

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**



*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*

Мировоззренческие основы технологии и общества





Э Л Е К Т Р О Н Н О Е С Е Т Е В О Е И З Д А Н И Е

РОССИЙСКИЙ технологический журнал

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**

- 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
 - 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
 - Philosophical Foundations of Technology and Society

**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2021, том 9, № 2**

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2021, Vol. 9, No. 2**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2>

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



Электронное сетевое издание
Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2021, том 9, № 2

Дата опубликования 31 марта 2021 г.

Научно-технический рецензируемый журнал освещает вопросы комплексного развития радиотехнических, 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 года издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026).

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. Кардановская
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 Эл № ФС 77-74578
от 14.12.2018 г. выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор).

Electronic network journal
Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2021, Vol. 9, No. 2

Publication date March 31, 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 name was «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026).

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

Registration Certificate Эл № ФС 77-74578,
issued in December 14, 2018 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	Habilitated 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

- Басок Б.М., Френкель С.Л.*
7 Некоторые формализованные подходы
к оценке удобства интерфейса пользователя веб-приложений
- Чистяков И.А., Гришов И.В., Никулин А.А., Пихлецкий М.В., Гарцеев И.Б.*
22 Пешеходная навигация: чем инерциальные модули могут помочь смартфонам?

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

- Куликов Г.В., Лелюх А.А., Баталов Е.В.*
35 Влияние погрешностей фазовой и тактовой синхронизации
на помехоустойчивость когерентного приема сигналов
с квадратурной амплитудной модуляцией
- Лышов С.М., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Фам Лэ Куок Хань*
44 Контроль технического состояния конструкций электронных средств
- Харалгин С.В., Войтович М.И.*
57 Исследование диэлектрических характеристик материалов,
изготавливаемых с применением аддитивных технологий

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния

- Бабенко В.П., Битюков В.К.*
66 Топология безындуктивных DC/DC преобразователей
с гальваническим разделением цепей

Аналитическое приборостроение и технологии

- Кулагин В.П., Акимов Д.А., Павельев С.А., Гурьянова Е.О.*
78 Идентификация темпоральных аномалий спектрограмм
сигналов виброизмерений ротора турбогенератора
с применением рекуррентного нейросетевого автоэнкодера

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств

- Мандыч И.А., Быкова А.В.*
88 Трудности и перспективы развития высокотехнологичных проектов
в эпоху цифровой трансформации экономики

Математическое моделирование

- Тукмаков Д.А., Тукмакова Н.А.*
96 Численное исследование влияния коагуляции капель
на динамику двухфракционного аэрозоля в акустическом резонаторе

Contents

Information systems. Computer sciences. Issues of information security

- Basok B.M., Frenkel S.L.*
7 Formalized approaches to assessing the usability of the user interface of web applications
- Chistyakov I.A., Grishov I.V., Nikulin A.A., Pikhletsy M.V., Gartseev I.B.*
22 Pedestrian navigation: how can inertial measurement units assist smartphones?

Modern radio engineering and telecommunication systems

- Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Batalov E.V.*
35 Influence of phase and clock synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation
- Lyshov S.M., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Han Ph.L.Q.*
44 Method of vibration diagnostics of the technical condition of electronic equipment structures
- Kharalgin S.V., Voytovich M.I.*
57 Investigation of the dielectric characteristics of materials manufactured using additive technologies

Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

- Babenko V.P., Bityukov V.K.*
66 Topology of non-inductive DC/DC converters with galvanic isolated circuits

Analytical instrumentation and technology

- Kulagin V.P., Akimov D.A., Pavelyev S.A., Guryanova E.O.*
78 Identification of temporal anomalies of spectrograms of vibration measurements of a turbine generator rotor using a recurrent neural network autoencoder

Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries

- Mandych I.A., Bykova A.V.*
88 Difficulties and prospects for the development of high-tech projects in the epoch of digital transformation of economy

Mathematic modeling

- Tukmakov D.A., Tukmakova N.A.*
96 Numerical study of the effect of droplet coagulation on the dynamics of a two-fraction aerosol in an acoustic resonator

УДК 004.415.53(075)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-7-21>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Некоторые формализованные подходы к оценке удобства интерфейса пользователя веб-приложений

**Б.М. Басок^{1,®},
С.Л. Френкель²**¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия² Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, 119333 Россия® Автор для переписки, e-mail: basok@mirea.ru

Резюме. Предлагается подход, основанный на применении математических методов моделирования поведения проектируемого веб-приложения и поведения пользователя. Данный подход позволяет оценить удобство применения приложения. Рассматриваются модели интерфейсов пользователей (ИП), применяемые для оценки удобства навигации по сайту. Показывается возможность использования двух классов моделей ИП: структурно-логических (онтологических) и вероятностных. Модели первого класса используются для оценки степени понятности предлагаемой ИП навигации по поисковому веб-ресурсу в принятых терминах. Для этого используются математически-определенные меры сходства между элементами ИП и их связями и элементами гипотетической (но правдоподобной) модели представлений пользователя об области поиска в заданной предметной области. В частности, в работе обосновывается возможность использования в качестве таких мер сходства лексикографических метрик расстояния Жаккара и Левенштейна. Вероятностные модели основаны на цепях Маркова. С помощью данных моделей при наличии надежных статистических данных, собранных при опытной эксплуатации веб-приложения или его прототипа, предлагается оценить среднее число шагов пользователя, необходимое для решения конкретной задачи поиска информации об объекте предметной области. В работе приводятся некоторые рекомендации по использованию мер подобия для улучшения удобства использования ИП веб-приложений. Кроме того, приводятся данные о технике оценки вероятностей переходов цепей Маркова и семантических связей. Для пояснения особенностей предлагаемых в статье моделей анализа ИП приводится сайт Приемной комиссии РТУ МИРЭА (<https://priem.mirea.ru/>) с довольно простой организацией, обеспечивающей поиск информации о поступлении и обучении в Университете. Применение описанного в статье подхода наряду с традиционными методами тестирования удобства использования ИП позволит повысить общий уровень юзабилити приложений и тем самым сократить затраты на выявление и исправление связанных с этим ошибок.

Ключевые слова: веб-приложение, юзабилити-тестирование, онтология, цепи Маркова

• Поступила: 24.08.2020 • Доработана: 09.09.2020 • Принята к опубликованию: 10.10.2020

Для цитирования: Басок Б.М., Френкель С.Л. Некоторые формализованные подходы к оценке удобства интерфейса пользователя веб-приложений. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):7–21. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-7-21>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Formalized approaches to assessing the usability of the user interface of web applications

**Boris M. Basok^{1,®},
Sergey L. Frenkel²**

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Federal Research Center Computer Science and Control, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

® Corresponding author, e-mail: basok@mirea.ru

Abstract. The paper proposes an approach based on the use of mathematical methods for modeling the behavior of the designed web application and user behavior. This approach allows an evaluation of the usability of this application. The paper discusses the models of user interfaces (UI), which are used to assess the convenience of site navigation. The possibility of using two classes of UI models is shown – structural-logical (ontological) and probabilistic. Models of the first class are used to assess the degree of comprehensibility of the proposed UI navigation on the search web resource in the accepted terms. For this, mathematically defined measures of similarity between the elements of the UI and their relationships and the elements of a hypothetical (but plausible) model of the user's perception of the search area in a given subject area are used. In particular, the paper substantiates the possibility of using Jaccard and Levenshtein lexicographic distance metrics as such measures of similarity. Probabilistic models are based on Markov chains. With the help of these models, in the presence of reliable statistical data collected during the trial operation of a web application or its prototype, it is proposed to estimate the average number of user steps required to solve a specific problem of finding information about a subject area object. The paper provides some recommendations on the use of similarity measures to improve the usability of the UI of web applications. In addition, data on the technique for estimating the probabilities of transitions of Markov chains and semantic connections are presented. To clarify the features of the UI analysis models proposed in the article, the website of the RTU MIREA Admission Committee (<https://priem.mirea.ru>) is provided with a fairly simple organization that provides a search for information about admission and training at the University. The application of the approach described in the paper, along with traditional methods of testing the usability of UI, will increase the overall level of usability of applications, and thereby reduce the cost of identifying and correcting related errors.

Keywords: web application, usability testing, ontology, Markov chains

• Submitted: 24.08.2020 • Revised: 09.09.2020 • Accepted: 10.10.2020

For citation: Basok B.M., Frenkel S.L. Formalized approaches to assessing the usability of the user interface of web applications. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):7–21 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-7-21>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей характеристикой программных систем, в том числе веб-приложений, является удобство их использования (юзабилити). В первую очередь, юзабилити программных систем определяется удобством использования их графического интерфейса пользователя (ИП). ИП считается удобным в том случае, когда для выполнения необходимых действий пользователю требуются достаточно малые

затраты времени для чтения, изучения и анализа контента данного интерфейса. В [1] рассматривалась задача оценки юзабилити ИП веб-приложений, находящихся в опытной или промышленной эксплуатации. Однако полученные экспериментальные данные показали, что, несмотря на тестирование юзабилити ИП на этапах проектирования и разработки, некоторые ошибки проектирования, осложняющие удобство использования веб-приложения, тем не менее, остаются. Цена обнаружения и ликвидации данных

ошибок при эксплуатации указанных веб-приложений при этом существенно возрастает, как минимум на один-два порядка.

Таким образом, для обеспечения высокого уровня юзабилити веб-приложений необходимо существенно повысить качество оценки удобства ИП на ранних этапах жизненного цикла программного обеспечения. В данной работе рассматривается подход, основывающийся на применении математических методов моделирования поведения проектируемой системы и поведения пользователя, позволяющих прогнозировать уровень юзабилити программного обеспечения. Применение данного подхода, наряду с традиционными методами тестирования удобства использования ИП, позволит повысить общий уровень юзабилити приложений, и тем самым сократить затраты на выявление и исправление связанных с этим ошибок.

В статье показывается возможность использования двух классов моделей ИП: структурно-логических (онтологических) и вероятностных. Модели первого класса используются для оценки степени понятности предлагаемой ИП навигации по поисковому веб-ресурсу в принятых терминах. Для этого используются математически-определенные меры сходства между элементами и их связями ИП и элементами гипотетической (но правдоподобной) модели представлений пользователя об области поиска в заданной предметной области. Другой класс рассматриваемых моделей – цепи Маркова, моделирующие переходы пользователя между элементами ИП при осуществлении навигации с помощью данного интерфейса. С их помощью при наличии надежных статистических данных, собранных при опытной эксплуатации веб-приложения, можно оценить среднее число шагов пользователя, необходимых для решения конкретной задачи поиска интересующей информации об объекте предметной области, обслуживаемой данной информационно-поисковой системой. Мы рассматриваем эти аспекты на примере анализа ИП сайта Приемной комиссии РТУ МИРЭА¹ с довольно простой организацией, обеспечивающего поиск информации о поступлении и обучении в Университете. В работе показано, что использование предлагаемого анализа позволяет несколько упростить пользователю поиск необходимой информации на примере этого сайта.

1. АНАЛИЗ ЗАДАЧ ЮЗАБИЛИТИ ИП В СОВРЕМЕННЫХ ИТ-СИСТЕМАХ

Независимо от вида и назначения программного обеспечения (ПО), причины возникновения проблем с удобством использования ИП кроются в разрыве

между местом и доступом к нужной информации и ожиданиям пользователей (в частности, посетителей сайтов). Эти недостатки в дизайне ИП приводят к тому, что пользователи либо не могут найти нужную информацию, либо тратят чрезмерное время на ее нахождение [2]. Поэтому разработчики должны создавать ИП, интуитивно понятные для конечных пользователей, чтобы они могли точно понимать ссылочное значение элементов интерфейса и выполнять намеченные задачи правильно, легко понимая его референтное значение [2], т.е. указание, куда ведет ссылка.

Степень «неудобства» ИП будем характеризовать трудоемкостью поиска необходимой информации с применением соответствующих виртуальных элементов ИП (гиперссылок, кнопок, движков и т.д.) в терминах характеристик тех или иных действий. К указанным характеристикам можно отнести, например, число ссылок, которые должен рассмотреть пользователь до получения результата, среднее число кликов от входа на домашнюю страницу до решения задачи поиска информации или распределение вероятности числа кликов (или определяемого ими времени) до начала решения задачи и т.д.

В нашем определении юзабилити ИП мы не будем фиксировать ту или иную меру трудоемкости, которую можно выбрать, исходя из требований к решаемой задаче (примеры рассматриваются ниже). Ограничимся пока ее неформальным определением как трудоемкости решения задачи поиска информации, выполняемой с помощью данного интерфейса и выражаемой в удобных для пользователя терминах, относящихся к конкретной предметной области.

Коль скоро речь идет о предсказании удобства использования, необходимы те или модели взаимодействия пользователя с ИП. Наиболее изученными и доступными являются марковские модели [2]. Однако их использование зависит от концептуальных моделей ИП, на которые опирается пользователь в своей работе. Это, в свою очередь, зависит от используемых моделей предметной области, для которой разрабатывается данный интерфейс. Это же относится к так называемым «онтологическим» моделям ИП [3].

Поэтому в настоящей статье основное внимание уделяется анализу свойств моделей ИП и предметных областей с точки зрения их приспособленности к оценке и прогнозу влияния качественных свойств данного интерфейса на его юзабилити.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛЬНОГО ПРИМЕРА

Предлагаемый подход к оценке юзабилити ИП веб-приложения продемонстрируем на примере сайта приемной комиссии РТУ МИРЭА, домашняя страница которого представлена на рис. 1.

¹ URL: <https://priem.mirea.ru/>, дата обращения 20.08.2020.
[URL: <https://priem.mirea.ru/>. Accessed August 20, 2020.]

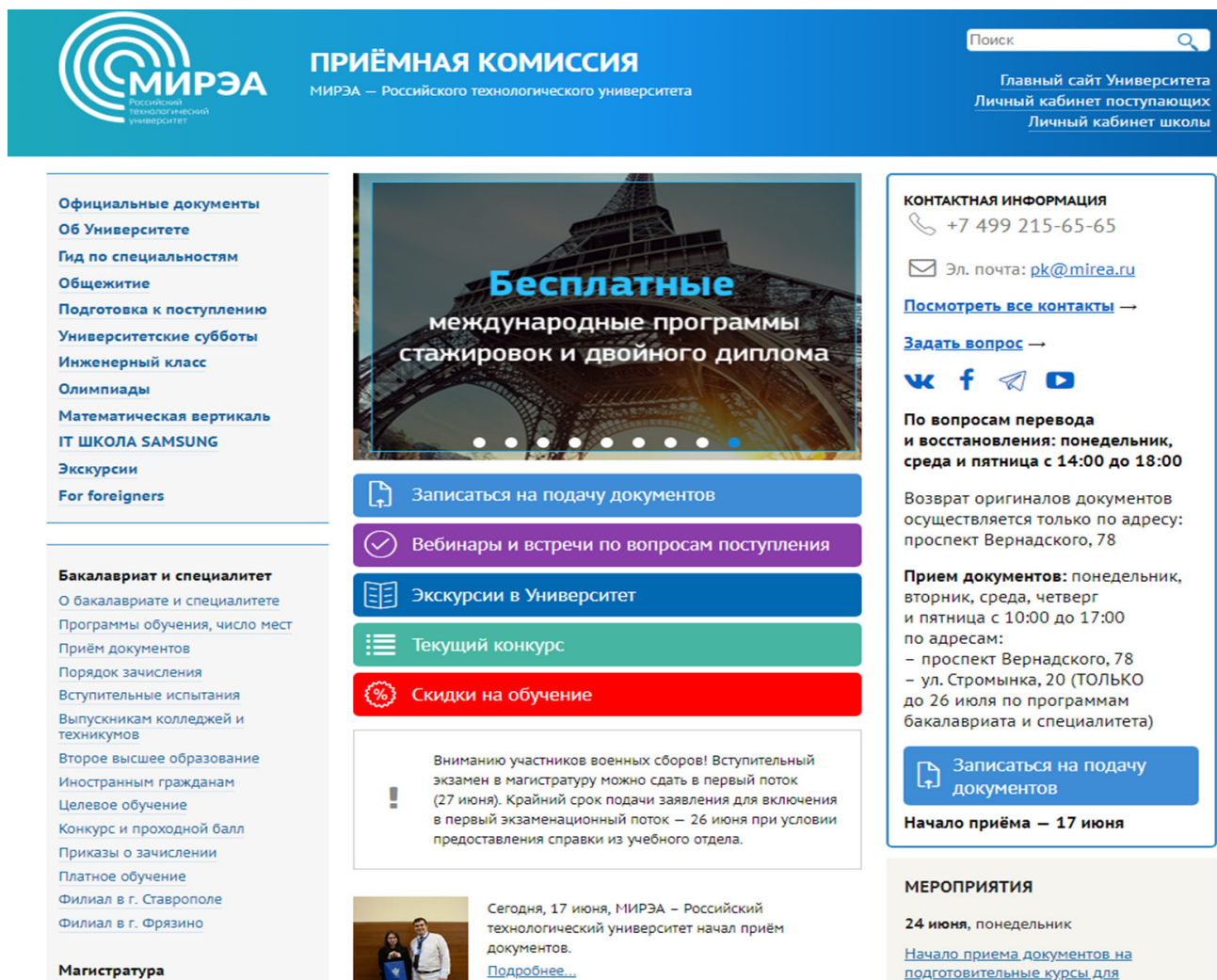


Рис. 1. Домашняя страница сайта «Приемная комиссия МИРЭА – Российского технологического университета»

Навигация по сайту зависит от тех задач, которые ставит перед собой пользователь, и эти задачи понятны из рис. 1, например, поиск условий поступления в Университет в бакалавриат или магистратуру.

Вопрос состоит в том, насколько длителен (трудоемок) путь (например, выраженный в количестве кликов) для того, чтобы добраться до требуемой информации, например, о бакалавриате. С этой точки зрения приемлемый уровень юзабилити ИП может быть получен, если обеспечена последовательная навигация по сайту, т.е. в результате выполнения каждого шага поиска пользователь получает информацию о том, что он может найти, сделав следующие шаги согласно явно представленной навигационной схеме. Соответственно, нам нужна модель поисковой деятельности, связанной с просмотром и пониманием страниц, и модель возможных отклонений из-за недостатков дизайна, определяющего схему навигации по этому сайту.

Модель навигации по сайту предполагает, что посетитель заходит на первую, как правило, домашнюю

страницу или страницу, на которую ссылается внешняя гиперссылка. Далее, пользователь повторяет следующую последовательность действий:

1. Оценивает содержание домашней страницы.
2. Реагирует в соответствии с необходимостью получения дополнительной информации.
3. Ждет загрузки следующей страницы.
4. Читает следующую страницу, пытается найти информацию, которая соответствует цели.

Соответственно, задачу обеспечения юзабилити ИП мы рассматриваем как задачу организации поиска текстовой информации по сайту, посвященному конкретной предметной области.

3. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПОИСКА ПО САЙТУ

В качестве концептуальной модели поиска по сайтам, аналогичным указанному выше примеру, используем модель, идентичную модели представления информации в библиотечных поисковых системах, предполагая, что этот поиск осуществляется

по запросу, имеющему иерархическую структуру с уровнями:

«категория» $\rightarrow$ {«темы»} $\rightarrow$ {«статьи»},

где «категория» наиболее общее понятие рассматриваемой предметной области.

В нашем примере разумно ввести категорию «Уровень образования», к которой относятся темы «Бакалавриат и специалитет», «Магистратура», «Аспирантура», «Среднее профессиональное образование», «Перевод и восстановление». Таким образом, перечисленные заголовки-темы соответствуют всем видам образования, предлагаемым в РТУ МИРЭА.

Можно также выделить категорию «Условия поступления», к которой относятся темы «Наличие мест», «Порядок поступления», «Вступительные испытания», «Целевое обучение», «Иностранцам гражданам», «Статистика прошлых лет», «Приказы о зачислении», «Платное обучение».

Множество {«статьи»} – это гиперссылки, указывающие на часть информации, необходимой пользователю. Например, гиперссылка «Системное программирование и компьютерные технологии» на рассматриваемом сайте указывает на описание направления подготовки бакалавриата 01.03.02 «Прикладная математика и информатика».

В общем случае темы могут представлять собой иерархии с различным числом уровней, и если число уровней больше 1, то вышестоящая тема может рассматриваться для нижестоящих тем как подкатегория рассматриваемой категории. В частности, тема «Бакалавриат и специалитет» может рассматриваться как подкатегория, а связанные с ней темы – как подкатегории нижнего уровня. Например, тема следующего уровня, представленная гиперссылкой «Программы обучения, число мест», и тема «Список направлений обучения (специальностей)», представленная ссылкой <https://priem.mirea.ru/first-degree/list/da>, являются подкатегориями нижнего уровня. Данная иерархия в конечном итоге приводит к статьям, подробно описывающим различные направления подготовки по выбранному профилю. Например, гиперссылка «Математическое моделирование и вычислительная математика» указывает на описание направления подготовки 01.03.02 «Прикладная математика и информатика» по профилю «Математическое моделирование и вычислительная математика».

Стратегия поиска. Поскольку поиск (соответственно, Навигация) по сайту зависит от интересов пользователя, рассматриваем следующую формализованную модель:

Имеется список целей $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, набор целевых категорий $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ и классы

пользователей $\{CU_s\}$, $s = 1, \dots, k$. Среди данных классов можно выделить пользователей, интересующихся средним профессиональным образованием; выпускников средних школ, интересующихся информацией о бакалавриате; студентов, интересующихся информацией о магистратуре и т.д.

Достигнуть цели g_i – значит найти некоторую информацию, называемую «статьей», в которой пользователь может найти сведения, соответствующие этой цели. Отметим, что говоря о цели, мы предполагаем, что посетитель знаком с предметной областью, отражаемой на сайте. Например, будучи выпускником средней школы, он понимает (сам, или с помощью родителей), какую специальность хочет получить, и как с ней связан тот формальный список изучаемых специальностей, который он может найти на сайте.

