Эмерджентным называется такое свойство объекта x (с непустым значением), которое отсутствовало на предыдущих шагах технологии в тех объектах, из которых был получен объект x ». В качестве примера утверждений укажем: «Утверждение 2.1. Свойство «иметь заданную форму» является эмерджентным (в технологиях с размерностью не менее 2)». Размерность технологии, насколько мы поняли, отождествляется с числом свойств ее финальных конструкций. Для клеточного автомата фон Неймана с 29 состояниями ячейки на языке функциональностей сформулированы два утверждения. «Функциональность» оказывается понятием, аналогичным «методу» в ООП. Последним введенным понятием является «кинематическая эмерджентность».

СОДЕРЖАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ ГЛАВ 3–5

Эти главы посвящены, с одной стороны, развешиванию понятий «функциональность» и «сложность», а с другой стороны – физико-химическим процессам предбиологической и биологической эволюции. Свойство самовоспроизводства является эмерджентным при сравнении с органическими молекулами; такой переход от второй к третьей главе естественен и подчинен логике ОФТ. Однако начинается 3-я глава со странных постулатов для эволюционных технологий: «Существует «пространство» и «время»» [5, с. 111], с отсылкой к бытовому пониманию (если мы правильно поняли Крылова, это понимание соответствует ньютоновскому). Приводимое на с. 102 утверждение 3.3 явно носит физикалистский характер, что снижает его общность, но конкретизирует и фиксирует атомистику Крылова. Квазиатомы Крылова аналогичны атомам химиков, обладают массой и инерцией, а их свойства квантуются (утверждение 3.4), чтобы дать возможность повторения элементов базы; экземпляры элементов могут пополняться из внешнего источника. Возможно, здесь уместны аналогии с трудами Демокрита. Важную роль играют понятия «поля» и

соответственно сил: «Более сложные, нелинейные или немонотонные, или даже знакопеременные варианты функциональной зависимости силы притяжения от расстояния между элементами из-за бесконечно-большого числа элементов и бесконечности самого пространства анализировать чрезвычайно трудно» [5, с. 115].

Физикализм и даже механицизм чувствуется и при появлении закона инерции в утверждении 3.5. Между тем была бы интересной более общая формулировка: «Для того чтобы технология, удовлетворяющая утверждениям 3.3–3.4, могла быть эволюционной, необходимо, чтобы элементы базы обладали свойством сохранять свойства направление движения при отсутствии внешних сил (притяжения и/или отталкивания)» (*вычеркнут текст Крылова, подчеркнут – наш*). Конструируя вид сил, автор поневоле встает на путь методов молекулярной динамики; ради конкретики приведем эффективный, по мнению автора, вид силы взаимодействия между двумя элементами базы:

$$F = \frac{K(d_{ij} - (r_i + r_j))}{d_{ij}^n},$$

где i, j – индексы элементов; $r_{i,j}$ – их радиусы; d_{ij} – расстояние между их центрами; n – степень взаимодействия; K – константа. Для обоснования автор ссылается на собственные компьютерные эксперименты, показывающие наличие стабильных конструкций при $n = 3$ (что соответствует физике нашего мира), но дает лишь один литературный источник 1997 года. Отмечается, что введение вязкости среды и разнополярности элементов, т.е. свойства «заряд», позволяет получить более интересные результаты. На наш взгляд, книга бы только выиграла, если бы автор включил более детальное описание помимо иллюстраций с комкующимися шариками (рис. 3). На с. 121 резюмируется: «Например, шарики-клетки можно снабдить набором состояний и функциональностей, аналогичных состояниям и функциональностям клеточных самовоспроизводящихся автоматов фон Неймана. В итоге получается структура, в которой возможно возникновение самовоспроизведения конструкций. Таким образом, мы впервые подошли к первой формально-технологической модели «вселенной», в которой теоретически реализуемы эволюционные (точнее – подобные им) технологии и процессы».

На возможность появления самовоспроизводящихся конфигураций, как в машине фон Неймана, автор смотрит скептически: «Малейшая неоднородность в среде, окружающей автомат, может привести к сбою в процессе самовоспроизведения и он

прекратится» (с. 122); это фиксируется в утверждении 3.6. Однако, снабдив квазиатомы новым свойством «число электронов», что ведет к аналогу ковалентной связи, Крылову удалось получить устойчивые конфигурации, сохраняющие структуру при различных соударениях.

Глава 4 начинается с обсуждения понятия энтропии. Мы склонны согласиться со следующим замечанием (с. 125, курсив наш): «... (*обычный подход*) рассматривает любую систему как уже заданную, существующую в природе независимо от того, на самом ли деле это так или же *она создается конструктивным путем* из некоторых исходных компонентов. Отсюда – парадокс: пока не известны вероятности появления тех или иных состояний системы (т.е. различных ее «конфигураций» в самом широком смысле этого термина) – ничего нельзя сказать ни о величине ее энтропии, ни о характере ее возможных изменений при тех или иных трансформациях (преобразованиях) системы». Указывается на избыточность формулы Шеннона для количества информации в сообщении и большую простоту, выбранную Природой в генетическом коде (64 кодона на 20 аминокислот) и используемую проектировщиками информационных систем.

Вводится функциональная сложность как всевозможное число состояний системы. Конструктивная сложность, или конструктивная функциональность, вводится вначале для линейных конструкций, понимаемых через отношения «слева-справа». На с. 131 указывается, что в итоге минимальное число функциональных состояний, обеспечивающих «трехмерную» конструкционную полноту линейных конструкций (аналог – кривая в трехмерном пространстве), оказывается равным пяти. Далее выделяется один из базовых объектов и называется автоматом (в ОТТ это процессор ТО): «По такой схеме легко определить требуемое минимальное число состояний самого автомата синтеза. Оказалось, что оно невелико и равно 12. То есть (молекулярный) автомат..., способный синтезировать линейные конструкции, может иметь всего 12 функциональных состояний». Как и для любого объекта-конструкции, вводится функциональность автомата. Крылов обращает внимание на роль энергетического фактора, который, по его мнению, оказался недооцененным в работах Лэнгтона по искусственной жизни. Схема рис. 3 напоминает схему синтеза белка в рибосомах из какого-нибудь учебника биологии. Заметим, что Природа действительно избрала линейные конструкции, т.е. молекулы РНК или первичные последовательности белков, а вот в человеческой технике сочленения деталей более многообразны, не говоря уже о способах ассоциации/коннекта в ментальных конструкциях.

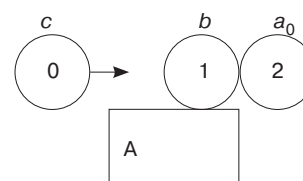


Рис. 3. Фрагмент схемы работы автомата А случайного синтеза, подобного синтезу линейного биополимера. Кругами показаны мономеры, цифры в кругах – значения состояний мономеров

На с. 135 перечисляются 4 типа функциональностей: динамическая (как возможность перемещения в пространстве), конструкционная (как возможность сочленений), логическая (как возможность управления сборкой через автомат), энергетическая (введена автором туманно). 1-й и 4-й типы тесно связаны друг с другом. Дополнение базы за счет «автоматов – катализаторов распада» делает технологию более продуктивной. Крылов опять приводит результаты компьютерного моделирования, но не дает ссылки на первоисточник. После апелляции к колмогоровской сложности обосновывается (с. 145) действительно принципиальная *теорема о фиксированной точке самовоспроизведения*:

«Среди линейных технологий с числом функциональных состояний, приходящихся на один элемент базы, большим единицы, существуют технологии, в которых функциональная сложность конструкций с увеличением длины постоянно растет, тогда как функциональная сложность процесса (автомата) их синтеза остается величиной постоянной. Поэтому обязательно найдутся такие конструкции (или их совокупности), функциональная сложность которых окажется равной или даже больше функциональной сложности процедуры (автомата) их синтеза, и, следовательно, обязательно найдутся конструкции, которые могут воспроизводить самих себя».

В нашем варианте ОТТ мы постулировали и даже дали нестрогое обоснование утверждению о том, что сложность изделия не превышает сложности его маршрута (обобщая, технологического процесса) изготовления. Этим мы подтверждаем косвенно, что количество технологических альтернатив и вариаций [1, с. 115] может быть очень большим в противовес конечному количеству вариантов конструкции. Таким образом, оба утверждения впадают в интуитивное противоречие, хотя и выражены в разных терминах. Не будем пытаться решить это противоречие здесь, а просто зафиксируем его; для обсуждения всех нюансов соотношения «технэ», «сложности ТМ», скрытой информации в рецептах ТО понадобилась бы не одна статья. Возникновение же подобных противоречий в разных вариантах ОТТ, на наш взгляд, плодотворно и несет отпечаток диалектики.