Если пользователь (абитуриент) строго ориентирован на данный уровень образования, то указанные выше подкатегории, можно рассматривать как категории, например, категорию «Бакалавриат и специалитет», которой соответствуют темы «Специальности», «Проходной балл и конкурс» и т.д.

Поскольку список целей и связанных с ними целевых категорий у каждой группы пользователей разный, разумно рассматривать характеристики юзабилити ИП относительно конкретной цели, которая подразумевает и специфический класс пользователей. Иными словами, будем рассматривать характеристики юзабилити ИП как численные значения $U(g_i, CU_s \in CU)$, g_i – элемент списка целей G , CU – классы пользователей, $s = 1, \dots, |CU|$ (например, «Выпускники средних школ», «Выпускники колледжей», «Бакалавры» и т.д.).

Пусть абитуриенты – выпускники средних школ решают задачу, на какую специальность подать документы, а именно, найти направление бакалавриата с подходящими предметами, проходными баллами и стоимостью обучения. В этом случае возможная навигация по сайту выглядит как граф, представленный на рис. 2. На данном рисунке обрывающиеся стрелки соответствуют просмотру других специальностей, отличных от «Прикладной математики и информатики». Номера в вершинах нужны для экономного обозначения дуг между вершинами E_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, 11$.

Модель процесса достижения пользователем целевой статьи состоит в следующем:

1. Выбор целевой категории: категория, которая соответствует цели, сначала выбирается из категорий, отображаемых на домашней странице.
2. Выбор темы: тема, которая соответствует цели, выбирается из списка тем в выбранной категории. В качестве альтернативы пользователь может вернуться к исходной выбранной категории (подкатегории), если нет очевидного

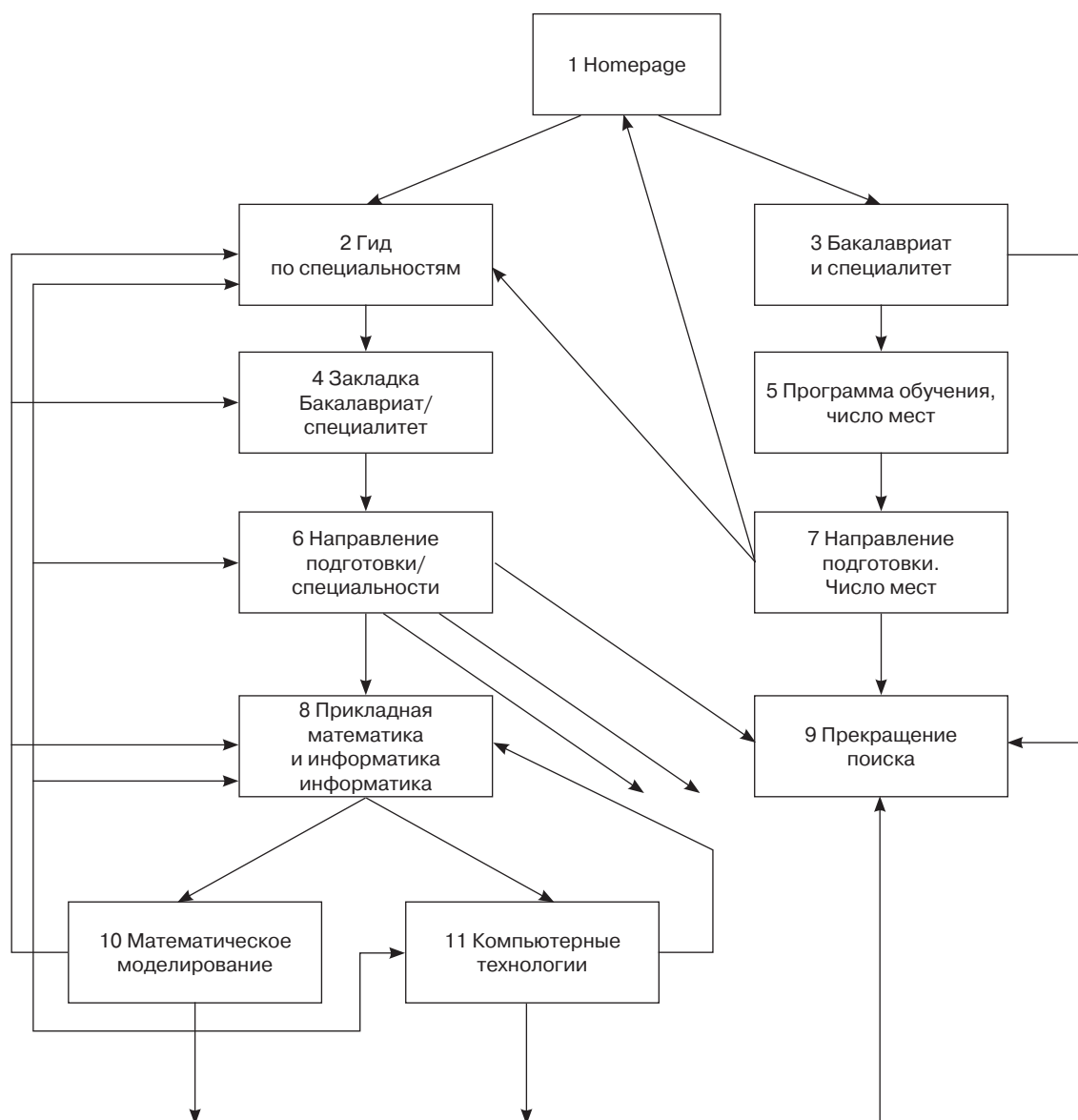


Рис. 2. Навигация по сайту для решения задачи поиска специальностей желающим получить степень бакалавра или специалиста

подходящего маршрута к целевой статье при выборе темы (например, дуги $E_{10,2}$, $E_{11,2}$ на рис. 2).

3. Выбор статьи: выбор темы делает доступным ссылки на статьи, названия которых связаны с этой темой для отображения. Пользователь определяет, есть ли заголовок, который соответствует целевой статье. Пользователь возвращается к выбору темы, если целевой статьи не найдено или он не понял названия статьи.

В указанных терминах проблема обеспечения юзабилити ИП состоит в ответах на вопросы:

- легко ли понять текст описания? (Понятная ли проблематика категорий/тем?);
- насколько сложно выбрать правильную категорию, и будет ли выбрана правильная тема в правильной категории, среди конкурирующих категорий/тем для конкретных целей.

С этой точки зрения основные требования к ИП состоят в следующем: обеспечить семантическую схожесть категорий, тем и статей, так, чтобы у пользователя, знающего предметную область, не возникало трудностей, связанных с несоответствием вышестоящих объектов (например, категорий) и нижестоящих (тем или заголовков статей) в описанной выше иерархической структуре элементов интерфейса. Мерой этого сходства могут быть как известные семантические меры, так и вероятности ошибок, вызванных неверным пониманием пользователем интерфейса, что, в свою очередь, может приводить к необходимости выполнения дополнительных шагов поиска.

Эта задача может быть решена либо структурно-логическими (семантико-онтологическим) методами (SO) [3], либо вероятностными методами с использованием моделей цепей Маркова.

4. МОДЕЛИ АНАЛИЗА СХОДСТВА СИМВОЛЬНЫХ (ТЕКСТОВЫХ) ДАННЫХ В SO

Рассмотрим, как семантическое сходство (similarity, подобие) искомой информации, тем или иным способом понимаемой пользователем, и заголовка гиперссылки, по которой она ищется, сказывается на выборе очередного шага при поиске по сайту сведений в интересующей предметной области. Поскольку этот поиск определяется ИП, то правильное понимание значения элементов данного интерфейса позволяет пользователям переходить непосредственно к интересующему контенту. Например, если на данном шаге поиска в понимании пользователя есть представление о такой сущности, как «Плата за обучение» по данному направлению, то для успешного нахождения этой информации в его сознании должно возникнуть представление о том, что выбранная и нажатая гиперссылка «подобна» данной сущности. В результате нажатия на гиперссылку пользователь получит интересующую его информацию, и переход по этой гиперссылке окажется успешным (в той или иной степени).

Таким образом, существенным аспектом уровня юзабилити ИП является оценка того, насколько гиперссылки на искомую информацию семантически связаны (с точки зрения пользователя) с темами, на которые они указывают.

Для задания мер сходства необходимо иметь модель представления ИП (структуру страниц и ссылок), рассматривая интерфейс как набор некоторых отношений информационных объектов (гиперссылок, заголовков, текстов). Для построения этой модели мы уточним и доопределим схему ИП, поддерживающего навигацию по сайту (рис. 2) как множество терминов, представляющих сущности в интересующей пользователя области.

В нашем рассмотрении область (домен) – это множество сущностей {«Направление подготовки», «Изучаемые предметы», «Профиль специальности», {«Условия поступления», «Условия обучения», «Плата за обучение»}, определяемых набором стандартных, понятных пользователю терминов.

В современной теории и практике информационно-поисковых систем такие модели часто строят с использованием представления знаний *онтологиями* [3]. В современной информатике онтология включает представление, формальное наименование и определение категорий, свойств и отношений между объектами, часто именуемыми *концептами* [3]. Другими словами, онтология является устойчивой языковой конструкцией, дающей традиционное понятное знакомому с предметной областью пользователю выражение соответствующей идеи. Это позволяет

значительно упростить анализ связей между рассматриваемыми сущностями.

Для рассматриваемого сайта это могут быть сущности, представленные такими гиперссылками и текстами, как «Программы обучения, число мест», «Вступительные испытания», которые так или иначе присутствуют в сознании пользователя, пытающегося найти ту или иную информацию по данным вопросам. Иными словами, онтология представляется концептуальной схемой (определенной на множестве концептов), которая состоит из структуры данных, содержащей все объекты данной области интересов пользователя, их связи и правила, принятые в данной области.

Одно из формализованных определений онтологии – это структура $O = \langle X, R, F \rangle$, где X – конечное множество понятий предметной области (на которой определяются категории); R – конечное множество отношений между понятиями; F – конечное множество функций интерпретации источника знаний.

Например, множество понятий – это уровни получаемого образования (бакалавриат, магистратура и т.д.), специальности, направления подготовки (фактически содержательное описание курсов), условия приема (число мест, стоимость обучения).

Примером отношений между понятиями является, например, изучаемый предмет по данной специальности, соответствующий уровню обучения, скажем, базовая дисциплина «Искусственный интеллект» по направлению подготовки «Прикладная математика и информатика» (профиль «Математическое моделирование и вычислительная математика»). И, наконец, интерпретация связана с пониманием пользователем предметной области и то, насколько применяемый интерфейс широко отражает это понимание.

Отметим, что в данной работе мы игнорируем формальный аспект использования категорий [4], поскольку он имеет значение только при разработке автоматических средств построения и анализа онтологий (частично об этом упоминается в подразделе 4.5.).

Таким образом, поскольку, как отмечалось выше, с точки зрения задач пользователя, ИП представляет собой отношение между элементами – терминами, являющимися гиперссылками на тексты, содержащими нужную информацию, то и систему этих отношений и терминов можно рассматривать как онтологию.

Построим, например, онтологию «Уровень образования». Будем рассматривать онтологию как иерархическую структуру, выражаемую направленным ациклическим графом (DAG) (рис. 3), в котором вершины Б/С (Бакалавриат и специалитет),

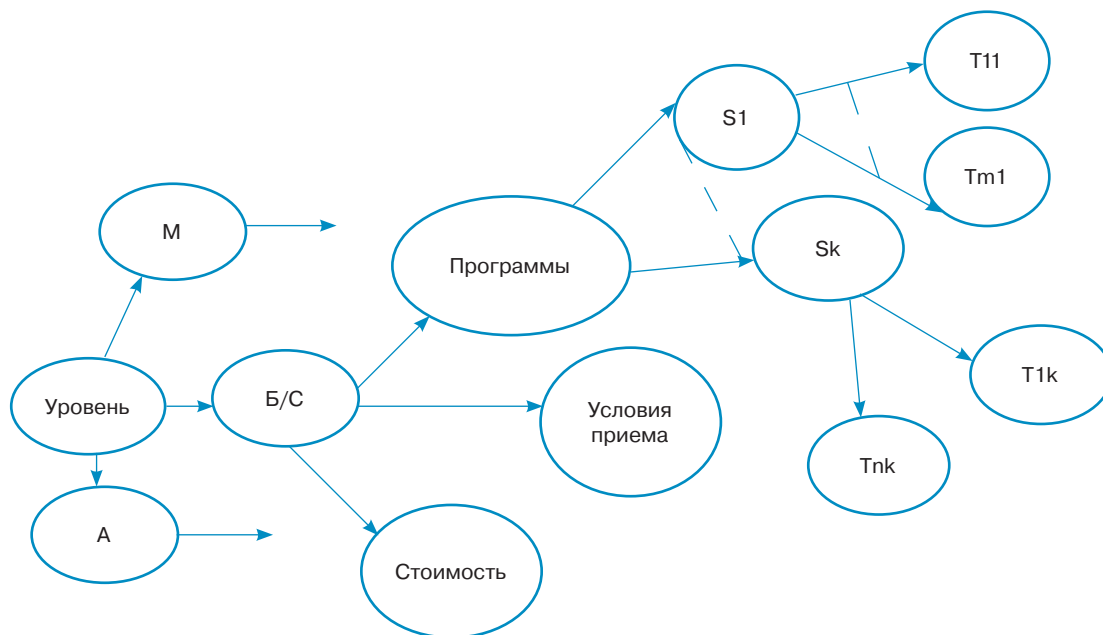


Рис. 3. Онтология области «Специальность» для уровня образования

М и А (соответственно, Магистратура и Аспирантура), вершины $S_1, \dots, S_k$ соответствуют гиперссылкам и заголовкам текста, названным как соответствующие запросы пользователей. Например, S_1 = «Бакалавриат и специалитет», S_2 = «Программа обучения, число мест». Здесь k – число доступных направлений подготовки и специальностей на данном уровне образования, n – число изучаемых дисциплин для данного направления подготовки (специальности), $S = \{S_1, \dots, S_k\}$ – гиперссылки и заголовки текста на имеющиеся направления подготовки (специальности).

Каждая вершина задает темы категории «Уровень образования» вплоть до статей, находящихся по ссылкам T_{ij} , $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, k$. Для рассматриваемого примера – это описания программ и дисциплин по профилю специализации данного направления подготовки.

Если считать, что пользователь мыслит в указанных терминах компонентов онтологии, то проблема состоит в том, чтобы наименования элементов ИП (гиперссылок, прежде всего), весьма далекие в смысле семантики получаемого ответа, были бы для пользователя не похожими друг на друга. С другой стороны, необходимо чтобы ссылки, семантически схожие с темой запроса, который пользователь собирается сделать, были бы текстуально схожи с заголовком (названием) гиперссылки (например, «Программа обучения, число мест»).

С точки зрения юзабилити ИП [5] вопрос состоит в близости (в лучшем случае в совпадении) онтологии разработчика ИП и онтологии пользователя (как он представляет себе предметную область, в которой он ищет необходимую ему информацию). При

этом следует подчеркнуть, с точки зрения пользователя, онтология – это совокупность знаний, которыми необходимо овладеть, чтобы понять и правильно интерпретировать элементы ИП и их связи.

Связи элементов ИП во многом предопределяют характер пользовательского диалога, а именно, как пользователь реагирует на действия, которые предлагает ему выполнить данный интерфейс. То есть, необходимо оценить связь онтологий ИП со знаниями и понятиями пользователя о данной предметной области. Если считать, что онтологии как ИП, так и пользовательских представлений состоят из конечного числа концептов, то юзабилити ИП может характеризоваться числом совпадений между онтологиями.

При этом пользователь, чтобы понять назначение элемента ИП, должен не только правильно его интерпретировать и быть знакомым с концепциями, которые присутствуют в тексте (например, быть знакомым с концепцией трехуровневого образования «бакалавр-магистр-аспирант»), но должен также понимать возможности данного элемента при использовании его для навигации по сайту. Например, предполагается, что закладка «←» на веб-странице, соответствующей теме «Гид по специальности», понимается пользователем как указание для возврата к ранее посещенному контенту.

Также следует помнить, что некоторый элемент ИП потенциально может относиться к более чем одной онтологии («конфликт онтологий»), и пользователю неясно, к какой именно он относится. Например, в главном меню ссылка «Программа обучения, число мест» потенциально может относиться как к направлению подготовки/специальности, так

и профильным дисциплинам, о чем пользователь может не знать, и такая двусмысленность может вызвать у него неправильное понимание содержания, которое предлагает ссылка.

4.1. Краткое описание возможных подходов к оценке семантического подобия

Как следует из сказанного выше, для эффективного решения нашей задачи необходима оценка сходства текстов ссылок (мы не рассматриваем их графические представления) с учетом представления пользователя о данной предметной области, то есть семантики рассматриваемых данных.

Вопрос состоит в том, как оценить представление объектов (элементов) интерфейса, обеспечивающего доступ к поиску нужной пользователю информацию и знаний. Для этого, очевидно, необходимо уметь структурировать эти объекты и наделять их семантикой (смыслом в контексте рассматриваемых задач).

В литературе можно выделить следующие пять методов измерения сходства [6]:

- методы, основанные на понятии «расстояния» между объектами, наделенными семантикой;
- методы, основанные на информационном содержимом;
- методы, основанные на свойствах терминов;
- методы, основанные на иерархии онтологий;
- гибридные методы.

Далее рассмотрим лишь самые общие подходы к вычислению сходства, как меры расстояния, основанные на наиболее популярных моделях представления концептуальной информации.

4.2. Расстояние и подобие: формальные аспекты

Формально расстояние («расстояние в пространстве») – это функция D с неотрицательными действительными значениями, определенными на декартовом произведении $X \times X$, такими, что $D: X \times X \in R^+$. Она называется метрикой расстояния на X , если для каждого $x, y, z \in X$:

$$D(x, y) = 0, \text{ если } x = y \text{ (аксиома тождества);}$$

$$D(x, y) + D(y, z) \geq D(x, z) \text{ (неравенство треугольника); (1)}$$

$$D(x, y) = D(y, x) \text{ (аксиома симметрии).}$$

Множество X , снабженное метрикой, называется метрическим пространством. Метрики «подобия» $S(x, y)$ рассматриваются как инверсия к понятию расстояния, которое должно следовать этим правилам, будучи тем больше, чем меньше различия между

объектами x, y . В частности, $S(x, x) > S(x, y)$ при $x \neq y$.

Рассмотрим случай, когда семантика данных предполагает, что данные представляют собой несколько строк упорядоченных символов. С практической точки зрения проблема определения подобия представляет собой комбинацию двух подзадач: а) какой тип сходства наиболее релевантен сравниваемым данным? и б) как задать строку запроса Q для поиска с подходящей сложностью (стоимостью), чтобы найти все строки в наборе данных, чьи расстояния до строки Q не больше, чем заданный порог. Ниже рассмотрим два класса метрик расстояния/подобия – лексикографические и семантические, которые можно использовать в модели для оценки удобства использования ИП.

4.3. Лексикографические метрики

Лексикографическая метрика выражает схожесть (которую нам надо оценить, чтобы понять, насколько ясен для пользователя может быть переход по данной гиперссылке) как некоторую функцию числа или доли похожих слов или лексем. Лексикографические метрики просто сравнивают знаки (элементы текста) и их последовательности в сравниваемых словах. Например, это может понадобиться для оценки подобия между терминами в онтологии, изображенной на рис. 3.

В качестве примеров можно указать метрики Жаккара [7] и Левенштейна [8]. Расстояние Жаккара (Jaccard) $JD(x, y) = \frac{|x \Delta y|}{|x \cup y|}$, где Δ обозначает

симметричную разность между двумя наборами элементов множеств x, y (то есть x и y рассматриваются как неупорядоченный набор символов из данного алфавита с числом элементов $|x|, |y|$). Соответственно определены метрики подобия Жаккара

$$J_S(x, y) = 1 - JD(x, y) = \frac{|x \cap y|}{|x \cup y|}. \text{ При этом элементами}$$

множеств могут быть знаки кода ASCII, слова текста или так называемые n -граммы слов, под которыми понимают последовательность из n знаков [7].

Например, если мы рассматриваем множество как собрание отдельных знаков (букв, пробелов, знаков препинания), то выделяемые из фразы «to_be_or_not_to_be» 2-граммы выглядят, как: to, o, _b, be, e, _o, or, r, _n, no, ot, t, _t, to, o, _b, be, где знаком _ (нижнее подчеркивание) отображается пробел. Если же элемент – слово английского языка, то игнорируя пробелы, получаем следующие 2-граммы, для наглядности заключенные в скобки: (to be) (be or) (or not) (not to) (to be).

Эту метрику можно интерпретировать как вероятность того, что случайное отображение с помощью хэш-функции h_i (разные отображения для разных i) не содержит случайных коллизий, то есть вероятность $Pr(h(x_i) = h(y_i)) = J_S(x_i, y_i) + (1 - J_S(x_i, y_i))/2^k$ – это вероятность того, что случайная перестановка разных подмножеств текста (в частности, подстрок) не отображается в одинаковый индекс таблицы, k – это число битов, отображаемых хэш-функцией h_i [7].

Таким образом, рассматривая гиперссылки x = «Бакалавриат/специалитет» (при входе по гиперссылке «Гид по специальностям» на страницу «Контрольные цифры приема 2020/2021 учебного года») и y = «Бакалавриат и специалитет» (левая навигационная панель веб-структуры курсов) как последовательности букв русского алфавита, находим, что $J_S(x, y) = 0.94$, то есть имеет место исключительно высокое сходство, при существенно отличном содержании результатов перехода по этим ссылкам: «Бакалавриат и специалитет» → «Программы обучения, число мест» → «Контрольные цифры приема 2020/2021 учебного года по программам бакалавриата и программам специалитета очной формы обучения» (содержащие информацию «Специальности, число мест»), и дальше для получения искомой информации в полном объеме надо идти по ссылке «Гид по специальностям», на который можно было бы прийти сразу с домашней страницы.