В конце главы 4 приведены более сложные конструкции автоматов, обогащенные возможностью комплементарности (с целью «схватить» синтез ДНК). Возможность их совместной работы близка к идее гиперцикла Манфреда Эйгена, и мы можем усмотреть ее черты и в нашей ОТТ: во-первых, в тезисе двойственности [1, с. 107], и во-вторых, в происхождении закона Мура и научно-технического прогресса [1, с. 362, 373]. По нашему мнению, идея поиска путей самовоспроизведения, несмотря на свою привлекательность, оказала в чем-то вредное влияние на развитие науки, только отвлекая интеллектуальные силы от более достижимых практических целей. Автор попал под очарование этой идеи и продолжил в пятой главе попытки «атаки на самовоспроизведение», введя понятие частично самовоспроизводящейся биоподобной системы (ЧСБС) и два принципа дарвиновских систем (мутации и отбор). На русский язык в 1970-е гг. были переведены три работы Эйгена [13], по-видимому, прошедшие мимо автора, иначе хотя бы одна была бы отмечена в списке литературы. Если Эйген использовал аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений и нелинейной динамики, то Крылов – яркий представителем конструктивно-алгоритмического подхода. На с. 173 указаны структурно-функциональные черты ЧСБС, носящей пространственно распределенный характер, т.е. по сути являющейся коннекционистской; наличие управляющих сигналов активации и торможения также усиливает эту аналогию [14] (см. принципы Руммельхарта).

ЗАМЕЧАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОБСУЖДЕНИЕ ГЛАВ 6–8

Шестая глава начинается с полуопределения: «Технологии будущего – это, прежде всего, технологии, интегрированные в многоцелевые (в идеале предельно многофункциональные, т.е. универсальные) автоматически действующие системы, способные решать огромное число задач без участия человека. Прообразами таких систем можно считать полностью автоматизированные гибкие производства (ГАП) и – как ни странно, – компьютеры» (с. 178). В отношении микроэлектроники, например, мы видим, как промышленная технология трансформируется в «высокую» [1, с. 262], с чем связан переход к т.н. «Индустрии 4.0». Затем автор декларирует: «На основе формально-технологического анализа мы попытаемся разработать некую новую базовую модель предельно-многофункционального (универсального) программно-управляемого устройства для выполнения любых технологических операций из заданного множества операций F некоей технологии над любыми объектами из объединенного

множества $A \cup B$ элементов базы и конструкций этой же технологии». И тогда возникает проблема уточнения «универсальной технологической системы», причем для ее решения Крылов неформально использует абстракцию машины Тьюринга. И рождается следующее определение: «Естественно понимать универсальность системы в любой технологии $T = \langle A \cup B, F \rangle$ как возможность реализации в ней любой последовательности любых операций из F над любыми разрешенными для данных операций элементами и конструкциями из $A \cup B$, в том числе – с учетом всех возможных результатов операций анализа из F , которые могут изменять дальнейшие последовательности операций». С точки зрения уровня ТО операции анализа есть контрольно-измерительные, и здесь позиции ОФТ и ОТТ совпадают, но далее возникает различие: для Крылова это, прежде всего, возможность управления (проверка условий перехода if ... else), а в ОТТ – элемент технэ на уровне производственного процесса. Неким практическим компромиссом здесь является элиминация бракованного полуфабриката из дальнейшего технологического процесса.

Далее на с. 181 вводится, аналогично рекурсивной функции в теории алгоритмов, понятие «рекурсивная схема». Несколько наивно вводятся «ячейки хранения», т.е. автор пытается перейти к и выйти за пределы некой модели вычисления [5, с. 183]: «При этом предполагается, что все такие (конструкции – *авт.*) – достаточно однородные (т.е. гомогенные) объекты, которые могут храниться в однотипных ячейках хранения и перемещаться однотипными транспортными магистралями». Для условий реального производства предположение однородности весьма шаткое. Следует сказать, что «модель вычислений» является актуальным [15] и требующим отдельного анализа понятием теории вычислимости. Крылов здесь вплетает материально-технологические мотивы. Само понятие «ячейка хранения» выступает обобщением ячейки памяти в компьютерной науке; обсуждается различие доступа по адресу и доступа по указателю в схеме ГАП (рис. 6.2 книги). Очень сильно влияют на логику автора представления о сборочном производстве или сборочном «химизме», но для нас микроэлектроника выступает примером иной, не-сборочной технологии. На с. 189 Крылов отмечает: «Для достижения «алгоритмической полноты», – т.е. для создания достаточно мощного информационного базиса в различных технологиях, эквивалентного по своим потенциальным возможностям математике (и, следовательно, обеспечивающего решение в том числе любых задач, связанных с управлением универсальной технологической системой), нужен не такой уж сложный формальный механизм: необходимо

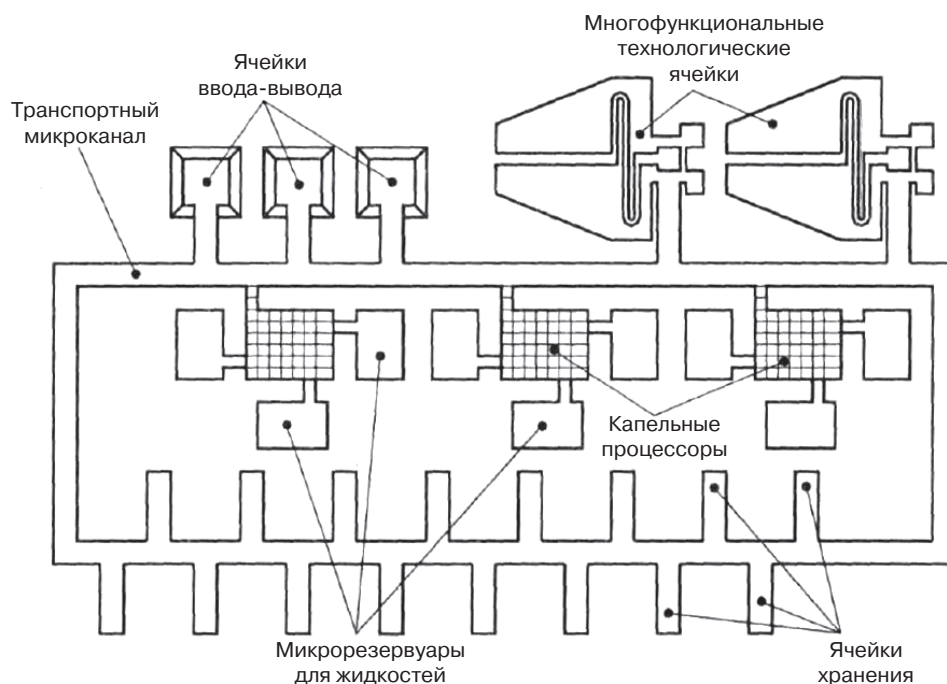


Рис. 4. Пример топологии технологической части гипотетической нанофабрики на кристалле, имеющей рекурсивную структуру и содержащей три устройства ввода-вывода микрообъектов (рис. 6.13 книги)

по крайней мере иметь «что-то», что можно отличить от «ничего», и уметь это «что-то» располагать в нужных местах пространства (в нужных ячейках хранения) в нужной последовательности с тем, чтобы потом эту последовательность можно было вновь обработать».

В заключительной части главы 6 автор переходит к конкретным проектам схем, уходит абстрактность изложения, уступая место научной специализации автора в области проектирования «систем на кристалле», ПЛИС и ПЛМ (программируемые логические интегральные схемы и матрицы). И хотя общая терминология сохраняется, но совершенно забывается, что интегральная схема, прежде всего, преобразует сигнал [1, с. 55], а не что-то атомно-молекулярное. Таким образом, реализуемость ГАП остается под вопросом, хотя для уровня производственного процесса ОТТ идея Крылова выглядит достаточно интересной и, возможно, актуальной с точки зрения технологического потока. Разделение ячеек хранения и технологических ячеек в контексте умного химического синтеза [5, с. 216], как нам кажется, соответствует логике развития фармацевтики и генной инженерии, а идея об управлении указывает на большой потенциал синтеза чипов с биотехнологией. В этой части книга, по нашему мнению, исключительно полезна для разработчиков «лабораторий на кристалле», микросистемной техники (рис. 4) и является превосходным примером нисхождения из абстрактных алгебраических абстракций к реальному производству, пусть пока и биофармацевтическому.

С другой стороны, мы скептически относимся к распространению этих идей на другие технологии.

Также автор справедливо замечает, что технология не всегда порождает линейные объекты (глава 4), и переходит к плоскостным объектам, оценивая сложность их синтеза на с. 225. В чем-то технологические ячейки и синтезирующий автомат (САВТ) Крылова напоминают ячейки клеточного автомата, но имеют более сложную внутреннюю структуру, наследуемую от хранимых объектов; аналогия есть и в результатах синтеза (например, статья [16] С.М. Ачасовой).

Глава 7 посвящена адаптации тезиса Черча для технологических систем. Вопрос формулируется так (с. 235): «Каковы границы эффективной применимости технологии вычислений, работающей с натуральными и рациональными числами (т.е. технологии частично-рекурсивных функций), в сравнении с более сложно устроенными технологиями, работающими с объектами реального физического мира?». Еще раз указывается (с. 240) на подчиненный характер математики: «Математика – это тектология нейтральных комплексов (под комплексом Богданов понимал нечто, весьма близкое к понятию конструкции в ФТ)». Вводятся понятия «частично неизвестная технология» и «порог сложности». Доказательства утверждений, а их в этой главе – 10, выглядят недостаточно строгими.

В главе 8 автору захотелось расширить ОФТ на социальные системы, и на с. 252 указывается на переплетенность свойств личности, которые не всегда

удается развести по осям параметров. Автор, признавая сложность задач, в своих нестрогих рассуждениях опирается на модель реализации кратчайшего эволюционного пути развития, рассмотренной в параграфе 5.1, и критерий сложности многокомпонентного объекта по Колмогорову (в ФТ-интерпретации), рассмотренный в главе 4. Мы не можем обойти изложенные взгляды без комментариев.