Если предположить, что величина $J_S(x, y)$ действительно отражает психологическое восприятие пользователем сходства, то этот результат означает крайне неудачный выбор названия гиперссылок, поскольку дает надежду пользователю на семантическую близость информации, получаемой по этим ссылкам. Это, однако, не соответствует действительности, поскольку может приводить к замедлению получения информации пользователем (конфликт содержания переходов по двум достаточно схожим ссылкам).

Наоборот, тексты заголовков гиперссылок «Гид по специальностям» и «Программы обучения, число мест» имеют почти нулевое значение $J_S(x, y)$, но претендуют на то, чтобы предоставить пользователю семантически-схожую информацию. При этом, чтобы найти соответствующую гиперссылку на одной из страниц, надо перейти на другую страницу (дуга E_{72} на рис. 2) и там уже искать релевантную информацию, что говорит о нерациональности такого поиска.

Помимо меры сходства Жаккара для анализа схожести терминов в онтологиях используется Расстояние Левенштейна или Расстояние Редактирования (Edit Distance, ED). Под расстоянием редактирования понимается число символов, которое может потребоваться при преобразовании типа «вставить\удалить\заменить» строки x в y или наоборот.

Например, для строк $str1$ = «INTENTION» и $str2$ = «EXECUTION» нетрудно видеть, что минимальное расстояние редактирования между $str1$ и $str2$ оказывается равным 5. Действительно, выполняя все операции сравнения с $str1$, мы должны сделать по одной операции удаления I, замены N на E, T на X, введения символа C, и замены T на U.

Данная мера отвечает всем условиям (1) и поэтому является метрикой расстояния. Она используется, например, в [9] для вычисления внутреннего сходства между терминологиями (Domain ontology linking), чтобы связать термины, используемые в ссылках, с соответствующими знаниями в некоторой базе знаний или формализованными знаниями пользователя. При этом свойства ED позволяют, например, сравнивать термины с учетом суффиксов и префиксов, отличие в которых может препятствовать связыванию термина и сущности.

Итак, чтобы оценить (формализовать), насколько данный интерфейс позволяет пользователю легко найти нужные ссылки (информацию), мы можем оценивать семантическую схожесть терминов (фраз, представляющих ссылки) внутри онтологий, описывающих соответствующие области запросов (в нашем случае – сведений для поступающих).

4.4. Структурно-семантический подход к оценке сходства текстовых объектов

Структурно-семантический подход к оценке сходства текстовых объектов основан на сравнении расстояний в некоторой метрике семантики объектов рассматриваемых областей. Например, если можно определить некоторую меру сходства (отвечающую аксиомам расстояния (1)) между онтологией «Уровень образования» (рис. 3) и используемых в ней тем «Направление подготовки/специальность» и «Профильные дисциплины» и таких тем, как «Проходной балл в прошлом», «Число мест на данную специальность», которые можно представить, например, в онтологии «Условия поступления», это может помочь абитуриенту определить наиболее подходящую для него специальность, как компромисс между интересом к специальности и желанием стать студентом в этом году.

Конкретизируем меру *расстояния/сходства* для подхода, рассматриваемого в настоящем подразделе. Для любой пары из двух вершин V_i и V_j на рис. 3 (i, j – номера узлов, принимающие значения между 1 и общим числом узлов онтологии) известный метод с интуитивно понятной оценкой их сходства [6, 9] заключается в вычислении расстояния между узлами, равного количеству узлов в иерархии данной онтологии, которые надо пройти («кликнуть») чтобы попасть в узел V_j из V_i . При этом, чем короче расстояние, тем выше сходство. В случае если существует несколько

путей между узлами, может использоваться самое короткое или среднее расстояние из всех путей.

Этот подход обычно называют методом семантического расстояния [6], поскольку он дает меру расстояния между двумя терминами, определяющими семантику в данной онтологии. Расстояние может быть легко преобразовано в меру подобия и нетрудно показать, что эта мера удовлетворяет аксиомам расстояния (1) и поэтому является метрикой.

Можно указать следующие два фактора, определяющих расстояние (хотя есть и целый ряд других [6]):

1) плотность в графе онтологий: чем выше плотность, тем ближе расстояния между узлами;

2) глубина узлов: чем глубже расположены узлы, тем более очевидна разница между узлами.

Учитывая иерархическую структуру онтологии [3], семантическое сходство между двумя терминами в целом определяется как функция расстояния между вершинами в графе, соответствующего иерархической структуре онтологии (рис. 3).

Например, после выбора концепта «Программа обучения», включающего в себя «детей» (последователей) гиперссылки «Программы обучения, число мест», как новые ссылки, так и статьи с описанием программ обучения, у пользователя отсутствует уверенность в том, ответы на какие вопросы он может получить, перейдя по этой ссылке по концепту «Гид по специальностям».

Мы можем интерпретировать эти затруднения как отсутствие подобия между сформулированной целью пользователя (концептом) «Программа обучения» и ссылками, которые доступны пользователю на данном шаге поиска. Формально это подобие выражается принятой в современных подходах к анализу информационно-поисковых систем мерой «онтологического подобия», выражающей семантическую удаленность (расстояние) одних концептов, представленных вершинами графа на рис. 3 от других, которые рассматриваются как *тематические события* (Thematic event, TE) в данной онтологии. Такое TE могло бы быть просто названием гиперссылки, например, «Гид по специальностям», либо названием гиперссылки, дополненным аннотацией, например, «Специальности и изучаемые профильные дисциплины». Это упростило бы пользователю поиск. Очевидно, что с точки зрения описываемой меры, это означает снижение удаленности данной ссылки от необходимой пользователю информации о профильных дисциплинах. Полезность такой аннотации для нашего конкретного примера очевидна.

При этом следует отметить, что одна из существенных проблем оценки подобия состоит в том, что для тематически родственных слов (фраз) могут быть разные написания. Например, «Студент» и «Профессор» – это родственные термины, которые не похожи друг на друга. Все сходные понятия связаны между собой. Обратное не всегда верно.

4.5. Некоторые рекомендации по использованию мер подобия для улучшения юзабилити ИП

Следует отметить, что в рассматриваемом примере лексикографически схожие ссылки через промежуточные семантически и лексикографически схожие гиперссылки второго уровня (комбинации слов «бакалавриат» и «специалитет») ведут к абсолютно несхожим текстам статей, в которых пользователь будет искать ссылку на нужную информацию. Это говорит о низком уровне юзабилити такого ИП, поскольку пользователь как минимум трижды будет останавливаться из-за необходимости поиска приемлемой навигации.

Иными словами, нарушается следующее важное требование к навигации сайта – текст гиперссылки должен точно отражать содержание адресуемой страницы. Например, переход по гиперссылке «Программы обучения, число мест» (бакалавриат и специалитет) действительно позволяет получить информацию о числе мест. Однако для получения подробной информации о программе обучения придется идти на другую ветку по гиперссылке «Гид по специальностям», по которой пользователь мог бы получить ту же информацию. Поэтому заголовки гиперссылки на статьи должны иметь регулярные синтаксические (и семантические) структуры, которые дают подсказки для переходов.

Для выбора гиперссылки, на которую следует перейти для получения ответа на интересующий вопрос, желательно иметь текстовую подсказку. Например, гиперссылку «Гид по специальностям» следует снабдить аннотацией о списке изучаемых предметов, увеличив тем самым значение рассмотренной метрики онтологического сходства.

Отметим также, что помимо метрики расстояния для оценки юзабилити ИП можно использовать тестовые шкальные оценки знакомства с онтологиями и возможными трудностями восприятия (scores) [9].

Подчеркнем, что мы рассматриваем не задачу автоматического извлечения онтологий из данных [5], а задачу оценки близости используемых элементов (терминов) внутри онтологии или между ранее построенными онтологиями с возможностью их ручной доработки для таких простых примеров, как в данной статье.

4.6. Средства построения онтологий

Для рассматриваемого сайта построение онтологии очевидным образом выполняется вручную. Чтобы использовать онтологический подход в разработке ИП сайтов повышенной сложности, необходимо использовать специальные инструменты, именуемые редакторами онтологий. Среди указанных инструментальных средств можно, в первую очередь, выделить [10]: *Protégé 4.3*, *SWOOP*, *Apollo*,

используемые для проектирования, редактирования и анализа онтологий.

Основная функция любого редактора онтологий состоит в поддержке процесса формализации знаний и представлении онтологии как спецификации (точного и полного описания), и, соответственно, редакторы онтологий предоставляют языковые средства описания онтологии как формальной модели.

Набор возможных действий, поддерживаемый редактором, обычно включает создание, редактирование, удаление понятий, отношений и прочих структурных элементов онтологии, редактирование таксономии. Инструментальные средства нужны для того, чтобы не только вводить и редактировать онтологическую информацию, но и анализировать ее, выполняя типичные операции над онтологиями, например: выравнивание (alignment) онтологий – установка различного вида соответствий между двумя онтологиями для того, чтобы они могли использовать информацию друг друга; отображение (mapping) одной онтологии на другую – нахождение семантических связей между подобными элементами разных онтологий; объединение (merging) онтологий – операция, которая по двум онтологиям генерирует третью, объединяющую информацию из первых двух.

Например, редактор онтологий *Protégé* – это свободно распространяемая Java-программа, предназначенная для построения (создания, редактирования и просмотра) онтологий той или иной прикладной области. Она включает редактор онтологий, позволяющий проектировать онтологии, разворачивая иерархическую структуру абстрактных и конкретных классов и слотов. Данный инструмент поддерживает использование языка OWL и позволяет генерировать HTML-документы, отображающие структуру онтологий.

С точки зрения нашей задачи, главное назначение редактора – создание базы знаний о возможных связях концептов, по которой можно оценивать психологически-обоснованное семантическое расстояние между ссылками.

5. ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЮЗАБИЛИТИ ИП

Для изучения вариантов навигации в соответствии с возможностями ИП применяется модель цепи Маркова первого порядка ко всем путям навигации. Эта модель может представить динамику общения пользователей с сайтом, а именно, вероятности переходов к конкретным ссылкам и прогноз времени перехода к тем или иным страницам или полного выполнения задачи, по сути, интегрируя опыт работы по тестируемой группе, по которой вычисляют матрицу вероятностей переходов цепи.

Процесс навигации по сайту можно рассматривать как конечную цепь Маркова с дискретным пространством состояний и дискретным параметром времени. Для этого будем считать каждую гиперссылку как одно состояние, а один клик – как параметр времени, и учитывать только предыдущую страницу (ссылку), прежде чем перейти на текущую страницу, рассматриваемую, как следующее состояние цепи. Иными словами, мы считаем, что выбор дальнейших действий пользователя определяется только информацией, полученной им в текущий момент.

Следовательно, следующее уравнение для вероятностей переходов между указанными состояниями справедливо, если X_n – это состояние страницы, появляющейся при n -м клике:

$$\begin{aligned} \text{Prob}\{X_{n+1}=j | X_0=i_0, X_1=i_1, \dots, X_n=i_n\} = \\ = \text{Prob}\{X_{n+1}=j | X_n=i_n\}. \end{aligned}$$

Если дугам графа (рис. 2), представляющим навигацию по сайту, поставить в соответствие направления бакалавриата с подходящими предметами, проходными баллами и ценой, и присвоить им вероятности переходов, то этот граф можно рассматривать как граф соответствующей цепи Маркова.

Мы рассмотрим только простой случай однородной цепи Маркова, где вероятности перехода не зависят от n . В этом случае вероятности переходов p_{ij} можно оценить по данным журнала обращений к сайту при работе некоторой группы тестирующих этого сайта. Иными словами, схема перемещения посетителя на сайте рассматривается как последовательность переходов из одного состояния в другое с добавлением дополнительного состояния, чтобы обозначить случай, когда посетитель прекращает поиск по данному сайту. Будем рассматривать это состояние как поглощающее.

Вероятности перехода цепи Маркова представлены $m+1$ квадратной матрицей, где m – число состояний (число гиперссылок и текстов, по которым может проходить пользователь при решении своей текущей задачи), элементы которой $p_{ij}(n)$, $i, j=1, \dots, m+1$ таковы, что $p_{ij}(n) = P(X_{n+1}=j | X_n=i)$ и

$$\sum_{i,j=1}^m p_{ij} = 1.$$

Вероятности цепи $p_{ij} = n_{ij}/N$, где n_{ij} – число переходов от страницы с индексом i к странице с индексом j (рис. 2) при выполнении тестовых заданий группой тестирующих [1], N – общее число кликов при работе данной группы тестирующих.

Пользователь должен вернуться к выбору темы, если он не может найти целевую статью (страницу,

ссылку) после выбора темы. Пользователь достигает своей цели, не возвращаясь к выбору темы, если выбранная тема является искомым путем к целевой статье, превращающая выбранную тему в поглощающее состояние для цепи Маркова (найдя ответ, пользователь прекращает данный сеанс общения с сайтом).

Поскольку, как отмечалось выше, индекс подобия Жаккара J_S имеет вероятностную интерпретацию, принципиально возможно установить вероятность перехода от страницы к странице на основе полученных значений J_S с некоторым весом каждого перехода, то есть вероятности можно установить априорно, по мерам сходства. Таким образом, может быть получена предварительная оценка юзабилити ИП. Используя эту оценку, можно в ряде случаев сократить время анализа ИП путем исключения заведомо неприемлемых вариантов реализации ИП. Очевидно, что для сложных сайтов желательно использовать те или иные средства автоматизации оценки расстояний (подобия) [11].

Цепь Маркова может быть использована для прогнозирования среднего числа кликов или времени поиска (времени пребывания на сайте для решения рассматриваемой задачи). Обе эти характеристики могут быть важными показателями удобства использования ИП. Если предположить, что с вероятностью, равной 1, пользователь начинает поиск с домашней страницы, количество кликов и соответственно оценка времени пребывания на сайте могут быть вычислены по известному уравнению [12] как среднее число шагов до попадания цепи Маркова в поглощающее состояние.

Это уравнение позволяет прогнозировать среднее число кликов, необходимых пользователю, посещающему сайт, чтобы достигнуть состояния поглощения (обнаружения целевой статьи или ее заголовка), исходя из нахождения на домашней странице. Таким образом, данная модель позволяет дать некоторую вероятностную оценку удобства использования ИП веб-приложений.

6. НЕСКОЛЬКО ЗАМЕЧАНИЙ О ТЕХНИКЕ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПЕРЕХОДОВ И СЕМАНТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

Для оценки вероятностей переходов в цепи Маркова можно использовать инструменты веб-аналитики, например, сервис Яндекс.Метрика^{2,3}, предназначенный для сбора статистики посещений, с включенным в него инструментальным средством

Вебвизор, одна из полезных функций которого – запись всех действий пользователя на сайте⁴. При этом Вебвизор может воспроизвести все действия, совершенные пользователем за конкретный сеанс, из чего можно сделать вывод, какие цели он преследовал на сайте.

Система веб-аналитики фиксирует абсолютно все щелчки левой кнопкой мыши по кнопкам, элементам панелей вертикального и горизонтального меню, ссылкам. После нажатия на кнопку «Карта кликов»⁵ на экране отобразятся данные о кликах, собранные системой сбора статистики. В частности, по данным карты кликов сайта Приемной комиссии МИРЭА – Российского технологического университета⁶ было получено, что только 11% желающих поступить на бакалавриат воспользовались гиперссылкой «Гид по специальностям» с домашней страницы, в то время как подавляющее большинство пользователей к данной гиперссылке обращаются со страницы сайта, открытой по гиперссылке «Программы обучения, число мест». Это на наш взгляд обусловлено тем, что отсутствует явная смысловая связь данной ссылки с информацией о конкретной специальности. Поэтому можно предположить, что пользователям неочевидно назначение гиперссылки «Гид по специальностям», как способа выбора подходящего направления обучения, в то время как большой популярностью пользуется гиперссылка «Программы обучения, число мест».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка и улучшение юзабилити ИП поисковой системы только на основе тестовой эксплуатации прототипа на этапе проектирования весьма затруднительна, прежде всего, потому, что на этом этапе бывает трудно найти достаточно представительные группы пользователей различных категорий (интересов, одного уровня компьютерной подготовки и т.д.).

В данной статье на примере простого университетского сайта показано, какие математические подходы можно применять для оценки важных характеристик юзабилити ИП при проектировании и разработке сайтов. Этими характеристиками являются меры сходства понятий, отображаемых элементами интерфейса пользователя данной предметной области.

² URL: <https://blog.sibirix.ru/2016/07/06/ga-vs-yam/>, дата обращения 20.08.2020. [URL: <https://blog.sibirix.ru/2016/07/06/ga-vs-yam/>, Accessed August 20, 2020.]

³ URL: <https://znet.ru/instrumenty/yandeks-metrika/>, дата обращения 20.08.2020. [URL: <https://znet.ru/instrumenty/yandeks-metrika/>, Accessed August 20, 2020.]

⁴ URL: <https://webliberty.ru/webvizor-sayt-glazami-polzovatelya/>, дата обращения 20.08.2020. [URL: <https://webliberty.ru/webvizor-sayt-glazami-polzovatelya/>, Accessed August 20, 2020.]

⁵ URL: <https://akiwa.ru/blog/karta-klikov-v-yandeks-metrike/>, дата обращения 20.08.2020. [URL: <https://akiwa.ru/blog/karta-klikov-v-yandeks-metrike/>, Accessed August 20, 2020.]

⁶ URL: <https://priem.mirea.ru/>, дата обращения 20.08.2020. [URL: <https://priem.mirea.ru/>, Accessed August 20, 2020.]

Предлагаемый в данной работе подход на наш взгляд является тем более актуальным, поскольку в последнее время возникает все больше задач, связанных с обеспечением юзабилити в многопользовательских и сетевых системах, в программных средствах поддержки социальных сетей. В частности, появились специфические задачи, связанные с безопасностью и секретностью, с администрированием SDN-сетей. Ввиду сложности организации тестирования юзабилити таких систем, актуальной проблемой становится задача их моделирования и предсказания поведения. Это, безусловно, требует разработки математических моделей.

Отметим, что методы, основанные на тестах юзабилити ИП, предоставляют непосредственную информацию о том, как пользователи взаимодействуют

с данным веб-сайтом, и о том, каковы их реальные проблемы с конкретным ИП [13]. При этом юзабилити ИП имеет смысл оценивать на моделях цепей Маркова или онтологий для сайтов, у которых пространство анализа целей (например, сайт, рассматриваемый в этой статье) достаточно велико, и удобство использования сайта практически невозможно оценить, используя индивидуальные пользовательские тесты.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-07-00669 и 18-29-03100).

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. Басок Б.М., Рожанская А.Н., Френкель С.Л. О тестировании удобства использования веб-приложений. *Российский технологический журнал*. 2019;7(6):9–24. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-9-24>
2. Kirajima A., Kariya N., Takagi H. and Zhang Y. Evaluation of Website Usability Using Markov Chains and Latent Semantic Analysis. *IEICE Trans., Com.* 2005;E88–B(4):1467–1475. <https://doi.org/10.1093/ietcom/e88-b.4.1467>
3. Shahzad S., Ontology-based User Interface Development: User Experience Elements Pattern. *Journal of Universal Computer Science*. 2011;17(7):1078–1088. <https://doi.org/10.3217/jucs-017-07-1078>
4. Antoniou G., Franconia E., van Harmelen F. Introduction to semantic web ontology languages. In: *Reasoning Web. Lecture Notes in Computer Science*, Eisinger N., Maluszynski J. (Eds.) Vol. 3564. Berlin: Heidelberg, Springer; 2005, p. 1–21. https://doi.org/10.1007/11526988_1
5. Islam M., Islam A. Ontology mapping and semantics of web interface signs. *Cent. Comput. Inf. Sci.* 2016;6:20. <https://doi.org/10.1186/s13673-016-0077-y>
6. Gan M., Dou X., Jiang R. From ontology to semantic similarity: calculation of ontology-based semantic similarity. *The Scientific World Journal*. 2013;2013: Article ID 793091. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/793091>
7. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J.D. *Mining of massive datasets*. California: Cambridge University Press; 2014. ISBN: 978-1-107-07723-2
8. Levenshtein V.I. Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1965;163(4):845–848.
9. Liu V., Lang B., Zepeng G. Calculating semantic similarity between academic articles using topic event and ontology. URL: <https://arxiv.org/abs/1711.11508>
10. Kapoor B., Sharma S. A comparative study ontology building tools for semantic web applications. *International journal of Web & Semantic Technology*. 2010;1(3). <http://dx.doi.org/10.5121/ijwest.2010.1301>

REFERENCES

1. Basok B.M., Rozhanskaya A.N., Frenkel' S.L. On web-applications usability testing. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(6):9–24 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-9-24>
2. Kirajima A., Kariya N., Takagi H. and Zhang Y. Evaluation of website usability using Markov chains and latent semantic analysis. *IEICE Trans., Com.* 2005;E88–B(4):1467–1475. <https://doi.org/10.1093/ietcom/e88-b.4.1467>
3. Shahzad S. Ontology-based User Interface Development: User Experience Elements Pattern. *Journal of Universal Computer Science*. 2011;17(7):1078–1088. <https://doi.org/10.3217/jucs-017-07-1078>
4. Antoniou G., Franconia E., van Harmelen F. Introduction to semantic web ontology languages. In: *Reasoning Web. Lecture Notes in Computer Science*, Eisinger N., Maluszynski J. (Eds.) Vol. 3564. Berlin: Heidelberg, Springer; 2005, p. 1–21. https://doi.org/10.1007/11526988_1
5. Islam M., Islam A. Ontology mapping and semantics of web interface signs. *Cent. Comput. Inf. Sci.* 2016;6:20. <https://doi.org/10.1186/s13673-016-0077-y>
6. Gan M., Dou X., Jiang R. From ontology to semantic similarity: calculation of ontology-based semantic similarity. *The Scientific World Journal*. 2013;2013: Article ID 793091. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/793091>
7. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J.D. *Mining of massive datasets*. California: Cambridge University Press; 2014. ISBN: 978-1-107-07723-2
8. Levenshtein V.I. Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1965;163(4):845–848.
9. Liu V., Lang B., Zepeng G. Calculating semantic similarity between academic articles using topic event and ontology. URL: <https://arxiv.org/abs/1711.11508>
10. Kapoor B., Sharma S. A comparative study ontology building tools for semantic web applications. *International journal of Web & Semantic Technology*. 2010;1(3). <http://dx.doi.org/10.5121/ijwest.2010.1301>

11. Strsim 0.0.3. A library implementing different string similarity and distance measures. URL: <https://pypi.org/project/strsim/>
12. Mitrofanova A. Absorbing states in Markov chains. Mean time to absorption. Wright-Fisher Model. Moran Model. URL: <https://cs.nyu.edu/mishra/COURSES/09.HPGP/scribe2>
13. Yang Liu, Xiangji Huang, Aijun An. Personalized recommendation with adaptive mixture of Markov models. *J. of The American SOC. for Inf, Sc, and Tech.* 2007;58(12):1851–1870. <http://dx.doi.org/10.1002/asi.20631>
11. Strsim 0.0.3. A library implementing different string similarity and distance measures. URL: <https://pypi.org/project/strsim/>
12. Mitrofanova A. Absorbing states in Markov chains. Mean time to absorption. Wright-Fisher Model. Moran Model. URL: <https://cs.nyu.edu/mishra/COURSES/09.HPGP/scribe2>
13. Yang Liu, Xiangji Huang, Aijun An. Personalized recommendation with adaptive mixture of Markov models. *J. of The American SOC. for Inf, Sc, and Tech.* 2007;58(12):1851–1870. <http://dx.doi.org/10.1002/asi.20631>

Об авторах

Басок Борис Моисеевич, к.т.н., доцент кафедры Математического обеспечения и стандартизации информационных технологий Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: basok@mirea.ru. Scopus Author ID: 6602074818, ResearcherID: X-6744-2019, <https://orcid.org/0000-0002-8935-4248>

Френкель Сергей Лазаревич, к.т.н., старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН) (119333, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 44-2). E-mail: fsergei51@gmail.com. Scopus Author ID: 36865996500, <https://orcid.org/0000-0002-2150-7236>

About the authors

Boris M. Basok, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mathematical Software and Standardization of Information Technology, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: basok@mirea.ru. Scopus Author ID: 6602074818, Researcher ID: X-6744-2019, <https://orcid.org/0000-0002-8935-4248>

Sergey L. Frenkel, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal Research Center Computer Science and Control, Russian Academy of Sciences (44-2, Vavilova ul., Moscow, 119333 Russia). E-mail: fsergei51@gmail.com. Scopus Author ID: 36865996500, <https://orcid.org/0000-0002-2150-7236>

УДК 629.7.058

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-22-34>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Пешеходная навигация: чем инерциальные модули могут помочь смартфонам?

**И.А. Чистяков^{1,®}, И.В. Гришов², А.А. Никулин³,
М.В. Пихлецкий⁴, И.Б. Гарцеев^{2,4}**

¹ Московский государственный университет, Москва, 119234 Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

³ ООО «КС Кадровый Консалтинг», Москва, 115191 Россия

⁴ ООО «Техкомпания Хуавэй», Москва, 121614 Россия

® Автор для переписки, e-mail: chistyakov.ivan@yahoo.com

Резюме. Работа посвящена построению референсных траекторий ходьбы человека с целью дальнейшей разработки на их основе алгоритмов пешеходной навигации для смартфонов, в том числе с помощью методов машинного обучения. Рассматривается задача восстановления замкнутых траекторий по данным, полученным с помощью инерциальных измерительных блоков (ИИБ), зафиксированных на ногах в области подъема стопы. Особенности подхода являются использование недорогих датчиков и простота представленного метода. Предлагаются алгоритмы, позволяющие построить сглаженную двумерную траекторию движения пешехода как по измерениям одного ИИБ, так и по совместным измерениям двух блоков. Алгоритмы основаны на использовании модификации фильтра Калмана и предположения о нулевой скорости ИИБ в момент соприкосновения стопы пешехода с поверхностью. В случае двух измерительных блоков дополнительно предполагается, что положения датчиков левой и правой ног не могут значительно отличаться друг от друга. Работа алгоритмов была проверена на траекториях длительностью от 1 до 10 минут, полученных при движении пешеходов внутри помещений по ровным горизонтальным поверхностям. Для оценки полученных результатов восстановленные указанными способами траектории сравниваются с высокоточными решениями, построенными с помощью данных от GNSS-приемников, работающих в RTK-режиме. Также рассматривается вопрос синхронизированного сбора данных от всех источников и приводится подробное описание проведенных экспериментов и используемого оборудования. Набор данных, на котором происходила верификация алгоритмов, свободно доступен по адресу: <http://gartseev.ru/projects/rjt2021>.

Ключевые слова: пешеходная навигация, инерциальная навигация, ИИБ, наблюдение нулевой скорости, инерциальная навигационная система, RTK-режим, датасет, машинное обучение, глубокое обучение, смартфон, синхронизация измерительных блоков

• Поступила: 04.09.2020 • Доработана: 13.01.2021 • Принята к опубликованию: 19.01.2021

Для цитирования: Чистяков И.А., Гришов И.В., Никулин А.А., Пихлецкий М.В., Гарцеев И.Б. Пешеходная навигация: чем инерциальные модули могут помочь смартфонам? *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):22–34 <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-22-34>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Pedestrian navigation: how can inertial measurement units assist smartphones?

Ivan A. Chistyakov^{1,*}, Ivan V. Grishov², Alexey A. Nikulin³,
Mikhail V. Pikhletsy⁴, Ilya B. Gartsev^{2,4}

¹ Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

³ KS Kadrovyi Consulting, Moscow, 115191 Russia

⁴ Huawei, Moscow, 121614 Russia

* Corresponding author, e-mail: chistyakov.ivan@yahoo.com

Abstract. This paper is devoted to construction of reference walking trajectories for developing pedestrian navigation algorithms for smartphones. Such trajectories can be used both for verification of classical algorithms of navigation or for application of machine learning technics. Reconstruction of closed trajectories based on data from foot-mounted inertial measurement units (IMU) is investigated. The advantages of the approach are the use of inexpensive sensors and the simplicity of the presented method. We propose algorithms for reconstruction of smooth 2D pedestrian trajectories based on measurements from a single IMU as well as on combined measurements from two IMU's. Introduced algorithms are based on application of modified Kalman filter with an assumption of IMU having zero velocity when foot contacts the ground. In case of two measurement units, it is additionally assumed that the positions of the sensors cannot differ significantly from each other. The algorithms were tested on trajectories lasting from 1 to 10 minutes, passing indoors on horizontal surfaces. Obtained results were compared with high precision trajectories acquired with GNSS RTK receivers. Additionally, the process of inter-device time synchronization is investigated and detailed description of the experiments and used equipment is given. The dataset used for verification of proposed algorithms is freely available at: <http://gartsev.ru/projects/rtj2021>.

Keywords: pedestrian navigation, inertial navigation, inertial navigation system (INS), inertial measurement unit (IMU), zero velocity update (ZUPT), foot mounted device, RTK, dataset, machine learning, deep learning, PDR, smartphone, synchronization

• Submitted: 04.09.2020 • Revised: 13.01.2021 • Accepted: 19.01.2021

For citation: Chistyakov I.A., Grishov I.V., Nikulin A.A., Pikhletsy M.V., Gartsev I.B. Pedestrian navigation: how can inertial measurement units assist smartphones? *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2021;9(2):22–34 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-22-34>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Пешеходная навигация занимает важное место среди всех навигационных задач: ее решение позволяет определять местоположение людей внутри больших зданий, таких как аэропорты, вокзалы, торговые центры и т.д. Решение такого рода задач особенно важно в случае чрезвычайных ситуаций – системы внутреннего позиционирования широко применяются пожарными расчетами и спасательными службами при взрывах и пожарах. Кроме того,

эти системы могут оказаться крайне полезными для людей с нарушениями зрительного аппарата.

Для решения таких задач могут использоваться различные источники информации: системы спутниковой навигации, сети Wi-Fi, Bluetooth и другие. Однако упомянутые источники доступны не во всех случаях, а соответствующие сигналы могут оказаться слишком слабыми (например, GPS-позиционирование дает плохую точность внутри помещений), что зачастую не позволяет построить решение исключительно на их основе. Поэтому для решения задач

пешеходной навигации также широко применяются инерциальные датчики, использование которых не требует какой-либо дополнительной инфраструктуры. На сегодняшний день такие датчики практически всегда устанавливаются в смартфонах и различных носимых устройствах, что позволяет создавать общедоступное решение задач позиционирования без применения каких-либо дополнительных средств.

Однако производители смартфонов используют датчики невысокой точности, что приводит к быстрому накоплению ошибок при использовании классических подходов, основанных на интегрировании кажущихся ускорений и угловых скоростей [1, 2]. Другим подходом к решению задач пешеходной навигации являются методы, сводящиеся к определению длины и направления каждого шага. При этом возникают дополнительные сложности, поскольку смартфон может использоваться в различных сценариях (например, он может находиться в руке, в кармане или в сумке), а его ориентация в пространстве может меняться независимо от направления движения. Существенными развитием данного подхода является использование методов машинного и глубокого обучения [2–4]. Однако методы машинного и глубокого обучения требуют наличия обучающих данных, содержащих наряду с информацией от датчиков смартфона достоверную информацию о реальных позициях пешехода. В работе [5] рассматриваются существующие датасеты, полученные различными способами, и представлен датасет «RuDaCoP», полученный при помощи закрепленных на ногах ИИБ. Целью данной работы является детальное описание алгоритмов, получающих такие референсные данные с помощью дешевых и простых в использовании инерциальных датчиков, а также оценка надежности этих алгоритмов.

При этом построение траекторий рассматривается не как самоцель, а как этап для построения навигационных алгоритмов для смартфонов. Для этого также решается задача синхронного сбора данных датчиками смартфонов, датчиками инерциальных блоков и высокоточными GNSS-приемниками, верифицирующими точностные характеристики разрабатываемых алгоритмов.

Предлагается метод восстановления траекторий по данным с инерциальных датчиков, закрепленных в области подъема стопы (рис. 1), используя алгоритмы фильтрации. Такой метод крепления позволяет использовать предположение о нулевой скорости устройств в моменты соприкосновения стопы с поверхностью и рассматривается в работах [6–8]. Для повышения точности восстановленных референсных траекторий вводится дополнительное ограничение – рассматриваются только замкнутые траектории, что не накладывает существенных ограничений на экспериментатора: требуется лишь вернуться в начальную

точку по окончании движения. Указанное предположение позволяет использовать информацию о совпадении начальной и конечной точек движения и значительно улучшить точность построенных траекторий при постобработке данных. Поскольку при использовании прямого фильтра Калмана новое измерение отражается лишь на участке траектории, соответствующей последнему шагу, предлагается алгоритм сглаживания, корректирующий всю вычисляемую кривую. Заметим, что ограничение на замкнутость рассматривается лишь применительно к обучающим данным – в реальных траекториях пешеход подобным условием не ограничен.



Рис. 1. Расположение измерительного блока на ноге

В случае, когда имеются данные с двух различных ИИБ, закрепленных соответственно на правой и левой ногах, можно дополнительно использовать предположение, что положения датчиков в пространстве не могут значительно отличаться друг от друга. Был разработан алгоритм, позволяющий использовать все вышеперечисленные данные (информация о начальной и конечной позициях, псевдонаблюдения скорости, информация о положении другой ноги) для построения сглаженных траекторий правой и левой ног, а затем построить по ним финальную обобщенную траекторию.

Работа алгоритмов была проверена на траекториях длительностью от 1 до 10 минут, проходящих на горизонтальных поверхностях. Для оценки качества результатов использовалось дополнительное GNSS-оборудование в RTK-режиме (особенности подхода подробно разобраны в разделе 5), позволяющее получить высокоточное навигационное решение. В работе приведены данные о максимальном отклонении RTK-решений от траекторий, восстановленных предложенными способами.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ИИБ

Динамическая система, описывающая движение чувствительного элемента, прикрепленного к ноге человека, является нелинейной и может быть записана в следующем виде:

$$\begin{cases} \mathbf{p}_n = \mathbf{p}_{n-1} + \mathbf{v}_{n-1}dt, \\ \mathbf{v}_n = \mathbf{v}_{n-1} + (\mathbf{C}_n^T \mathbf{f}_n + \mathbf{g})dt, \\ \mathbf{C}_n = \mathbf{R}_n \mathbf{C}_{n-1}, \end{cases} \quad (1)$$

где n – индекс времени; dt – разница во времени между последовательными измерениями; $\mathbf{p}_n \in \mathbb{R}^3$ – координаты ИИБ в пространстве; $\mathbf{v}_n \in \mathbb{R}^3$ – скорость движения ИИБ; $\mathbf{f}_n \in \mathbb{R}^3$ и $\mathbf{w}_n \in \mathbb{R}^3$ – измерения идеальных акселерометра и гироскопа соответственно, $\mathbf{g}$ – вектор силы тяжести; $\mathbf{C}_n \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – матрица ориентации; $\mathbf{R}_n = \mathbf{R}_n(\mathbf{w}_n)$ – матрица поворота.

Интегрирование системы происходит на основе измерений, полученных с датчиков, при этом предполагается наличие немоделируемых ошибок измерений акселерометров и гироскопов:

$$\mathbf{f}_n = \tilde{\mathbf{f}}_n + \delta \mathbf{f}_n, \mathbf{w}_n = \tilde{\mathbf{w}}_n + \delta \mathbf{w}_n.$$

Вычисленные координаты $\tilde{\mathbf{p}}_n$, скорость $\tilde{\mathbf{v}}_n$ и матрица ориентации $\tilde{\mathbf{C}}_n$ будут отличаться от истинных. Введем вектор ошибок $\delta \mathbf{x}_n = [\delta \mathbf{x}_n \delta \mathbf{v}_n \delta \mathbf{p}_n]^T$, который связывает истинные и вычисленные параметры:

$$\begin{cases} \delta \mathbf{p}_n = \mathbf{p}_n - \tilde{\mathbf{p}}_n, \\ \delta \mathbf{v}_n = \mathbf{v}_n - \tilde{\mathbf{v}}_n, \\ \mathbf{C}_n^T = (\mathbf{I}_{3 \times 3} + \hat{\mathbf{p}}_n) \tilde{\mathbf{C}}_n^T, \end{cases} \quad (2)$$

где $\mathbf{I}_{3 \times 3} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – единичная матрица, а крышкой обозначено преобразование трехмерного вектора в кососимметрическую матрицу:

$$\mathbf{a} \in \mathbb{R}^3, \hat{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} 0 & a_3 & -a_2 \\ -a_3 & 0 & a_1 \\ a_2 & -a_1 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}.$$

Вектор $\mathbf{p}_n$ называют углом малого поворота.

Для вектора ошибок $\delta \mathbf{x}_n$ справедливо линейное соотношение:

$$\delta \mathbf{x}_n = \mathbf{F}_n \delta \mathbf{x}_{n-1} + \mathbf{G}_n \begin{bmatrix} \delta \mathbf{f}_n \\ \delta \mathbf{w}_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} dt & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & -\tilde{\mathbf{C}}_n^T \tilde{\mathbf{f}}_n dt \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \tilde{\mathbf{C}}_n^T dt & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & -\tilde{\mathbf{C}}_n^T dt \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{O}_{3 \times 3} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ – нулевая матрица. Уравнение ошибок (3) выводится из определения (2) с учетом (1).

2. АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОДНОГО ИИБ

Алгоритм восстановления траекторий реализован в виде фильтра Калмана с обратной связью и сглаживающего RTS-фильтра. В качестве наблюдений используется информация о нулевой скорости ИИБ в моменты стационарного положения ноги при ходьбе, а также известные начальное и конечное положения. Алгоритм с использованием только псевдонаблюдений $\mathbf{v}_n = \mathbf{0}$ описан в [6].

Определение стационарного положения ноги основано на сравнении статистики T [9] с заданной константой $\gamma > 0$. Предполагается, что ИИБ находится в покое, если выполнено условие

$$T(\{\tilde{\mathbf{f}}_i, \tilde{\mathbf{w}}_i\}_{W_n}) < \gamma, \quad (4)$$

где $\{\tilde{\mathbf{f}}_i, \tilde{\mathbf{w}}_i\}_{W_n}$ – измерения акселерометра и гироскопа на временном интервале W_n .

В начале и в конце эксперимента ИИБ в течение нескольких секунд находится в положении покоя, поэтому в соответствующие моменты времени, определяемые на основе статистики T , можно использовать информацию о начальной позиции $\mathbf{p}_n = \mathbf{0}$ (без ограничения общности считаем ее нулевой).

Чтобы добавленная корректировка позиции по последним наблюдениям имела место не только в конце движения, но отражалась на всей траектории, использован сглаживающий RTS-фильтр, так же описанный в [6]. Кроме того, сглаживание позволяет избавиться от разрывов построенных траекторий, происходящих в ходе коррекции в конце каждого шага.

Поскольку система уравнений (1) нелинейна и накопление ошибки числения может приводить к значительному расхождению с уравнениями ошибок (3), предлагается использовать фильтр Калмана с обратной связью по ориентации. Таким образом, значение матрицы ориентации корректируется на этапе прямого фильтра Калмана.

Псевдокод полученного алгоритма представлен в Алг. 1. Используются следующие обозначения: $\tilde{\mathbf{x}}_n$ соответствует набору вычисляемых значений $[\tilde{\mathbf{p}}_n, \tilde{\mathbf{v}}_n, \tilde{\mathbf{C}}_n]$; $\mathbf{P}_n$ – ковариационная матрица вектора ошибок $\delta \mathbf{x}_n$; $\mathbf{Q}$ – ковариационная матрица случайных ошибок измерений; $\mathbf{R}'$ и $\mathbf{R}''$ – ковариационные матрицы наблюдений; функция f_{mech} соответствует формулам (1). Функция `standstill` в представленном

алгоритме возвращает истинные значения в моменты начального и конечного положения покоя с известной позицией.

```

Initialization:  $\mathbf{x}_0 \leftarrow E[\mathbf{x}_0]$ ,  $\delta\mathbf{x}_0 \leftarrow \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{P}_0 \leftarrow \text{cov}(\mathbf{x}_0)$ 
/* Forward Kalman filter stage */
for  $n = 2$  to  $N$  do
     $\mathbf{x}_n \leftarrow f_{\text{mech}}(\mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{f}_n, \mathbf{w}_n)$ 
     $\delta\mathbf{x}_{n|n-1} \leftarrow \mathbf{F}_n \delta\mathbf{x}_{n-1|n-1}$ 
     $\mathbf{P}_{n|n-1} \leftarrow \mathbf{F}_n \mathbf{P}_{n-1|n-1} \mathbf{F}_n^T + \mathbf{G}_n \mathbf{Q} \mathbf{G}_n^T$ 
    if  $T(\mathbf{f}_{W_n}, \mathbf{w}_{W_n}) < \gamma$  then
        if standstill( $n$ ) = true then
             $\mathbf{H} \leftarrow \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$ 
             $\mathbf{K}_n \leftarrow \mathbf{P}_{n|n-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{n|n-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}')^{-1}$ 
             $\delta\mathbf{x}_{n|n} \leftarrow \delta\mathbf{x}_{n|n-1} + \mathbf{K}_n \begin{bmatrix} \delta\mathbf{p}_{n|n-1} + \mathbf{p}_n \\ \delta\mathbf{v}_{n|n-1} + \mathbf{v}_n \end{bmatrix}$ 
        else
             $\mathbf{H} \leftarrow \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$ 
             $\mathbf{K}_n \leftarrow \mathbf{P}_{n|n-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_{n|n-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}'')^{-1}$ 
             $\delta\mathbf{x}_{n|n} \leftarrow \delta\mathbf{x}_{n|n-1} + \mathbf{K}_n (\delta\mathbf{v}_{n|n-1} + \mathbf{v}_n)$ 
        end
    end
     $\mathbf{P}_{n|n} \leftarrow (\mathbf{I}_{9 \times 9} - \mathbf{K}_n \mathbf{H}) \mathbf{P}_{n|n-1}$ 
    /* Compensate internal angle states */
     $\mathbf{C}_n \leftarrow (\mathbf{I}_{3 \times 3} + \hat{\beta}_n) \mathbf{C}_n$ 
     $\hat{\beta}_n \leftarrow \mathbf{0}$ 
end
end
/* Smoothing */
for  $n = N-1$  to  $1$  do
     $\mathbf{A}_n \leftarrow \mathbf{P}_{n|n} \mathbf{F}_{n+1}^T \mathbf{P}_{n+1|n}^{-1}$ 
     $\delta\mathbf{x}_{n|N} \leftarrow \delta\mathbf{x}_{n|n} + \mathbf{A}_n (\delta\mathbf{x}_{n+1|N} - \delta\mathbf{x}_{n+1|n})$ 
     $\mathbf{P}_{n|N} \leftarrow \mathbf{P}_{n|n} + \mathbf{A}_n (\mathbf{P}_{n+1|N} - \mathbf{P}_{n+1|n}) \mathbf{A}_n^T$ 
end
/* Compensate internal states */
for  $n = 1$  to  $N$  do
     $\mathbf{x}_n \leftarrow \mathbf{x}_n + \delta\mathbf{x}_{n|N}$ 
     $\delta\mathbf{x}_n \leftarrow \mathbf{0}$ 
end

```

Алг. 1. Получение навигационного решения с учетом замкнутости траекторий движения

3. МЕТРИКА ПОДОБИЯ ТРАЕКТОРИЙ

Для первичной оценки правдоподобия результатов предложенного алгоритма можно провести эксперимент, в котором ИИБ закреплены на обеих ногах человека, а затем сравнить две восстановленные траектории между собой. Для этого необходима некоторая метрика, позволяющая сравнивать две кривые. Эта же метрика понадобится, чтобы оптимальным образом наложить две траектории друг на друга (начальные ориентации ИИБ не совпадают). При этом метрика должна учитывать следующие особенности: длительности эксперимента для левой и правой ног, вообще говоря, различны (датчики включаются неодновременно), ИИБ работают несинхронно, возможны пропуски измерений.