Совершенно справедливо в «Неокибернетике» отмечается, что «основным («базовым») компонентом различных социальных, производственных и других групп людей является человек (индивидуум)». Если естественные и социальные науки познают природу и социум, то технологии создают человеческое окружение. Согласно П.К. Энгельмейеру [17], «... техника – часть социальной истории человечества, неразрывно связанная с природой. Благодаря технике человек преобразует окружающую среду, приспособляя ее к своим потребностям». Производственная или социальная технология не может развиваться самостоятельно, без человеческой деятельности. Технология (пока что, по крайней мере) не безлюдна, она составляет законченное целое только «дополненная человечеством», и именно здесь таится существеннейшая, может быть, разница, ибо биоэволюция является, вне всякого сомнения, процессом неморальным, чего нельзя сказать об эволюции технологической. Технология не является отдельным элементом процесса. Она реализуется кем-то или чем-то. Это является обязательным условием ее существования. Без этого она мертва.

Очень субъективны рассуждения о влиянии климата на развитие социальных структур и, особенно, развитие технологий, в том числе, и в настоящее время. С другой стороны, согласно классике диалектики: «если человек наукой и творческим гением подчинил себе силы природы, то они ему мстят, подчиняя его самого, поскольку он пользуется ими, настоящему деспотизму, независимо от какой-либо социальной организации» [18]. Автор пишет на с. 258: «Самым важным «внутренним» мутагенным фактором, определяющим возможную скорость эволюционного развития данного социума, является «степень разрешенных свободных действий отдельных социальных подсистем». Проще говоря – степень «внутренней свободы» данного социума. Если уровень этой свободы низок, то есть система достаточно жестко организована («тоталитарна», например), то, очевидно, скорость эволюции такой системы будет минимальной и она неизбежно отстанет в своем развитии от своих более «внутренне свободных» соседей. Это, в свою очередь, приведет к потере эффективности и проигрышу в конкурентной борьбе». Эти выводы ничем не подкреплены. В

противоположность этому нужным было бы отметить технологические прорывы в тридцатые годы прошлого века в Германии, в СССР. Эти страны относят к тоталитарным режимам. А темпы технологического развития сегодня в КНР? Мы можем сослаться и на представление о Мегамашине, предложенное Л. Мамфордом.

Автор находит различие между технократической организацией и демократической: «В первом случае ограничения вырабатываются правящей верхушкой, а во втором – активностью социальных групп, заинтересованных в них граждан». США является технократическим обществом, несмотря на развитую демократию. Таким же путем идет и демократическая Франция [19]. Если только... демократия по форме не перестает быть демократией по содержанию.

На с. 262 утверждается: «Трагическая ошибка основоположников марксизма заключалась в том, что они приняли самый неудачный исход развития социальных систем за норму, за «движущую силу истории», хотя бы существовавшие тогда социальные системы и заслуживали свою участь», и далее на с. 263: «... поэтому вряд ли имеет смысл отказывать природе в ее «разумности». Просто это разум иного плана, иной организации и иного предназначения, чем наш собственный разум, являющийся, к тому же, продуктом деятельности первого». Далее Крылов продолжает идеи Вернадского о ноосфере: «Все типы разумов способны решать (творчески! – т.е. с созданием новых «изобретений») различные, в том числе неожиданно возникающие перед ними, задачи. Если, конечно, эти задачи принципиально решаемы в рамках тех ресурсов и технологий, которые доступны этим разумам на текущем этапе развития».

В контексте четвертой индустриальной революции марксистский взгляд на движущую силу истории, а это, прежде всего, развитие технологий, приобретает еще большую актуальность, но вместе с тем не следует забывать и предупреждение Энгельса [20]: «Не будем, однако, слишком обольщаться нашими победами над природой. За каждую такую победу она нам мстит. Каждая из этих побед имеет, правда, в первую очередь, те последствия, на которые мы рассчитывали, но, во вторую и третью очередь, совсем другие, непредвиденные последствия, которые очень часто уничтожают значение первых». Хочется продолжить мысли Крылова о красоте и об общественном разуме [5, с. 264–265] и сказать идеологам революций (Клаус Шваб), что мир сложнее, чем они думают, и его самоорганизации нужно доверять. Видимо поэтому автор и допустил критическое замечание в сторону марксизма, хотя споры о том, в чем состоит истинный марксизм, продолжаются до сих пор [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Надеемся, что в сжатой форме реферата мы смогли побудить читателя к непосредственному знакомству с книгами С.М. Крылова. Следует отметить, что монография [6] находится в открытом доступе. Если сравнивать обе теории (впрочем, до статуса настоящей «теории» им еще далеко, скорее это пока эскизы), ОТТ и ОФТ, то первая – более общая по объектам рассмотрения и может включать ОФТ на трех уровнях из шести: технологической операции, технологического маршрута и технологического процесса. В вопросах меры сложности и энтропии ОФТ ушла дальше, демонстрируя интересный подход, инспирированный алгоритмикой и процессами атомной сборки молекулярных «живых» структур, но все-таки очень многие вопросы остались далеки от разрешения. В своей книге [1] мы не прошли мимо работ Крылова, однако уделили им меньшее внимание, чем они того заслуживают.