В работе [10] были рассмотрены две метрики, удовлетворяющие заданным требованиям: дискретное расстояние Фреше и DTW-метрика. Наиболее простые алгоритмы [11, 12] позволяют с помощью метода динамического программирования вычислить указанные метрики за полиномиальное время. Согласно [10], для достижения более

точных результатов в качестве метрики подобия траекторий следует использовать DTW-метрику, вычисляемую на основе модифицированного алгоритма. Для этого вводится дополнительное ограничение на максимально допустимую разницу между индексами соответствующих друг другу точек (под индексом понимается порядковый номер измерения в эксперименте). Такой подход позволяет не только повысить точность сопоставления точек кривых друг другу, но также уменьшить время вычислений.

Помимо значения метрики, результатом работы модифицированного алгоритма является последовательность пар сопоставленных друг другу точек траекторий левой и правой ног (некоторые из этих пар обозначены красным цветом на рис. 2). Если для каждой такой пары точек взять точку, лежащую посередине соединяющего их отрезка, получится некоторая усредненная кривая. Анализ такого подхода выделения «средней» траектории с помощью DTW-алгоритма представлен в [13]. Отметим, что при усреднении траекторий таким способом теряется информация о времени измерений, поскольку точки, сопоставленные друг другу, могут быть получены в разные моменты времени.

Если информация о времени важна (например, она может понадобиться для сравнения результатов алгоритма с известным высокоточным решением), то для усреднения двух траекторий достаточно проинтерполировать точки одной из них для приведения позиций разных ног к одной временной сетке. При этом середина отрезка, соединяющего положения ног в один момент времени, будет примерно соответствовать положению центра масс человека.

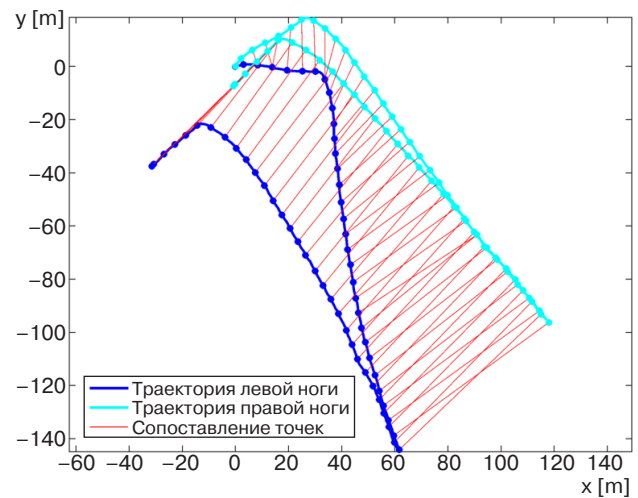


Рис. 2. Проекция траекторий левой и правой ног на горизонтальную плоскость и сопоставление точек восстановленных траекторий с помощью модифицированного DTW-алгоритма

4. АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУХ ИИБ

Идея использования двух устройств заключается в том, что в моменты ходьбы, когда одна нога покоится, а вторая находится в «середине» шага, положения датчиков в проекции на горизонтальную плоскость должны находиться на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга. Этот факт подробно исследован в [14]. Потому можно одновременно строить обе траектории, но для каждого ИИБ в качестве дополнительных наблюдений использовать позицию второго устройства.

Предлагаемый алгоритм можно декомпозировать следующим образом:

1. Построение каждой из двух траекторий с помощью Алг. 1 и определение начального несоответствия ориентаций ИИБ. Для этого путем подбора начальных углов минимизируется значение DTW-метрики.
2. Определение ноги, которой был сделан первый шаг, на основе условия (4) и имеющихся измерений.
3. Параллельный расчет траекторий по измерениям двух ИИБ с использованием наблюдений о нулевой скорости и положении другой ноги.

```

cur ← 2                                // begin computation with the second leg
pos ←  $\tilde{x}_{k_1}^1$                           // current position of the first leg
while  $k_1 < N_1 \parallel k_2 < N_2$  do
    /* select data for the current leg */
     $\tilde{x}_{n-1} \leftarrow \tilde{x}_{n-1}^{cur}, \delta \tilde{x}_{n-1} \leftarrow \delta \tilde{x}_{n-1}^{cur}, \tilde{f}_n \leftarrow \tilde{f}_n^{cur}, \tilde{w}_n \leftarrow \tilde{w}_n^{cur}$ 

    step_len = count_step_length( $k, \{\tilde{f}_i, \tilde{w}_i\}$ )
    for  $n = k + 1$  to  $k + step\_len$  do
        [ $\tilde{x}_n, \delta \tilde{x}_{n|n-1}, P_{n|n-1}$ ] ← predict( $\tilde{x}_{n-1}, \delta \tilde{x}_{n-1}, \tilde{f}_n, \tilde{w}_n$ )
        if  $n = k + step\_len/2$  then
             $H \leftarrow \begin{bmatrix} I_{2 \times 2} & O_{2 \times 7} \end{bmatrix}$ 
             $K_n \leftarrow P_{n|n-1} H^T (H P_{n|n-1} H^T + R^m)^{-1}$ 
             $\tilde{x}_n^{1,2} \leftarrow H \tilde{x}_n, \delta \tilde{x}_{n|n-1}^{1,2} \leftarrow H \delta \tilde{x}_{n|n-1}$  // select 2 coordinates
             $\delta \tilde{x}_{n|n} \leftarrow \delta \tilde{x}_{n|n-1} + K_n (pos + \delta \tilde{x}_{n|n-1}^{1,2} + \tilde{x}_n^{1,2})$ 
             $P_{n|n} \leftarrow (I_{9 \times 9} - K_n H) P_{n|n-1}$ 
        end
    end
     $n \leftarrow k + step\_len + 1$ 

    while  $T(\{\tilde{f}_i, \tilde{w}_i\}_{W_n}) < \gamma$  do
        [ $\tilde{x}_n, \delta \tilde{x}_{n|n-1}, P_{n|n-1}$ ] ← predict( $\tilde{x}_{n-1}, \tilde{f}_n, \tilde{w}_n$ )
        if standstill( $n$ ) = true then
             $H \leftarrow \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \end{bmatrix}, R \leftarrow R'$ 
        else
             $H \leftarrow \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & O_{3 \times 3} \end{bmatrix}, R \leftarrow R''$ 
        end
        [ $\delta \tilde{x}_{n|n}, P_{n|n}$ ] ← correct( $H, R, P_{n|n-1}, \tilde{x}_n, \delta \tilde{x}_{n|n-1}$ )
         $n \leftarrow n + 1$ 
    end
    pos ←  $\tilde{x}_n^{1,2}$  // save current position for the following observation

     $\tilde{x}_n^{cur} \leftarrow \tilde{x}_n, \delta \tilde{x}_n^{cur} \leftarrow \delta \tilde{x}_{n|n}, P_{n|n}^{cur} \leftarrow P_{n|n}, k^{cur} \leftarrow n$ 
    cur ← (3 - cur)
end

```

Алг. 2. Алгоритм получения замкнутого навигационного решения, использующий данные с двух ИИБ

4. Сглаживание траекторий RTS-фильтром, аналогичное таковому в Алг. 1.
5. Построение одной усредненной траектории.

Пункт 3 указанной декомпозиции более подробно представлен в Алг. 2 (переменные с верхним индексом 1 соответствуют датчику, который прикреплен к ноге, делающей первый шаг; переменные с верхним индексом 2 – другому датчику). Функции predict и correct соответствуют шагам прогноза и коррекции фильтра Калмана (см. Алг. 1).

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

А. Описание экспериментов

Для верификации предлагаемого подхода была выбрана следующая методология. В процессе эксперимента к ногам испытуемого с помощью специальных эластичных креплений монтировались два ИИБ. Также у испытуемого находился смартфон, получающий и записывающий в режиме реального времени данные от ИИБ. Наконец, для построения высокоточных референсных траекторий испытуемый был оснащен GNSS-приемником, работающим в RTK-режиме. Переносная GNSS-база была смонтирована на расстоянии, не превышающем 500 м от рабочей зоны эксперимента. Рис. 3 содержит визуальное пояснение расположения оборудования.

С инженерной точки зрения для осуществления верификации необходимо решить несколько задач: 1) беспроводной сбор сенсорных данных с закрепленных на ногах инерциальных блоков; 2) синхронизация во времени собранных данных от инерциальных блоков с учетом слабой точности внутренних тактовых генераторов; 3) получение высокоточного референсного RTK-решения от GNSS приемника; 4) синхронизация и сравнение референсного RTK-решения и навигационного решения, полученного с помощью предлагаемых алгоритмов.

Для сбора инерциальных данных с ног испытуемого были использованы модули MIMU22BLPX¹ (рис. 3г), в которых в качестве сенсорных элементов задействованы измерительные микросхемы Invensense MPU-9250². Каждый из модулей содержит массив из четырех Invensense MPU-9250, расположение и ориентация которых позволяет минимизировать систематические ошибки. Каждая из микросхем Invensense MPU-9250 включает в себя

¹ URL: http://www.inertiaelements.com/%20documents/mimu22bl/MIMU22BL_product-brief.pdf. [URL: http://www.inertiaelements.com/%20documents/mimu22bl/MIMU22BL_product-brief.pdf]

² URL: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>. [URL: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>]



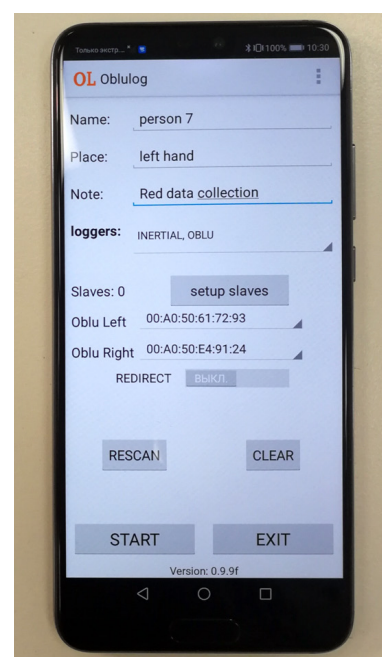
Рис. 3. Визуальное пояснение расположения оборудования: (а) экспериментатор, оснащенный закрепленной на шлеме антенной GNSS приемника, смартфоном для записи данных и двумя ИИБ на ногах (за пределами кадра); (б) ИИБ, прикрепленный на ногу экспериментатора; (в) базовая станция GNSS для получения референсного RTK-решения; (г) ИИБ MIMU22BLPX крупным планом

трехосевые акселерометры, гироскопы и магнетометры. Блоки MIMU22BLPX, помимо измерительных микросхем, содержат приемо-передатчик Bluetooth Low Energy и аккумулятор, позволяющий работать автономно в течение достаточного времени. Массогабаритные характеристики блоков определяются размером $42.2 \times 27.9 \times 17.0$ мм и весом в 20 г. Использование беспроводного интерфейса Bluetooth LE позволяет получать данные от блоков с частотой 125 Hz. ИИБ крепятся к ногам с помощью эластичного крепления, гарантирующего неподвижность блоков относительно голенистопа испытуемого, достаточную для получения качественных данных.

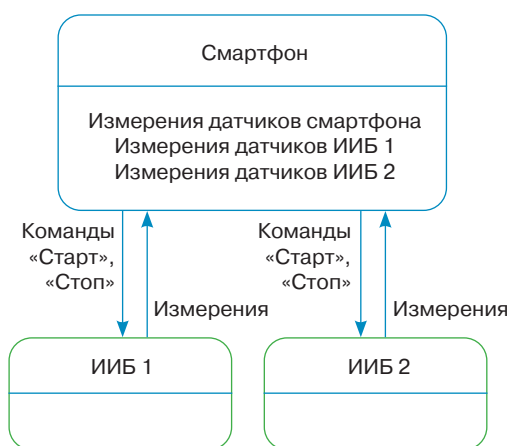
Для записи измерений блоков было разработано программное обеспечение (ПО) для смартфона, позволяющее записывать данные измерительных блоков в беспроводном режиме. ПО содержит интерфейс управления для старта и остановки записи данных ИИБ. Во время эксперимента данные в режиме реального времени передаются на управляющий смартфон и накапливаются в нем. Внешний вид интерфейса ПО отражен на рис. 4а. Общая логика работы программно-аппаратного комплекса проиллюстрирована на рис. 4б. Местоположение смартфона во время записи данных не принципиально. Также ПО позволяет одновременно записывать данные от инерциальных датчиков нескольких смартфонов (датасет, содержащий синхронизированные данные нескольких смартфонов и двух ИИБ на ногах, подробно представлен в работе [5]). Пост-обработка данных от ИИБ, включающая временную синхронизацию блоков и построение единого навигационного решения, осуществляется позже на вычислительной машине.

Б. Синхронизация устройств

Каждый пакет с данными сенсоров от обоих ИИБ содержит информацию о времени. Однако использование относительно недорогих ИИБ имеет существенный недостаток, связанный с низкой точностью



(а)



(б)

Рис. 4. Аппаратно-программное обеспечение для сбора данных: (а) интерфейс ПО для смартфона; (б) общая логика работы аппаратно-программного комплекса

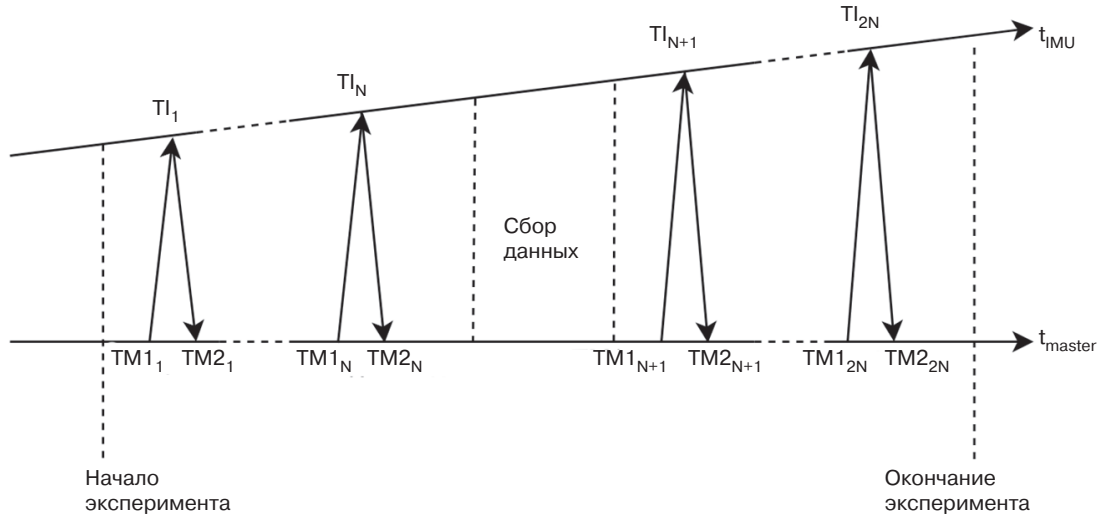


Рис. 5. Временная диаграмма обмена синхронизационными данными управляющего смартфона и инерциального модуля во время эксперимента

внутренних часов. Причем частота внутреннего тактового генератора меняется в ходе эксперимента, поэтому предварительной временной калибровки блоков недостаточно. Решением проблемы синхронизации могла бы оказаться фиксация времени получения пакетов от ИИБ на смартфоне. Но и этот вариант не работает из-за буферизации процесса передачи данных через беспроводной канал. Поэтому необходим дополнительный алгоритм синхронизации измерений датчиков в режиме пост-обработки.

Предлагаемый подход основывается на предположении о том, что зависимость времени ИИБ от времени управляющего смартфона может быть линейно аппроксимирована с достаточной точностью. Таким образом, необходимо вычислить коэффициент масштабирования и коэффициент сдвига b . Для этого в начале и в конце эксперимента осуществляются несколько сеансов обмена сообщениями, помеченными временными метками, согласно рис. 5. Каждый такой сеанс описывается вектором вида $[TM1_i, TI_i, TM2_i]$, где $TM1_i$ – время отправки сообщения от управляющего смартфона к измерительному блоку (здесь и далее, i – номер сеанса); TI_i – время фиксации полученного сообщения во временной шкале ИИБ и время отправления нового сообщения к смартфону; $TM2_i$ – время получения смартфоном последнего сообщения.

Модель синхронизации основана на работе [15], при этом в алгоритм вводятся модификации, позволяющие учесть особенности аппаратной системы. Исходя из предположения о линейной зависимости времени ИИБ от времени управляющего смартфона, для всех сеансов обмена сообщениями, представленных на рис. 5, будет справедливо следующее соотношение:

$$TM1_i < aTI_i + b < TM2_i,$$

Это позволяет определить интервалы значений, которым принадлежат a и b , путем решения задач линейного программирования LP1 и LP2:

$$LP1: \begin{cases} c^T x \rightarrow \min, \\ Ax < B, \end{cases} \quad LP2: \begin{cases} c^T x \rightarrow \max, \\ Ax < B, \end{cases}$$

где введены обозначения:

$$x = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} TI_1 & 1 \\ -TI_1 & -1 \\ \dots & \dots \\ TI_{2N} & 1 \\ -TI_{2N} & -1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} TM2_1 \\ -TM1_1 \\ \dots \\ TM2_{2N} \\ -TM1_{2N} \end{bmatrix}.$$

Если вектор $x_1 = [a_1, b_1]^T$ является решением задачи LP1, а $x_2 = [a_2, b_2]^T$ – решение задачи LP2, то интервалы значений, которым принадлежат a и b , имеют следующий вид:

$$a_1 \leq a \leq a_2,$$

$$\min(b_1, b_2) \leq b \leq \max(b_1, b_2),$$

и в качестве коэффициентов синхронизации можно выбрать:

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2}, \quad b = \frac{b_1 + b_2}{2}.$$

Решения задач линейного программирования, с учетом сделанных допущений, можно получить, например, с помощью симплекс-метода [16].

При составлении закона преобразования времени ИИБ во время управляющего смартфона, следует

учесть, что Bluetooth LE вносит задержку в прием и передачу сигнала, определяемую экспериментально. На практике такую задержку можно считать постоянной. В тестируемой системе данная задержка составила $\Delta_{ble} \approx 0.03$ с. Таким образом, для синхронизации было использовано соотношение:

$$t_I^M = at_I^I + b - \Delta_{ble},$$

где I – целочисленная неоднозначность фазовых измерений; t_I^M – время ИИБ во временной шкале управляющего смартфона; t_I^I – время ИИБ в собственной временной шкале.

Определение текущего времени на смартфоне, работающем под управлением ОС Android, осуществлялось при помощи метода *SystemClock.elapsedRealtime()*. Данный метод возвращает количество миллисекунд, прошедших после включения телефона³. При использовании данного метода исключается возможность влияния алгоритмов синхронизации, работающих на уровне ОС. Определение времени на ИИБ осуществлялось при помощи запроса текущего времени модуля.

Точность работы алгоритма синхронизации определялась путем проведения серии экспериментов, в ходе которых управляющему телефону и ИИБ придавалось одновременное вращение, после чего проводилось сопоставление показаний их гироскопов. В результате было определено, что рассогласование по времени между данными ИИБ и данными управляющего смартфона не превышает 10 мс на десятиминутной траектории.

В. Референсное RTK-решение

Поскольку рассматриваемый в работе подход предполагает точность в единицы метров, референсные данные для его верификации должны быть точнее на 1–2 порядка. В этой связи использование типового GNSS-приемника является неудовлетворительным решением. Хорошо известно, что определение положения при помощи спутниковых навигационных систем основано на измерении времени распространения радиосигнала от нескольких спутников до приемника. При этом выделяют два типа измерений: 1) кодовые, фиксирующие смещение псевдослучайной последовательности (псевдодалности) pr , которой модулирован несущий сигнал; 2) фазовые, фиксирующие смещение фазы ph несущей радиосигнала. Модели этих измерений имеют следующий вид:

$$pr = \rho(x_{sv}, x_{rcv}) + c(\tau_{sv} + \tau_{rcv}) + \Delta_{ion} + \Delta_{trop} + r_{pr},$$

$$ph = \frac{1}{\lambda} \rho(x_{sv}, x_{rcv}) + \frac{c}{\lambda} (\tau_{sv} + \tau_{rcv}) - \frac{1}{\lambda} \Delta_{ion} + \frac{1}{\lambda} \Delta_{trop} + I + r_{ph},$$

где x_{rcv} – координаты приемника; x_{sv} – координаты навигационного спутника; $\rho(x_{sv}, x_{rcv})$ – геометрическое расстояние между спутником и приемником; τ_{rcv} – ошибка часов приемника; τ_{sv} – ошибка часов спутника; Δ_{ion} – задержка сигнала в ионосфере Земли; Δ_{trop} – задержка сигнала в тропосфере планеты; r_{ph} и r_{pr} – немоделируемые (случайные) ошибки измерений фазы и псевдодалности соответственно; I – целочисленная неоднозначность фазовых измерений; c – скорость света в вакууме; λ – длина волны несущего радиосигнала.

Для типового подхода в решении задачи навигации по измерениям псевдодалностей оцениваемыми параметрами являются координаты и ошибка часов приемника. При наличии измерений от четырех и более спутников в один момент времени решается задача оптимизации:

$$[\tilde{x}_{rcv}, \tilde{\tau}_{rcv}] = \arg \min_{x, \tau} \sum_j (z_{pr}^j - \rho(x_{sv}^j, x) - c\tau)^2,$$

где $z_{pr}^j = pr^j - c\tau_{sv}^j - \Delta_{ion}^j - \Delta_{trop}^j$; индекс j обозначает номер спутника. Точность определения параметров составляет от единиц до десятков метров. Это связано с точностью измерения псевдодалностей, ошибкой моделирования дополнительных слагаемых и вычислением координат спутников по эфемеридной информации. Подобная точность для референсного решения является недостаточной.