Тем не менее, книга может побудить к формированию фундаментального взгляда на естествознание от арифметики до квантовой физики в противовес тем информационным «пилюлям», которые нередко применяются в обучении в целях «улучшения» образования. Эти «улучшения», дающие, на первый взгляд, немедленный успех, и способствующие технологическому «изготовлению» годных (а кто так смел, что определяет критерии годности?) для общества структур личности, приводят, в конечном итоге,

к уничтожению того обучения, которое пробуждает страсть к соревнованию, преодолению препятствий.

Немедленные успехи, даваемые подобными «улучшениями», заслоняют последующий вред, которым они оплачиваются. Чем богаче общество, тем более явно вступает оно на этот путь. Кто знает, не начнут ли когда-нибудь вводить в жизнь «синтетические затруднения» для того, чтобы они вернули ценность достижению целей, которое чрезмерно облегчено?

На наш взгляд, чрезмерная регламентация государством целей и содержания образования есть процесс неизбежный, особенно при переходе технологии в промышленную стадию [1] своего развития. В то же время это негативный процесс, снижающий многообразие личностей, структуры которых формируются через образование и воспитание. Как раз в книге Крылова даны общие формально алгебраические принципы формирования, в том числе, ментально-психологических конструкторов. Устранение возможности самоорганизации, проявления свободы человека и хаоса, присущего, хотя в небольшой степени, природе, в конечном итоге уменьшает вариативность путей общественного развития. На аспект хаоса указывают современные философы [22]: «От традиционалистского (детерминистского) общества мы переходим к стохастическому (технологическому) обществу».

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. *Общая теория технологий и микроэлектроника*. М.: ТЕХНОСФЕРА; 2020. 434 с. ISBN 978-5-94836-611-1. URL: <https://www.technosphera.ru/lib/book/656>
2. Крылов С.М. Формально-технологические модели в общей теории систем. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2003;5(1):83–90.
3. Крылов С.М. *Теория и методы разработки многофункциональных программируемых технологических систем на основе формально-технологического анализа*: дис. ... докт. техн. наук. Самара; 2005. 451 с.
4. Крылов С.М. *Формальная технология и эволюция*. Самара: Самарский гос. технический ун-т; 2012. 325 с. ISBN 978-5-7964-1547-4
5. Крылов С.М. *Неокибернетика: алгоритмы, математика эволюции и технологии будущего*. М.: URSS; 2008. 288 с. ISBN 978-5-382-00651-2
6. Крылов С.М. *Метаматематические основы науки будущего: монография*. Самара: Самарский гос. технический ун-т; 2014. 247 с. ISBN 978-5-7964-1686-0
7. Верзилин Д.Н., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Неокибернетика: состояние исследований и перспективы развития. В сб.: «Системный анализ в проектировании и управлении»: сб. научных трудов XXIII Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. СПб.: Политех-Пресс; 2019. С. 81–98.

REFERENCES

1. Krasnikov G.Ya., Gornev E.S., Matyushkin I.V. *Obshchaya teoriya tekhnologii i mikroelektronika (General theory of technology and microelectronics)*. Moscow: TEKhNOSFERA; 2020. 434 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-611-1. Available from URL: <https://www.technosphera.ru/lib/book/656>
2. Krylov S.M. Formally-technological models in the general systems theory. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2003;5(1):83–90 (in Russ.).
3. Krylov S.M. *Theory and methods of development of multifunctional programmable technological systems based on formal technological analysis*. Thesis. Samara; 2005. 451 p. (in Russ.).
4. Krylov S.M. *Formal'naya tekhnologiya i evolyutsiya (Formal technology and evolution)*. Samara: SamGTU; 2012. 325 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7964-1547-4
5. Krylov S.M. *Neokibernetika: algoritmy, matematika evolyutsii i tekhnologii budushchego (Neocybernetics: algorithms, mathematics of evolution, and future technologies)*. Moscow: URSS; 2008. 288 p. (in Russ.). ISBN 978-5-382-00651-2
6. Krylov S.M. *Metamatematicheskie osnovy nauki budushchego: monografiya (Metamathematical foundations of the science of the future: monograph)*. Samara: SamGTU; 2014. 247 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7964-1686-0

8. Менделеев Д.И. Технология. В кн.: *Сочинения*. Т. XXI. Экономические работы. Л.-М.: Изд. АН СССР; 1952. С. 333.
9. Богданов А.А. *Тектология: всеобщая организационная наука: в 2-х кн.* Абалкин Л.И. (отв. ред.). М.: Экономика; 1989. Кн. 1. 304 с.
10. Энгельс Ф. Анти-Дюринг. В кн.: Маркс К., Энгельс Ф. *Полное собрание сочинений*. Т. 20. М.: Госполитиздат; 1961. С. 11.
11. Ивлев А.А., Артеменко В.Б. Онтология военных технологий: основы, структура, визуализация и применение. Ч. 1. *Вооружение и Экономика*. 2011;4(16):35–52. <http://www.viek.ru/16/35-52.pdf>
12. Schmidhuber J. *Algorithmic Theories of Everything*. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0011122>
13. Эйген М., Шустер П. *Гиперцикл. Принципы организации макромолекул*: пер. с англ.; под ред. Волькенштейна М.В., Чернавского Д.С. М.: Мир; 1982. 270 с.
14. Rumelhart D., McClelland J. *Parallel Distributed Processing*. V. 1. Explorations in the Microstructure of Cognition: Foundations. PDP Research Group (Eds.). MIT Press, Cambridge, MA; 1986. ISBN 0-262-63113-X
15. Матюшкин И.В. Коннекционистское расширение минимальной модели вычислений (Часть 1). *Философские проблемы информационных технологий и киберпространства*. 2016;1(11):103–120. <https://doi.org/10.17726/philIT.2016.11.1.004.27>
16. Ачасова С.М. Клеточно-автоматная самовоспроизводящая матрица из искусственных биологических клеток. *Проблемы информатики*. 2016;3(32):13–25.
17. Энгельмейер П.К. Творчество в технике. В кн.: *Философия техники*. Вып. 1. СПб.: Воентех; 2006. С. 150–185.
18. Энгельс Ф. Об авторитете. В кн.: Маркс К., Энгельс Ф. *Полное собрание сочинений*. М.: Госполитиздат; 1961. Т. 18. С. 303.
19. Гэлбрейт Д.К. *Новое индустриальное общество*: пер. с англ. М.: АСТ; 2004. 602 с. ISBN 5-17-024777-X
20. Энгельс Ф. Диалектика природы. В кн.: Маркс К., Энгельс Ф. *Полное собрание сочинений*. М.: Госполитиздат; 1961. Т. 20. С. 495–499.
21. Пензин А., Подорога В., Чухров К. Маркс против марксизма, марксизм против Маркса. *Статус*. 2017;5(2):530–552. <https://doi.org/10.33280/2310-3817-2017-5-2-266-288>
22. Буданов В.Г., Аршинов В.И., Филатова О.Е., Попов Ю.М. Третья парадигма и законы развития социума. *Сложность. Разум. Постнеклассика*. 2020;1:38–45. <https://doi.org/10.12737/2306-174X-2020-37-44>
7. Verzilin D.N., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Neocybernetics: state of research and development prospects. In: “*Sistemnyi analiz v proektirovanii i upravlenii*”: sb. nauchnykh trudov XXIII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. (System analysis in design and management. Collection of scientific papers XXIII Intern. scientific and practical conf.) V. 1. St. Petersburg: Politekh-press; 2019, p. 81–98 (in Russ.).
8. Mendelev D.I. Tekhnologiya. In: *Sochineniya. T. XXI. Ekonomicheskie raboty* (Technology. In: *Writings. V. XXI. Economic works*). Leningrad – Moscow: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR; 1952. P. 333.
9. Bogdanov A.A. *Tektologiya: vseobshchaya organizatsionnaya nauka: v 2-kh kn. (Tectology: general organizational science: in 2 v.)* Moscow: Ekonomika; 1989. V. 1. 304 p. (in Russ.).
10. Engel's F. *Anti-Dyuring*. In: Marks K., Engel's F. *Polnoe sobranie sochinenii* (Engels F. *Anti-Dühring*. In: Marx K., Engels F. *Full composition of writings*). Moscow: Gospolitizdat; 1961. V. 20. P. 11. (in Russ.).
11. Ivlev A.A., Artemenko V.B. Ontology of military technologies: bases, structure, visualisation and application. *Vooruzhenie i Ekonomika = Armament and Economics*. 2011;4(16):35–52 (in Russ.). <http://www.viek.ru/16/35-52.pdf>
12. Schmidhuber J. *Algorithmic Theories of Everything*. <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0011122>
13. Eigen M., Shuster P. *Gipertsikl. Printsipy organizatsii makromolekul (Hypercycle. Principles of the organization of macromolecules)*. Moscow: Mir; 1982. 270 p. (in Russ.).
[Eigen M., Schuster P. *The Hypercycle. A Principles of Natural Self-Organization*. Berlin, Heidelberg, NY: Springer; 1979]
14. Rumelhart D., McClelland J. *Parallel Distributed Processing*. V. 1. Explorations in the Microstructure of Cognition: Foundations. PDP Research Group (Eds.). MIT Press, Cambridge, MA; 1986. ISBN 0-262-63113-X
15. Matyushkin I.V. Connectionist extension of irreducible computation model (Part 1). *Filosofskie problemy informatsionnykh tekhnologii i kiberprostranstva = Philosophical Problems of Information Technology and Cyberspace*. 2016;1(11):103–120 (in Russ.). <https://doi.org/10.17726/philIT.2016.11.1.004.27>
16. Achasova S.M. Cellular automata self-replicating matrix of artificial biological cells. *Problemy informatiki = Problems of Informatics*. 2016;3(32):13–25 (in Russ.).
17. Engel'meier P.K. Tvorchestvo v tekhnike. In: *Filosofiya tekhniki* (Creativity in technology. In: *Philosophy of technology*). St. Petersburg: Voenmekh; 2006. V. 1. P. 150–185. (in Russ.).
18. Engel's F. Ob avtoritete. In: Marks K., Engel's F. *Polnoe sobranie sochinenii* (Engels F. *About authority*. In: Marx K., Engels F. *Full composition of writings*). Moscow: Gospolitizdat; 1961. V. 18. P. 11. (in Russ.).
19. Gelbreit D.K. *Novoe industrial'noe obshchestvo (New industrial society)*. Moscow: AST; 2004. 602 p. (in Russ.). ISBN 5-17-024777-X
[Galbraith J.K. *The New Industrial State*. Princeton University Press; 1985. 520 p.]