Точность фазовых измерений значительно выше, чем у псевдодалностей (до нескольких миллиметров), но их неоднозначность I не позволяет полностью реализовать этот потенциал при оценке координат в стандартном режиме. Однако ошибки параметров спутника (x_{sv} , τ_{sv}) медленно меняются во времени и их можно считать одинаковыми для всех приемников. Задержки сигнала в атмосфере Земли зависят от пути распространения сигнала и сильно коррелируют для приемников на небольшом расстоянии друг от друга (до нескольких километров). Поэтому при использовании двух приемников, можно достичь более высокой точности определения их относительного положения в реальном времени. Для этого используются двойные разности измерений фазы и псевдодалностей, в которых отсутствуют дополнительные слагаемые, кроме фазовых неоднозначностей:

³ URL: [https://developer.android.com/reference/android/os/SystemClock.html#elapsedRealtime\(\)](https://developer.android.com/reference/android/os/SystemClock.html#elapsedRealtime()). [URL: http://www.inertialelements.com/%20documents/mimu22bl/MIMU22BL_product-brief.pdf]

$$\Delta\Delta ph = \frac{1}{\lambda} \left[\rho(x_{sv}^j, x_{rov}) - \rho(x_{sv}^0, x_{rov}) - \rho(x_{sv}^j, x_{base}) + \rho(x_{sv}^0, x_{base}) \right] + \Delta\Delta I + \Delta\Delta r_{ph}, \quad (5)$$

$$\Delta\Delta pr = \rho(x_{sv}^j, x_{rov}) - \rho(x_{sv}^0, x_{rov}) - \rho(x_{sv}^j, x_{base}) + \rho(x_{sv}^0, x_{base}) + \Delta\Delta r_{pr}, \quad (6)$$

где $\Delta\Delta r_{ph}$, $\Delta\Delta r_{pr}$ – немоделируемые ошибки двойных разностей, которые включают в себя остаточные ошибки от ионосферных и тропосферных задержек и от вычисления параметров спутников. Двойные разности составляются между измерениями от двух спутников и двух приемников (неподвижной базой и ровером). Обычно выбирается один ведущий спутник, и его измерения вычитаются из остальных. Подобный подход к построению навигационного решения часто называют RTK (Real Time Kinematic). В RTK-решении применяется фильтр для оценки параметров, которые включают в себя неоднозначности фазовых измерений ($\Delta\Delta I$), после чего на основе измерений (5)–(6) восстанавливается относительное положение ровера ($x_{rov} - x_{base}$).

Для получения качественных референсных траекторий эксперименты проводились под открытым небом вдали от высоких построек. Использовались два 72-канальных одночастотных GNSS приемника Emlid Reach M+⁴, которые позволяют записывать измерения псевдодальностей и фаз, а также навигационные сообщения от спутников с частотой 5 Гц. Использовались активные антенны, экранированные снизу радионепроницаемой пластиной, для исключения приема переотраженного сигнала. Базовый GNSS-приемник был закреплен на неподвижной треноге в течение всего эксперимента. Второй GNSS-приемник (подвижный) был закреплен на шлеме экспериментатора. После окончания эксперимента

наборы данных от базового и подвижного приемников совместно обрабатывались с помощью программы *rtkexplorer*⁵, которая формирует окончательное навигационное решение. Заявленная точность подобного решения составляет порядка 1 см в горизонтальной плоскости.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 показаны траектории, полученные с помощью фильтра Калмана [6] (без учета замкнутости траекторий, но с использованием сглаживания), а также траектории, полученные с помощью Алг. 1 и Алг. 2 (зеленые траектории соответствуют левой ноге, синие – правой, красным цветом обозначена усредненная траектория). Кроме того, на рис. 6г сравниваются полученная усредненная траектория и RTK-решение (обозначено фиолетовым цветом). Использование предложенных алгоритмов позволяет существенно скорректировать восстановленные траектории.

В случае, когда доступен только один ИИБ, для восстановления траекторий предлагается использовать Алг. 1, однако для оценки его результатов не представляется возможным с достаточной точностью вычислить отклонение построенных решений от реальных траекторий. Это связано с тем, что во время ходьбы положение отдельной ноги, в отличие от центра масс человека, вообще говоря, не совпадает с положением RTK-приемника. Тем не менее, оценками могут служить DTW-расстояния между независимо построенными траекториями левой и правой ног. В таблице 1 представлены DTW-расстояния, полученные без учета и с учетом замкнутости траекторий.

В таблице 2 представлены максимальные отклонения результатов Алг. 2 от соответствующих им RTK-решений (под отклонением понимается евклидово расстояние между точками траекторий

⁴ URL: <https://emlid.com/reach/>. [URL: <https://emlid.com/reach/>]

⁵ URL: <http://rtkexplorer.com/>. [URL: <http://rtkexplorer.com/>]

Таблица 1. Результаты работы алгоритмов, использующих один ИИБ

N	Длительность эксперимента, с	Длина траектории, м	DTW-расстояние в результате Алг. [6], м	DTW-расстояние в результате Алг. 1, м
1	88.3	71.92	0.45	0.09
2	200.9	218.45	3.57	0.64
3	203.0	225.54	1.04	0.44
4	215.0	240.39	4.93	0.50
5	321.0	382.09	1.89	2.07
6	342.1	373.05	16.27	2.21
7	625.5	706.68	13.96	5.49

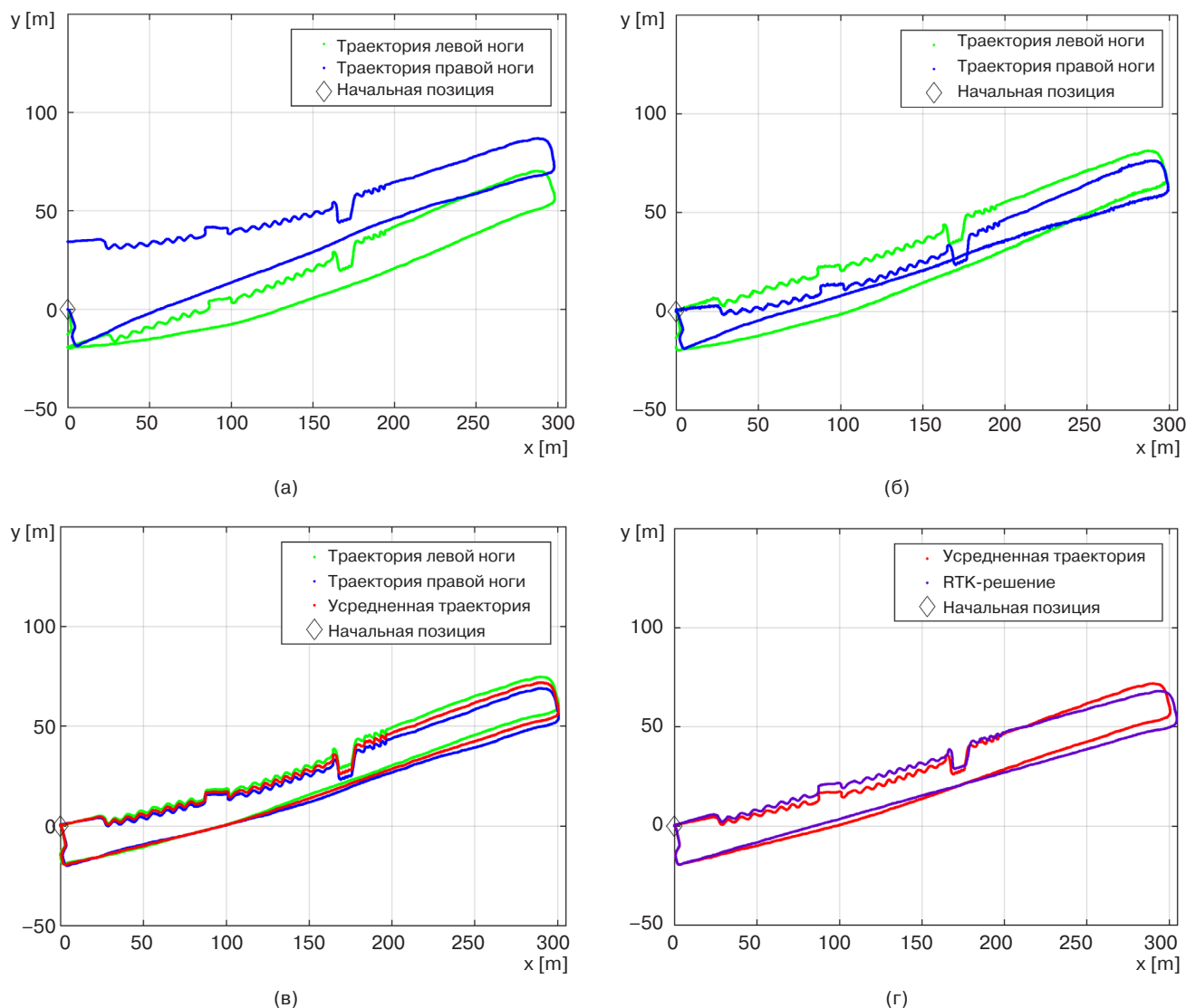


Рис. 6. Сравнение результатов алгоритмов на одном и том же эксперименте:

- (а) алгоритм [6] – траектории левой и правой ног восстанавливаются независимо друг от друга;
(б) алг. 1 – траектории восстанавливаются независимо, но с учетом их замкнутости; (в) алг. 2 – одновременно используются оба ИИБ, учитывается замкнутость; (г) сравнение результата Алг. 2 с RTK-решением

в фиксированный момент времени) на экспериментальном наборе траекторий, а также для каждого эксперимента указано максимальное отношение от-

клонения к длине пройденного пути. В приведенных примерах величины максимального отклонения составляют не более 2% от полных длин траекторий.

Таблица 2. Результаты работы алгоритма 2, использующего два ИИБ

N	Длительность эксперимента, с	Длина траектории, м	Максимальное отклонение, м	Макс. отношение отклонения к длине пройденного пути
1	88.3	71.92	0.53	0.03
2	200.9	218.45	2.08	0.06
3	203.0	225.54	1.15	0.02
4	215.0	240.39	3.94	0.04
5	321.0	382.09	6.57	0.09
6	342.1	373.05	3.16	0.09
7	625.5	706.68	6.01	0.11

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены алгоритмы для восстановления замкнутых траекторий движения пешехода на основе информации об ускорениях и угловых скоростях (для одного и для двух инерциальных измерительных блоков, прикрепленных к ногам), приведен соответствующий псевдокод. Предложены два способа сравнения полученных траекторий, рассмотрены их достоинства и недостатки, а также указан способ оптимизации времени вычислений. Кроме того, предлагается способ построения одной усредненной траектории движения человека по двум траекториям движения инерциальных измерительных блоков, закрепленных на каждой из его ног. Для верификации результатов разработан программно-аппаратный

комплекс, позволяющий одновременно записывать данные инерциальных модулей, сенсоров смартфона и высокоточных GNSS-приемников, работающих в RTK-режиме. Рассмотрены задачи синхронизации оборудования. Предложенные алгоритмы продемонстрировали достаточную точность на экспериментальных данных, собранных с помощью дешевого и удобного оборудования, что позволяет использовать данный подход к построению референсных траекторий для решения задач пешеходной навигации для смартфонов как классическими методами, так и методами машинного и глубокого обучения.

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. Woodman O.J. An introduction to inertial navigation. *Technical Report UCAM-CL-TR-696*. 2007. 37 p. URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>
2. Chen C., Zhao P., Lu C.X., Wang W., Markham A., Trigoni N. Deep-Learning-Based Pedestrian Inertial Navigation: Methods, Data Set, and On-Device Inference. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020;7(5):4431–4441.
3. Herath S., Yan H., Furukawa Y. RoNIN: Robust Neural Inertial Navigation in the Wild: Benchmark, Evaluations, & New Methods. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020, p. 3146–3152.
4. Wang Q., Luo H., Ye L., Men A., Zha, F., Huang, Y., Ou C. Pedestrian heading estimation based on spatial transformer networks and hierarchical LSTM. *IEEE Access*. 2019;7:162309–162322. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950728>
5. Bayev A., Chistyakov I., Derevyankin A., Gartseev I., Nikulin A., Pikhletsky M. RuDaCoP: The dataset for smartphone-based intellectual pedestrian navigation. In: *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. Pisa, Italy, 2019, p. 1–8. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2019.8911823>
6. Colomar D.S., Nilsson J.-O., Händel P. Smoothing for ZUPT-aided INSs. In: *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. Sydney, NSW, Australia, 2012, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2012.6418869>
7. Nilsson J.-O., Skog I., Händel P., Hari K.V.S. Foot-mounted INS for everybody — an open-source embedded implementation. In: *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. Myrtle Beach, SC, USA, 2012, p. 140–145. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236875>
8. Nilsson J.-O., Gupta A.K., Händel P. Foot-mounted inertial navigation made easy. In: *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. 2014, p. 24–29.
9. Skog I., Handel P., Nilsson J.-O., Rantakokko J. Zero-velocity detection: An algorithm evaluation. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2010;57(11):2657–2666. <https://doi.org/10.1109/TBME.2010.2060723>
10. Chistyakov I.A., Nikulin A.A., Gartseev I.B. Pedestrian dead-reckoning algorithms for dual foot-mounted inertial sensors. In: *2019 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. St. Petersburg, Russia, 2019, p. 1–8. <https://doi.org/10.23919/ICINS.2019.8769341>
11. Eiter T., Mannila H. Computing discrete Fréchet distance. *Technical Report CD-TR 94/64*. Christian Doppler Laboratory for Expert Systems. 1994:636–637.
12. Müller M. Dynamic Time Warping. In: *Information Retrieval for Music and Motion*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2007. P. 69–84. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74048-3_4
13. Vaughana N., Gabrysa B. Comparing and combining time series trajectories using Dynamic Time Warping. *Procedia Computer Science*. 2016;96:465–474. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.08.106>
14. Niu X., Li Y., Kuang J., Zhang P. Data fusion of dual foot-mounted IMU for pedestrian navigation. *IEEE Sensors Journal*. 2019;19(12):4577–4584. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2902422>
15. Lemmon M.D., Ganguly J., Xia L. Model-based clock synchronization in networks with drifting clocks. In: *Proceedings of Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing*. Los Angeles, CA, USA, 2000, p. 177–184. <https://doi.org/10.1109/PRDC.2000.897300>
16. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to Algorithms*: 3rd Edition. The MIT Press; 2009. P. 864–878.

Об авторах

Чистяков Иван Александрович, аспирант кафедры системного анализа факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (119234, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 52). E-mail: chistyakov.ivan@yahoo.com. Scopus Author ID: 57212444724, <https://orcid.org/0000-0002-1029-3690>

Гришов Иван Владимирович, аспирант кафедры «Проблемы управления» Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: ivan.grishov@yandex.ru.

Никулин Алексей Андреевич, научный сотрудник ООО «КС Кадровый консалтинг» (115191, Москва, Большой Староданиловский пер., д. 2, стр. 7). E-mail: nikulin.alexey@huawei.com.

Пихлецкий Михаил Викторович, к.т.н., ведущий исследователь ООО «Техкомпания Хуавэй» (121614, Россия, Москва, Алтуфьевское шоссе, д. 1/7). E-mail: pikhletsky.mikhail@huawei.com.

Гарцев Илья Борисович, к.т.н., доцент кафедры «Проблемы управления» Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78); ведущий инженер ключевых проектов ООО «Техкомпания Хуавэй» (121614, Россия, Москва). E-mail: gartseev@mirea.ru. ResearcherID: Y-6501-2019, Scopus Author ID: 55973474600, <https://orcid.org/0000-0001-5866-3411>

About the authors

Ivan A. Chistyakov, Postgraduate Student, System Analysis Department, Lomonosov Moscow State University (1-52, Leninskie Gory, Moscow, 119234 Russia). E-mail: chistyakov.ivan@yahoo.com. Scopus Author ID: 57212444724, <https://orcid.org/0000-0002-1029-3690>

Ivan V. Grishov, Postgraduate Student, Control Problems Department, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: ivan.grishov@yandex.ru.

Alexey A. Nikulin, Researcher, KS Kadrovyi consulting (2-7, Bolshoi Starodanilovsky per., Moscow, 115191 Russia). E-mail: nikulin.alexey@huawei.com.

Mikhail V. Pikhletsy, Cand. Sci. (Eng.), Principal Researcher, Huawei (1/7 Altuf'evskoe sh., Moscow, 121614 Russia). E-mail: pikhletsy.mikhail@huawei.com.

Ilya B. Gartseev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Control Problems Department, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia); Lead Engineer of Key Projects, Huawei (1/7 Altuf'evskoe sh., Moscow, 121614 Russia). E-mail: gartseev@mirea.ru. ResearcherID: Y-6501-2019, Scopus Author ID: 55973474600, <https://orcid.org/0000-0001-5866-3411>

УДК 621.391.072

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией

Г.В. Куликов[@],
А.А. Лелюх,
Е.В. Баталов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме: Сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) применяются для высокоскоростной передачи информации во многих радиосистемах, в частности, в системах цифрового телевидения и в перспективе – в системах информационного обмена для аэромобильных абонентов. В любом когерентном приемнике, входящем в состав приемно-передающей аппаратуры, присутствует блок синхронизации, который строится на основе систем ФАПЧ. Однако любая система ФАПЧ имеет погрешности, которые приводят к неточностям формирования опорных колебаний и тактовых сигналов. Эти погрешности, в свою очередь, вызывают ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут приводить к возрастанию вероятности ошибки. В работе исследуется влияние погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Методами статистической радиотехники получены параметры распределений процессов в приемнике и проведена оценка вероятности битовой ошибки. Получены зависимости вероятности битовой ошибки от величины фазовой погрешности формирования опорных колебаний и от величины относительного смещения тактовых моментов, а также от отношения сигнал/шум. Показано, что указанные погрешности могут сильно снижать помехоустойчивость приема, и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается. При допустимой величине энергетических потерь при приеме, равной 0.5 дБ за счет каждой из этих погрешностей, допустимая фазовая погрешность составляет от $\sim 3^\circ$ при $M = 4$ до $\sim 1^\circ$ при $M = 64$, а допустимая погрешность тактовой синхронизации, соответственно, от $\sim 5\%$ при $M = 4$ до $\sim 2\%$ при $M = 64$. Для обеспечения более жестких требований к величине потерь требования к указанным погрешностям существенно возрастают.

Ключевые слова: квадратурная амплитудная модуляция, фаза опорных колебаний, тактовая синхронизация, погрешность, отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 18.09.2020 • Доработана: 21.09.2020 • Принята к опубликованию: 12.11.2020

Для цитирования: Куликов Г.В., Лелюх А.А., Баталов Е.В. Влияние погрешностей фазовой и тактовой синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):35–43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Influence of phase and clock synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation

Gennady V. Kulikov[@],
Andrey A. Lelyukh,
Evgenii V. Batalov

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

Abstract. Signals with quadrature amplitude modulation (QAM) is widely used for high-speed transmission of information in many radio systems and, in particular, in digital television systems. In the receiver, which is part of the transceiver equipment of such systems, there is a block for the formation of reference oscillations and a clock synchronization block. Due to hardware instabilities and propagation conditions, phase and clock errors may occur, which cause additional errors during demodulation of the received signal, and which can significantly impair the noise immunity of the reception. The paper investigates the effect of phase and clock synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of QAM signals. Using the methods of statistical radio engineering, the parameters of the distributions of processes in the receiver are obtained and the probability of bit error is estimated. The dependences of the probability of bit error on the magnitude of the phase error in the formation of the reference oscillations and on the relative displacement of the clock moments, as well as on the signal-to-noise ratio, are obtained. It is shown that these errors can greatly reduce the noise immunity of the reception, and with an increase in the positioning of the signals, this effect increases. If we assume that the admissible reception energy loss is 0.5 dB due to each of these errors, then the allowable phase error is from $\sim 3^\circ$ at $M = 4$ to $\sim 1^\circ$ at $M = 64$, and the allowable clock synchronization error, respectively, is from $\sim 5\%$ at $M = 4$ to $\sim 2\%$ at $M = 64$. To provide more stringent requirements for the magnitude of losses, the requirements for the indicated errors increase significantly.

Keywords: quadrature amplitude modulation, reference oscillation phase, clock synchronization, error, signal-to-noise ratio, bit error probability

• Submitted: 18.09.2020 • Revised: 21.09.2020 • Accepted: 12.11.2020

For citation: Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Batalov E.V. Influence of phase and clock synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of signals with quadrature amplitude modulation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):35–43 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-35-43>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) применяется для высокоскоростной передачи информации во многих радиосистемах, в частности, в системах цифрового телевидения [1–3] и в перспективе – в системах информационного обмена для автомобильных абонентов [4].

В любом когерентном приемнике, входящем в состав приема-передающей аппаратуры, присутствует блок синхронизации, который строится на основе

систем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Однако любая система ФАПЧ имеет погрешности, которые приводят к неточностям формирования опорных колебаний и тактовых сигналов. Эти погрешности, в свою очередь, вызывают ошибки при демодуляции принимаемого сигнала, которые могут приводить к возрастанию вероятности ошибки [5–11].

Целью данной работы являлось исследование влияния погрешностей оценивания фазы несущей и погрешностей тактовой синхронизации на помехоустойчивость приема сигналов КАМ.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА СИГНАЛОВ КАМ

Сигнал КАМ на длительности канального символа T_s может принимать одно из M возможных значений:

$$s_i(t) = A_{cp} (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), t \in (0, T_s],$$

$$i = 0, 1, \dots, M-1, \quad (1)$$

где $A_{cp} = \sqrt{2E_{scp}/T_s}$ – средняя амплитуда сигнала; $E_{scp} = kE_{bcp}$ – энергия канального символа, средняя по всем информационным комбинациям; $k = \log_2 M$, E_{bcp} – средняя энергия, приходящаяся на один бит информации; I_i и Q_i – коэффициенты, определяющие амплитуды квадратурных компонент сигнала; ω_0 – несущая частота.