20. Engel's F. Dialektika prirody. In: Marks K., Engel's F. *Polnoe sobranie sochinenii*. (Engels F. Dialectics of nature. In: Marx K., Engels F. *Full composition of writings*). Moscow: Gospolitizdat; 1961. V. 20. P. 495–499. (in Russ.).
21. Penzin A., Podoroga V., Chukhrov K. Marx against Marxism, Marxism against Marx. *Stasis*. 2017;5(2):530–552 (in Russ.). <https://doi.org/10.33280/2310-3817-2017-5-2-266-288>
22. Budanov V.G., Arshinov V.I., Filatova O.E., Popov Yu.M. Third paradigm and laws of development of societies. *Slozhnost'. Razum. Postneklassika = Complexity. Mind. Postnonclassic*. 2020;1:38–45 (in Russ.). <https://doi.org/10.12737/2306-174X-2020-37-44>

Об авторах

Горнев Евгений Сергеевич, д.т.н., профессор, член-корр. РАН, заместитель руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям АО «НИИ молекулярной электроники» (124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1). E-mail: egornev@niime.ru.

Матюшкин Игорь Валерьевич, к.ф.-м.н., доцент, с.н.с., лаборатория нейроморфных систем АО «НИИ молекулярной электроники» (124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1); доцент, кафедра проектирования и конструирования интегральных схем НИУ «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1). E-mail: imatyushkin@niime.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2988-8803>

About the authors

Evgeny S. Gornev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the RAS, Deputy Head of the Priority Technological Direction for Electronic Technologies, JSC Molecular Electronics Research Institute (6/1, ul. Akademika Valieva, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia). E-mail: egornev@niime.ru.

Igor V. Matyushkin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Senior Researcher, Laboratory of Neuromorphic Systems, JSC Molecular Electronics Research Institute (6/1, ul. Akademika Valieva, Zelenograd, Moscow, 124460 Russia); Associate Professor, Department of Design and Development of Integrated Circuits, National Research University of Electronic Technology (1, pl. Shokina, Zelenograd, Moscow, 124498 Russia). E-mail: imatyushkin@niime.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2988-8803>

Отпечатано в «МИРЭА – Российский технологический
университет».
119454, РФ, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78.
Подписано в печать 30.11.2021 г.
Формат 60 × 90/8. Печать цифровая.
Уч.-изд. листов 11.0.
Тираж 100 экз. Заказ № 905.

Printed in MIREA – Russian Technological University.
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russian
Federation.
Signed to print November 30, 2021.
Format 60 × 90/8. Digital print.
C.p.l. 11.0.
100 copies. Order no. 905.