Рассмотрим работу когерентного приемника сигнала (1), реализующего алгоритм по максимуму правдоподобия. Такой приемник вычисляет M интегралов свертки J_i принимаемого процесса:

$$x(t) = s_i(t) + n(t)$$

со всеми копиями сигнала – опорными колебаниями:

$$J_i = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} x(t)s_{опi}(t)dt.$$

Здесь $n(t)$ – белый гауссовский шум с одночастотной спектральной плотностью мощности N_0 и параметрами

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

Принятие решения в пользу того или иного канального символа осуществляется в результате сравнения интегралов J_i с учетом порогов, пропорциональных полуразности энергий соответствующих посылок m и i :

$$\delta_{mi} = \frac{E_{sm} - E_{si}}{N_0} = \frac{E_{scp}}{N_0} [(I_m^2 + Q_m^2) - (I_i^2 + Q_i^2)].$$

В этом случае вероятности ошибочного приема канального символа и вероятность битовой ошибки (BER) при достаточно большом отношении сигнал/шум [12] с учетом кодирования Грея определяются следующим образом:

$$P_{es} = 1 - \prod_{i=0}^{M-1} p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m, \quad (2)$$

$$BER = P_{eb} = P_{es} / \log_2 M. \quad (3)$$

Неточности оценивания фазы несущей, приводящие к фазовым погрешностям формирования опорных колебаний, и погрешности тактовой синхронизации изменяют статистические параметры распределений на выходах всех корреляторов приемника и, соответственно, влияют на величины вероятностей символьной (2) и битовой (3) ошибки.

Распределения случайных процессов J_i являются нормальными и характеризуются средними значениями m_{mi} и дисперсиями D_{mi} . Следовательно

$$p_i(J_m - J_i > \delta_{mi})|_m = 1 - \Phi\left(\frac{m_{mi}}{\sqrt{D_{mi}}}\right), \quad (4)$$

$$\text{где } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

А. Влияние неточности оценивания фазы несущей

При наличии неточности работы системы ФАПЧ по фазе несущей частоты все опорные сигналы в схеме когерентного приема КАМ будут иметь некоторый фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ (рис. 1):

$$s_{опi}(t) = I_i \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi) - Q_i \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi),$$

$$i = 0, 1, \dots, M-1.$$

Вычислим средние значения и дисперсии (в качестве примера расчет показан для сигнала с индексом «0»):

$$m_0 = \langle J_0 \rangle = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle \times$$

$$\times (I_0 \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi)) dt =$$

$$= \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle s_0(t) + n(t) \rangle \times$$

$$\times (I_0 \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi)) dt =$$

$$= \frac{A_{cp}^2 T_s (I_0^2 + Q_0^2)}{N_0} \cos \Delta\varphi.$$

$$m_i = \langle J_i \rangle = \frac{2A_{cp}}{N_0} \int_0^{T_s} \langle x(t) \rangle \times$$

$$\times (I_i \cos(\omega_0 t + \Delta\varphi) - Q_i \sin(\omega_0 t + \Delta\varphi)) dt =$$

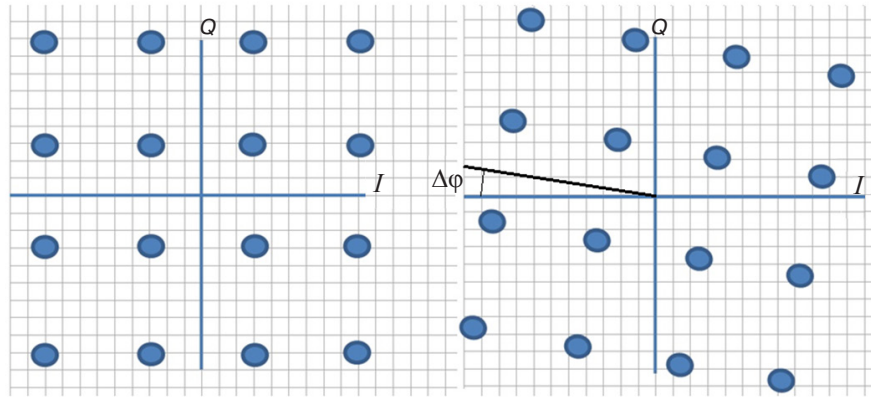


Рис. 1. Пример искажения сигнального созвездия 16КАМ при наличии ошибки оценивания фазы несущего колебания

$$= \frac{A_{\text{ср}}^2 T_s}{N_0} \left((I_0 I_i + Q_0 Q_i) \cos \Delta\varphi - (I_0 Q_i - I_i Q_0) \sin \Delta\varphi \right).$$

$$m_{mi} = m_0 - m_i = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \times \left((I_0^2 + Q_0^2 - I_0 I_i - Q_0 Q_i) \cos \Delta\varphi + (I_0 Q_i - I_i Q_0) \sin \Delta\varphi \right).$$

$$D_0 = \langle J_0^2 \rangle - \langle J_0 \rangle^2 = \langle J_0^2 \rangle - m_0^2 =$$

$$= \frac{4A_{\text{ср}}^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1)x(t_2) \rangle \times \\ \times (I_0 \cos(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi)) \times \\ \times (I_0 \cos(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi)) \times \\ \times dt_1 dt_2 - m_0^2 = m_0^2 + \frac{4A_{\text{ср}}^2}{N_0^2} \times \\ \times \frac{N_0}{2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} (I_0 \cos(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi) - \\ - Q_0 \sin(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi)) (I_0 \cos(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi) - \\ - Q_0 \sin(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi)) dt_1 dt_2 - m_0^2 = \\ = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0^2 + Q_0^2).$$

$$D_i = \langle J_i^2 \rangle - \langle J_i \rangle^2 = \langle J_i^2 \rangle - m_i^2 = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_i^2 + Q_i^2).$$

$$M_{0i} = \frac{4A_{\text{ср}}^2}{N_0^2} \int_0^{T_s} \int_0^{T_s} \langle x(t_1)x(t_2) \rangle \times \\ \times (I_0 \cos(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi) - Q_0 \sin(\omega_0 t_1 + \Delta\varphi)) \times$$

$$\times (I_i \cos(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi) - Q_i \sin(\omega_0 t_2 + \Delta\varphi)) \times \\ \times dt_1 dt_2 - m_0 m_i = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0 I_i + Q_0 Q_i).$$

$$D_{mi} = D_0 + D_i - 2M_{0i} = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0^2 + Q_0^2) + \\ + \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_i^2 + Q_i^2) - \frac{4E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0 I_i + Q_0 Q_i) = \\ = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left((I_0 - I_i)^2 + (Q_0 - Q_i)^2 \right).$$

Подставим выражения для среднего и дисперсии в (2)–(4) и получим зависимости вероятности битовой ошибки BER от параметров: отношения сигнал/шум $\text{SNR} = E_{\text{ср}}/N_0$ (дБ) и фазового сдвига $\Delta\varphi$. При вычислениях необходимо провести перебор всех возможных фазовых и амплитудных состояний сигнала КАМ и учесть нормировку по средней энергии. Для 16КАМ в зависимости от выбора сигнальной точки использованы корректирующие коэффициенты [13] $1/\sqrt{10}$ и $3/\sqrt{10}$, для 32КАМ – $1/\sqrt{20}$, $3/\sqrt{20}$ и $5/\sqrt{20}$, для 64КАМ – $1/\sqrt{42}$, $3/\sqrt{42}$, $5/\sqrt{42}$ и $7/\sqrt{42}$.

Графики зависимостей вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR для $M = 4, 16, 32, 64$ приведены на рис. 2, а от величины фазового сдвига $\Delta\varphi$ – на рис. 3.

Проведенное моделирование работы когерентного приемника при фазовой погрешности формирования опорных колебаний подтвердило правильность теоретических результатов. На рис. 2 дополнительно показаны точки, полученные в результате компьютерного эксперимента.

Из графиков видно, что неточность оценивания фазы несущей и, соответственно, фазовая погрешность формирования опорных колебаний, может сильно снижать помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ, и с увеличением позиционности

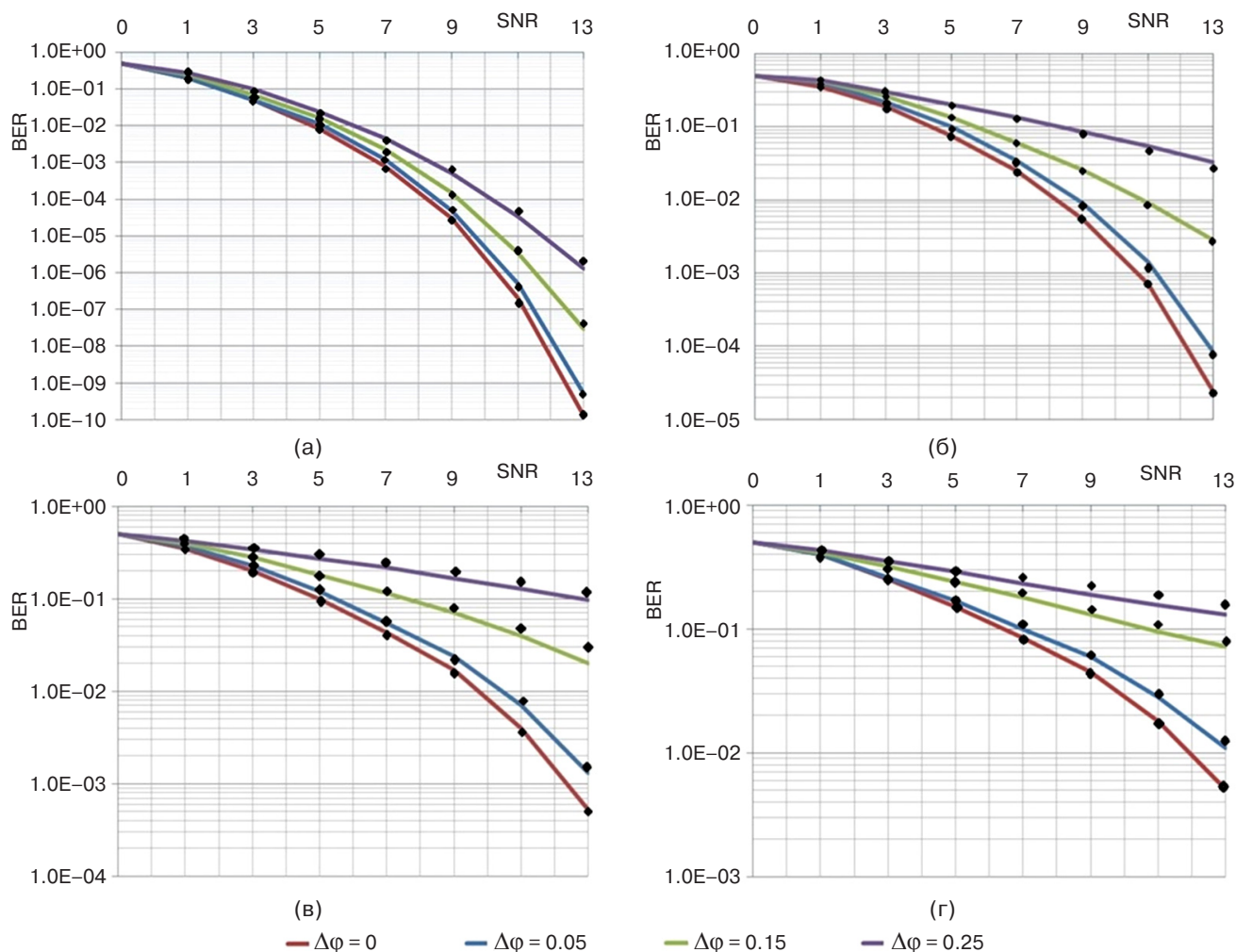


Рис. 2. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR при наличии фазовой ошибки формирования опорных колебаний: (а) 4КАМ; (б) 16КАМ; (в) 32КАМ; (г) 64КАМ

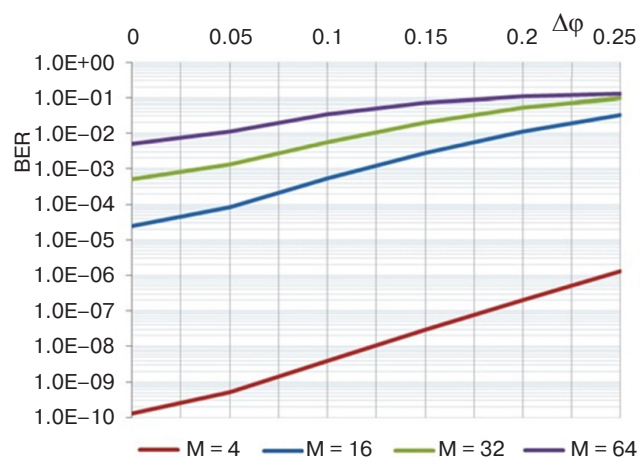


Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от фазового сдвига $\Delta\phi$

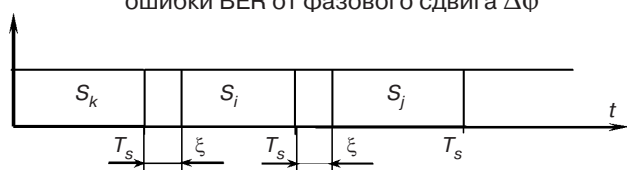


Рис. 4. Временное рассогласование при статистическом смещении тактовых моментов

сигналов это влияние усиливается. Так, фазовая погрешность $\Delta\phi = 0.15$ радиан ($8,5^\circ$) для $BER = 10^{-2}$ при $M = 4$ вызывает дополнительные энергетические потери около 1 дБ, при $M = 16$ – около 3 дБ, при $M = 32$ – около 5 дБ, а при $M = 64$ – около 9 дБ.

Б. Влияние статического смещения тактовых моментов

Предположим, что тактовая частота в приемнике соответствует номинальной, но все тактовые моменты смещены во времени на одинаковую величину ξ (статическое смещение) (рис. 4).

В этом случае в вычислении интегралов свертки будет использоваться реализация сигнала М-КАМ:

$$s(t) = \begin{cases} A_{cp} (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t); & t \in (\xi, T_s) \\ A_{cp} (I_j \cos \omega_0 t - Q_j \sin \omega_0 t); & t \in [T_s, T_s + \xi) \end{cases}$$

и опорные колебания:

$$s_{\text{опи}}(t) = A_{\text{ср}} (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t), t \in (\xi, T_s + \xi).$$

Интегралы свертки будут иметь вид:

$$J_i = \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s+\xi} x(t) s_{\text{опи}}(t) dt.$$

На выходах корреляторов средние значения m_0 и m_i определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} m_0 &= \langle J_0 \rangle = \\ &= \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s+\xi} \langle x(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s} \langle s_0(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin \omega_0 t) dt + \\ &+ \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{T_s}^{T_s+\xi} \langle s_j(t) \rangle (I_0 \cos \omega_0 t - Q_0 \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left((I_0^2 + Q_0^2) \left(1 - \frac{\xi}{T_s} \right) + (I_0 I_j + Q_0 Q_j) \frac{\xi}{T_s} \right). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_i &= \langle I_i \rangle = \\ &= \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s+\xi} \langle x(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{\xi}^{T_s} \langle s_0(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t) dt + \\ &+ \frac{2A_{\text{ср}}}{N_0} \int_{T_s}^{T_s+\xi} \langle s_j(t) \rangle (I_i \cos \omega_0 t - Q_i \sin \omega_0 t) dt = \\ &= \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left((I_0 I_i + Q_0 Q_i) \left(1 - \frac{\xi}{T_s} \right) + (I_i I_j + Q_i Q_j) \frac{\xi}{T_s} \right). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{mi} &= m_0 - m_i = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left\{ (I_0^2 + Q_0^2 - I_0 I_i - Q_0 Q_i) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\xi}{T_s} [(I_0 - I_j)(I_0 - I_i) + (Q_0 - Q_j)(Q_0 - Q_i)] \right\}. \end{aligned}$$

Дисперсии и смешанные моменты определяются по формулам:

$$\begin{aligned} D_0 &= \langle J_0^2 \rangle - \langle J_0 \rangle^2 = \\ &= \langle J_0^2 \rangle - m_0^2 = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0^2 + Q_0^2), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_i &= \langle J_i^2 \rangle - \langle J_i \rangle^2 = \\ &= \langle J_i^2 \rangle - m_i^2 = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_i^2 + Q_i^2), \end{aligned}$$

$$M_{0i} = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} (I_0 I_i + Q_0 Q_i).$$

$$D_{mi} = D_0 + D_i - 2M_{0i} = \frac{2E_{\text{ср}}}{N_0} \left((I_0 - I_i)^2 + (Q_0 - Q_i)^2 \right).$$

Подставив полученные выражения в (2)–(4), получим зависимости вероятности битовой ошибки BER от параметров: отношения сигнал/шум $\text{SNR} = E_{\text{ср}}/N_0$ (дБ) и величины относительного смещения тактовых моментов ξ/T_s . При вычислениях, как и ранее, проведен перебор всех возможных фазовых и амплитудных состояний сигнала КАМ и учтена нормировка по средней энергии.

Соответствующие графики для $M = 4, 16, 32, 64$ приведены на рис. 5 и 6.

Проведенное моделирование работы когерентного приемника при погрешностях работы системы тактовой синхронизации подтвердило правильность теоретических результатов. На рис. 5 дополнительно показаны точки, полученные в результате компьютерного эксперимента.

Из приведенных графиков видно, что смещение тактовых моментов также сильно влияет на помехоустойчивость когерентного приема сигналов КАМ. Величина относительного смещения всего в 3% ($\xi/T_s = 0.03$) для $\text{BER} = 10^{-2}$ при $M = 4$ вызывает энергетические потери около 0.4 дБ, при $M = 16$ – около 0.6 дБ, при $M = 32$ – около 0.8 дБ, а при $M = 64$ – более 1 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование влияния фазовых погрешностей при формировании опорных колебаний и погрешностей тактовой синхронизации при когерентном приеме сигналов КАМ позволяет сделать следующие выводы:

1. Указанные погрешности систем фазовой и тактовой синхронизации могут сильно снижать помехоустойчивость приема, и с увеличением позиционности сигналов это влияние усиливается.
2. Если допустить величину энергетических потерь при приеме, равную 0.5 дБ за счет каждой из этих погрешностей, то для $\text{BER} = 10^{-2}$ допустимая фазовая погрешность $\Delta\phi$ должна быть от $\sim 3^\circ$ при $M = 4$ до $\sim 1^\circ$ при $M = 64$, а допустимая погрешность тактовой синхронизации ξ/T_s , соответственно, от $\sim 5\%$ при $M = 4$ до $\sim 2\%$ при $M = 64$.

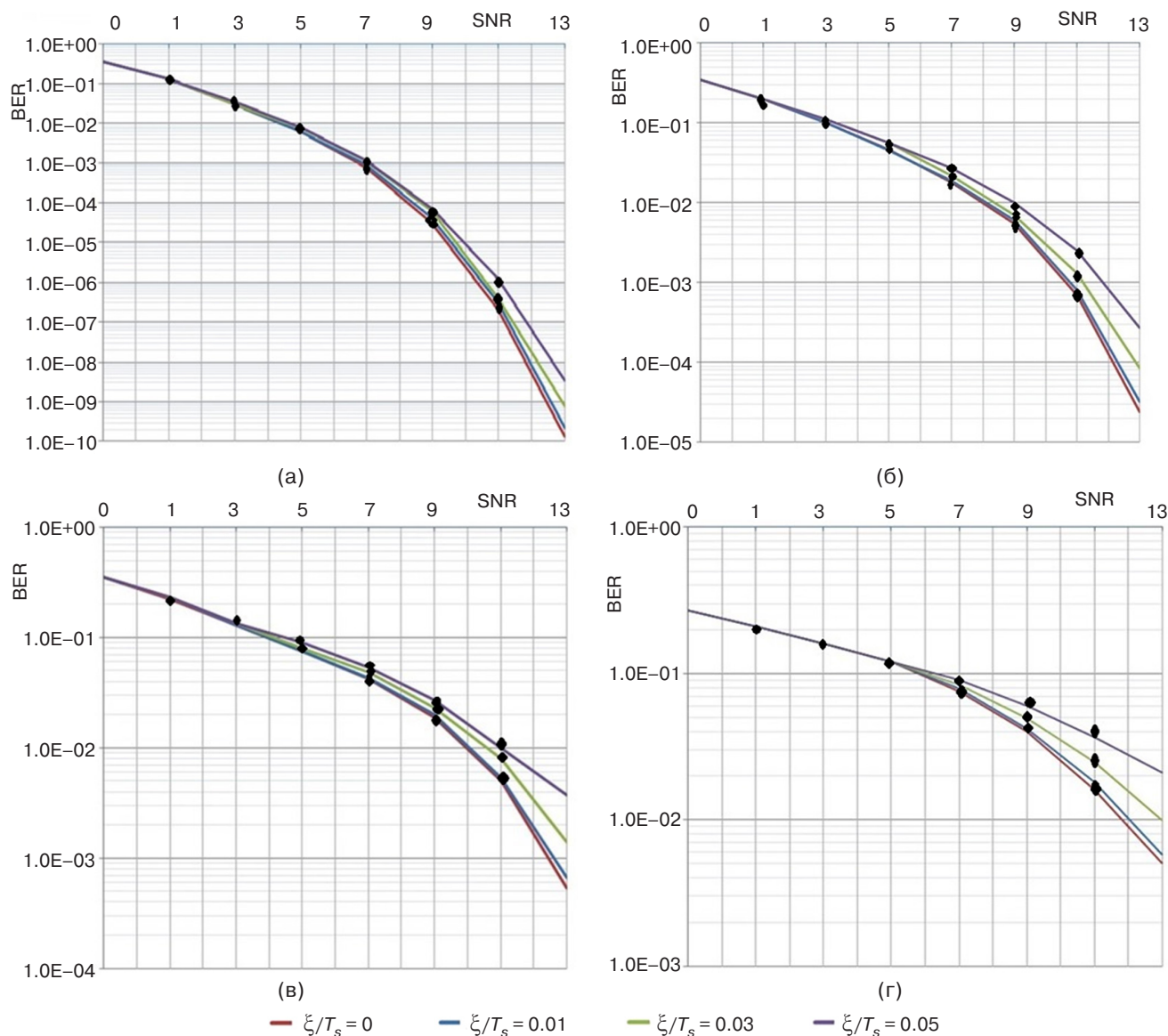


Рис. 5. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум SNR при наличии смещения тактовых моментов: (а) 4КАМ; (б) 16КАМ; (в) 32КАМ; (г) 64КАМ

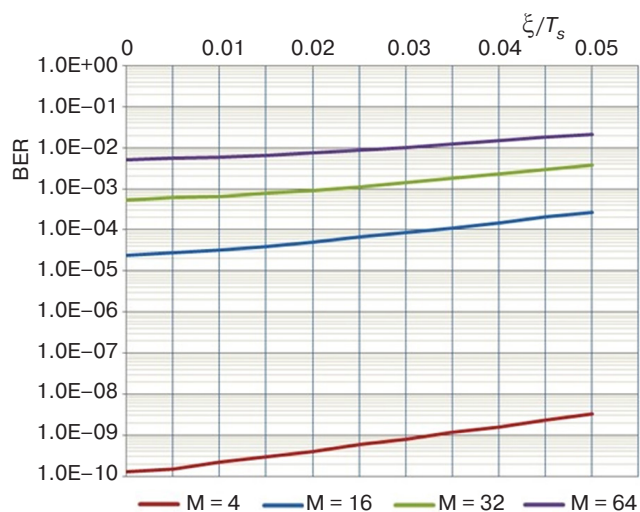


Рис. 6. Зависимости вероятности битовой ошибки BER от величины смещения тактовых моментов ξ/T_s

3. Для обеспечения более жестких требований к величине потерь и величине BER требования к указанным погрешностям существенно возрастают.

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. Digital Video Broadcasting (DVB). Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1. S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-1. March 2015. 115 p. URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2. S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-2. March 2015. 183 p. URL: <https://dvb.org/?standard=dvb-s2x-implementation-guidelines>
3. DVB. URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>
4. Нестеров А.В., Лелюх А.А., Гавриков Н.С., Куликов Г.В. Оценка энергетических характеристик радиолиний перспективных систем спутникового широкополосного доступа для аэромобильных абонентов. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.11>
5. Шахтарин Б.И., Иванов А.А., Кобылкина П.И., Рязанова М.А. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации. М.: Горячая линия – Телеком; 2011. 278 с. ISBN 978-5-99121-0177-3
6. Шахтарин Б.И. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации. М.: Гелиос АРВ; 2007. 256 с. ISBN 978-5-85438-174-1
7. Боев Н.М. Синхронизация цифровых систем связи по сигналам спутниковых радионавигационных систем. URL: <https://uav-siberia.com/news/sinkhronizatsiya-tsifrovyykh-sistem-svyazi-po-signalam-sputnikovykh-radionavigatsionnykh-sistem/>
8. Артеменко А.А., Мальцев А.А., Рубцов А.Е. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в m-КАМ системах передачи данных. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2007;2:81–87.
9. Пастухов А.С., Иванов Ю.А., Малышев С.И. Оценка вероятности битовых ошибок в системах связи 4G. *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2009;5(4):28–34.
10. Мирошникова Н.Е. Влияние ошибок синхронизации на прием цифровых сигналов. *T-Comm – Телекоммуникации и Транспорт*. 2013;9:112–114.
11. Куликов Г.В., Ван Зунг Нгуен. Влияние погрешностей синхронизации на помехоустойчивость когерентного приема сигналов М-ФМ. *Российский технологический журнал*. 2019;7(5):47–61. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
12. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь; 2000. 800 с. ISBN 5-256-01434-X

REFERENCES

1. Digital Video Broadcasting (DVB). Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 1. S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-1. March 2015. 115 p. URL: https://dvb.org/wp-content/uploads/2019/12/a171-1_s2_guide.pdf
2. Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2. S2 Extensions (DVB-S2X). Digital Video Broadcasting (DVB): DVB Document A171-2. March 2015. 183 p. URL: <https://dvb.org/?standard=dvb-s2x-implementation-guidelines>
3. DVB. URL: <https://www.dvb.org/standards/dvb-s2x>
4. Nesterov A.V., Lelyukh A.A., Gavrikov N.S., Kulikov G.V. Assessment of energy characteristics of radio lines of perspective systems of satellite broadband access for airmobile subscribers. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2019;1 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.11>
5. Shakhtarin B.I., Ivanov A.A., Kobylika P.I., Ryazanova M.A. *Sinkhronizatsiya v radiosvyazi i radionavigatsii (Synchronization in radio communication and radio navigation)*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2011. 256 p. (in Russ.). ISBN 978-5-99121-0177-3
6. Shakhtarin B.I. *Sinkhronizatsiya v radiosvyazi i radionavigatsii (Synchronization in radio communication and radio navigation)*. Moscow: Gelios ARV; 2007. 256 p. (in Russ.). ISBN 978-5-85438-174-1
7. Boev N.M. *Sinkhronizatsiya tsifrovyykh sistem svyazi po signalam sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem (Synchronization of digital communication systems using signals from satellite radio navigation systems)*. URL: <https://uav-siberia.com/news/sinkhronizatsiya-tsifrovyykh-sistem-svyazi-po-signalam-sputnikovykh-radionavigatsionnykh-sistem/>
8. Artemenko A.A., Maltsev A.A., Rubtsov A.E. Effect of the carrier-phase estimation error on the bit-error rate in M-QAM data transmission systems. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2007;2:81–87 (in Russ.).
9. Pastukhov A.S., Ivanov Yu.A., Malyshev S.I. Bit error probability estimation in 4G communication systems. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy = Electrical and Data processing Facilities and systems*. 2009;5(4):28–34 (in Russ.).
10. Miroshnikova N.E. Phase and timing synchronization error on digital receiver properties. *T-Comm: Telekommunikatsii i Transport = T-Comm: Telecommunications and Transportation*. 2013;9:112–114 (in Russ.).
11. Kulikov G.V., Van Dung N. Influence of synchronization errors on the noise immunity of coherent reception of

13. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2018;11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>
- M-PSK signals. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(5):47–61 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-5-47-61>
12. Proakis J. *Digital communications*. 5th ed. McGraw-Hill Comp.; 2008. 1150 p. [Proakis J. *Tsifrovaya svyaz'*. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 800 p. ISBN 5-256-01434-X]
13. Kulikov G.V., Nesterov A.V., Lelyukh A.A. Interference immunity of reception of signals with quadrature amplitude shift keying in the presence of harmonic interference. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2018;11 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.11.9>

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры 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>

Лелюх Андрей Александрович, аспирант кафедры 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: a.lal@mail.ru.

Баталов Евгений Вячеславович, студент Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: evgenijbatalov@yandex.ru.

About the authors

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the 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>

Andrey A. Lelyukh, 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: a.lal@mail.ru.

Evgenii V. Batalov, 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: evgenijbatalov@yandex.ru.

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.69

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-44-56>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Метод вибродиагностики технического состояния конструкций электронных средств

С.М. Лышов, С.У. Увайсов[®], В.В. Черноверская,
Ф.Л.К. Хань

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме. Рассмотрен метод вибродиагностики бортовых электронных средств, основанный на анализе резонансных частот. Представлен алгоритм диагностирования механических дефектов исследуемых блоков и узлов. Приведена структура комплекса программных средств автоматизации диагностирования и результаты реализации предложенного метода. Основная цель исследования – повышение достоверности идентификации конструктивных дефектов бортовых электронных средств. С этой целью разработана диагностическая модель конструкции устройства, позволяющая учесть разброс параметров электронного средства, как для исправного состояния, так и для состояния с дефектом. Переход от анализа амплитуд АЧХ к резонансным частотам, характеризующим физико-механические параметры конструкции, обусловлен большей стабильностью и меньшей погрешностью измерения этой характеристики. Для оценки допустимых отклонений резонансных частот от номинальных значений осуществлено имитационное статистическое моделирование с применением метода Монте-Карло. Повысить достоверность результатов физического эксперимента удалось за счет определения наилучшей, в плане получаемого отклика, точки размещения акселерометра. В статье представлена структура и описание алгоритма ее поиска. Приведены результаты апробации рассматриваемого метода на примере печатного узла делителя напряжения блока контроля летательного аппарата. В САПР *SolidWorks* смоделировано исправное состояние электронного средства, для которого были определены четыре резонансные частоты, а также состояние с дефектом в виде отрыва крепления. Анализ результатов показал смещение трех значений резонансных частот относительно значений, соответствующих исправному состоянию. Проведенная серия из 10 испытаний выявила дефект во всех 10 случаях (с допустимой погрешностью результата исследования). Это свидетельствует о высокой степени достоверности полученных данных, адекватности диагностической модели и корректности примененных алгоритмов.

Ключевые слова: вибрационное диагностирование, математическое моделирование, метод Монте-Карло, радиоэлектронное средство, резонансная частота, амплитудно-частотная характеристика, разброс резонансных частот

• Поступила: 14.07.2020 • Доработана: 31.07.2020 • Принята к опубликованию: 15.09.2020

Для цитирования: Лышов С.М., Увайсов С.У., Черноверская В.В., Хань Ф.Л.К. Метод вибродиагностики технического состояния конструкций электронных средств. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):44–56. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-44-56>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Method of vibration diagnostics of the technical condition of electronic equipment structures

Sergey M. Lyshov, Saygid U. Uvaysov[@],
Viktoriya V. Chernoverskaya, Pham L.Q. Han

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract. The article considers the method of vibration diagnostics of onboard electronic devices based on the analysis of resonant frequencies. An algorithm for diagnosing mechanical defects of the studied blocks and nodes is presented. The structure of the complex of software tools for diagnostics automation and the results of testing the proposed method are presented. The main goal of the research is to improve the accuracy of identification of design defects of on-Board electronic devices. The transition from the analysis of the frequency response to the resonant frequencies that characterize the physical and mechanical parameters of the structure is due to greater stability and lower measurement error of this characteristic. To achieve this goal, a diagnostic model of the method has been developed that allows taking into account the spread of parameters of the electronic tool, both for the serviceable state and for the state with a defect. To estimate the permissible deviations of resonant frequencies from the nominal values, statistical simulation was performed using the Monte Carlo method. It was also possible to increase the reliability of the results of the physical experiment by determining the best position of the accelerometer in terms of the response received. The article provides a structure and description of the algorithm for searching for it. The results of approbation of the considered method on the example of the printed node of the voltage divider of the control unit of the aircraft are presented. In CAD SolidWorks, the serviceable state of the test node was modeled, for which four resonant frequencies were determined, and the state with a defect in the form of a detachment of the attachment. Analysis of the results showed a shift of three values of resonant frequencies relative to the correct state. The conducted series of 10 tests revealed the defect in all 10 cases (with the permissible error of the research result). This indicates a high degree of reliability of the data obtained, the adequacy of the diagnostic model of the method and the correctness of the applied algorithms.

Keywords: vibration diagnostics, mathematical modeling, Monte Carlo method, electronic means, resonant frequency, amplitude-frequency characteristic, scatter of resonant frequencies

• Submitted: 14.07.2020 • Revised: 31.07.2020 • Accepted: 15.09.2020

For citation: Lyshov S.M., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Han Ph.L.Q. Method of vibration diagnostics of the technical condition of electronic equipment structures. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):44–56 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-44-56>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Конструктивная и схмотехническая сложность современных электронных средств (ЭС) может повлечь за собой снижение показателей их надежности и появление в процессе функционирования различных дефектов и неисправностей [1]. Наиболее частыми причинами появления конструктивных дефектов являются механические воздействия, которые испытывают электронные узлы и блоки в период своей эксплуатации.

Своевременное диагностическое обследование бортовой электроники позволяет определить слабые места конструктивного решения и уменьшить количество отказов оборудования.

При проведении испытаний электронных средств из известных методов неразрушающего контроля достаточно часто применяется вибродиагностика конструктивных элементов. Многолетний опыт подобных исследований показал их эффективность и экономичность, а анализ полученных результатов

свидетельствует о высокой степени достоверности получаемых данных [2].

Рассматриваемый в данной работе метод контроля и диагностики технического состояния бортовых ЭС в качестве диагностического признака использует резонансные частоты, непосредственно связанные с физико-механическими параметрами конструкции электронного средства [3].

Экспериментально было выявлено, что резонансная частота является более стабильной характеристикой, чем амплитуда частотной характеристики, и позволяет избежать неоднозначности, возникающей при анализе АЧХ, применявшейся в предыдущих методах вибродиагностики [4]. По наличию отклонения значений измеренной резонансной частоты от частоты «идеального» ЭС можно судить о присутствии дефекта в конструкции устройства и его локализации. Задающее воздействие на объект может быть подано как извне (вибростенд), так и встроенным эмулятором механических колебаний [5]. Для оценки допустимых отклонений резонансных частот от номинальных значений проводится имитационное статистическое моделирование с применением метода Монте-Карло [6, 7].

РАЗРАБОТКА МЕТОДА

Задачи, решаемые в процессе разработки метода диагностирования бортовых электронных средств, нацелены на обеспечение:

- контроля и диагностики механических дефектов, возникающих в процессе производства и эксплуатации ЭС;
- повышения количества выявляемых дефектов посредством оптимального размещения датчиков гармонических колебаний;
- минимизации временных затрат за счет дифференциации особенностей конструкции и режимов эксплуатации;
- требований технологий проектирования и производства ЭС;
- требований, предъявляемых к неразрушающим методам диагностирования.

Блок-схема разработанного метода представлена на рис. 1. Определение значений искомых характеристик осуществляется двумя независимыми способами: посредством проведения натурных испытаний с применением лабораторной установки и посредством проведения численного эксперимента и моделирования. Геометрическая модель ЭС (блок 3) формируется на этапе проектирования. Для повышения точности физического эксперимента, уменьшения погрешности проводимых расчетов и построения адекватной механической модели в конструкцию устройства интегрируются актуатор [8, 9]

и акселерометр (блоки 1 и 2). Ключевым моментом на данном этапе является определение точки установки акселерометра, координаты которой определяются по специально разработанному алгоритму размещения датчика.

В ходе физического эксперимента (блок 8) на ЭС подаются гармонические воздействия, генерируемые актуатором [10] или вибростендом (блок 7), а с акселерометров снимаются значения ускорений при соответствующих частотах (АЧХ) (блок 12). Затем полученные данные экспортируются в блок предварительной обработки (блок 15), результатом работы которого является нахождение значений искомых характеристик – резонансных частот F_p , характеризующих техническое состояние ЭС в текущий момент времени.

Получение результатов численного моделирования с целью дальнейшего сравнения их с результатами натурных испытаний предполагает выполнение предварительных этапов исследования, необходимых для формирования исходных данных и определения эталонных значений исследуемых характеристик.

Предварительно для исправного состояния ЭС формируется набор параметров и допусков на них Q (блок 5), т.е. создается модель исправного (образцового) ЭС. Аналогично, для каждого неисправного состояния ЭС, когда $q_j \neq Q$, формируется перечень дефектов (блок 4), рассчитываются наборы исследуемых параметров и создается база данных неисправностей ЭС.

На следующем этапе (блок 6) осуществляется расчет параметров ЭС методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Моделирование механических процессов, протекающих в БРЭС (блок 10), осуществляется с применением современных САПР *SolidWorks*, *АСОНИКА-М*, *АСОНИКА-ТМ*, *ANSYS* и реализованных в них сеточных методов исследования (метод конечных разностей и конечных элементов) (блок 11) [11, 12].

Для большей адекватности создаваемой модели в ней учитываются ограничения, накладываемые вибродатчиком, применяемым в физическом эксперименте (чувствительность, порог срабатывания). Для этого в систему моделирования добавлен фильтр по порогу чувствительности датчика (блок 9), позволяющий формировать в численном эксперименте значения параметров, соответствующие физическому эксперименту. Для расчета значений резонансных частот формируется совокупность математических моделей, которые учитывают различные виды дефектов, возникающие в ЭС [13].

Перед каждой итерацией моделирования механических процессов один из случайных наборов параметров q_i^k импортируется в программную среду

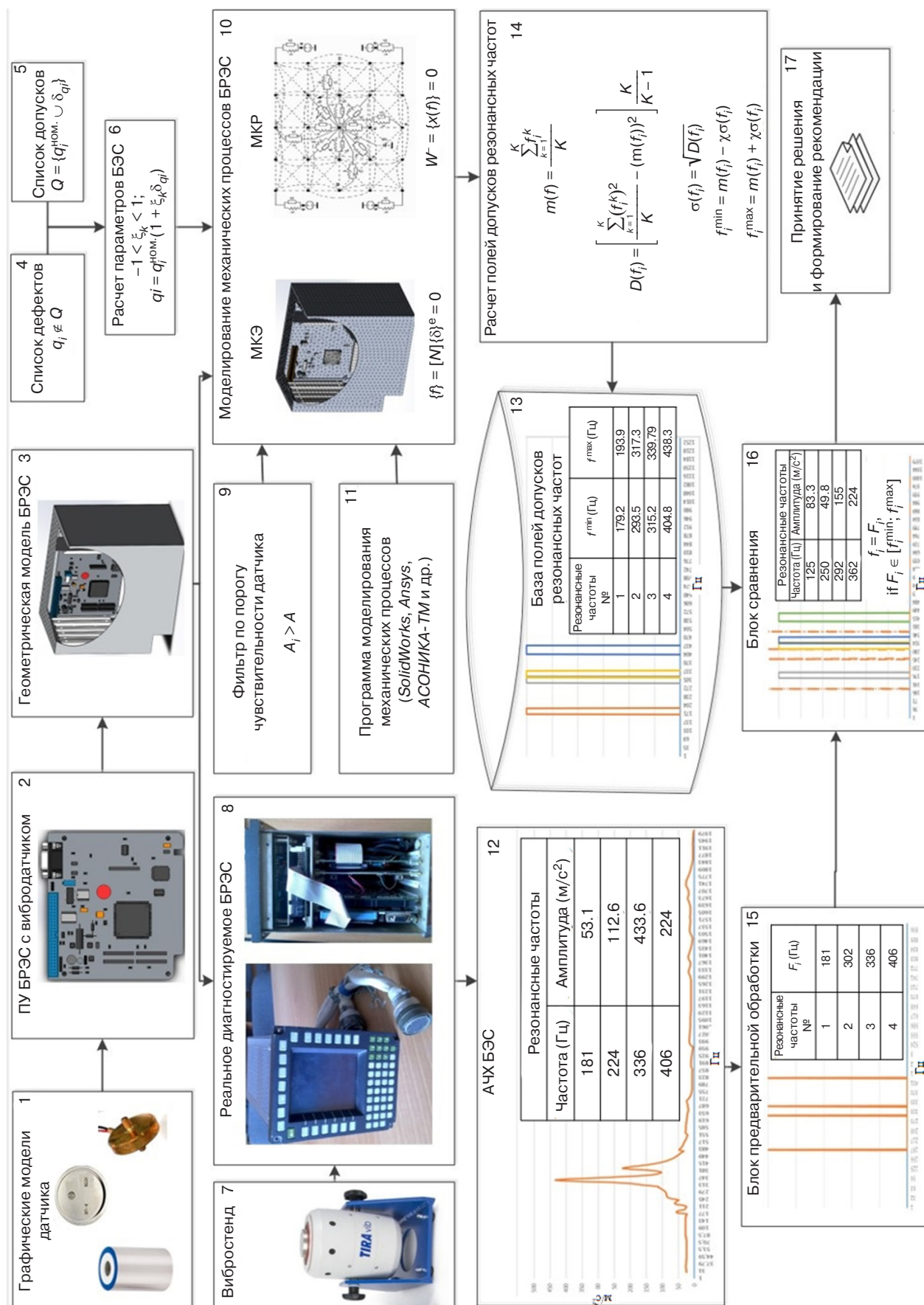


Рис. 1. Метод вибродиагностики технического состояния бортового электронного средства

выбранной САПР, где проводится расчет резонансных частот f_i^k . В результате многократного моделирования формируются наборы резонансных частот, которые учитывают геометрические и физико-механические допуски на реальные устройства.

На следующем этапе исследования, с помощью аппарата математической статистики, рассчитываются разбросы резонансных частот $[f_i^{\min}; f_i^{\max}]$ с учетом заданной доверительной вероятности χ (блок 14). Операция осуществляется как для исправного состояния ЭС, так и для ЭС с дефектами. Накопление и обработка информации обо всех возможных дефектах ЭС, полученных в результате численного эксперимента, позволяет сформировать базу данных резонансных частот для дальнейшего сравнительного анализа.

В блоке сравнения (блок 16) резонансные частоты, сформированные на этапе предварительной обработки, поочередно сравниваются с разбросами резонансных частот, хранящимися в базе данных, и в случае отклонения хотя бы одной частоты от допустимых значений разбросов ($F_i \notin [f_i^{\min}; f_i^{\max}]$)

устройство признается неисправным и производится его диагностика.

Процесс диагностики заключается в последовательном переборе полученных значений частот F_i , характеризующих дефект ЭС, и сравнении каждого из них с интервальными значениями диапазона частот для конкретного дефекта ЭС $[f_j^{\min}; f_j^{\max}]$.

По результатам сравнения принимается решение об исправности или неисправности электронного средства. В случае обнаружения неисправности в блоке принятия решений (блок 16), формируются рекомендации для ремонта ЭС и возвращения его в исправное состояние или по окончательной замене ЭС.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма для разработанного метода диагностирования механических дефектов конструкций БРЭС.

Как показали результаты экспериментальных исследований, на точность математической модели существенное влияние оказывают не только корректно введенные исходные данные, но и наилучшее с точки зрения формируемого отклика место расположения актюатора и акселерометра. Нахождение

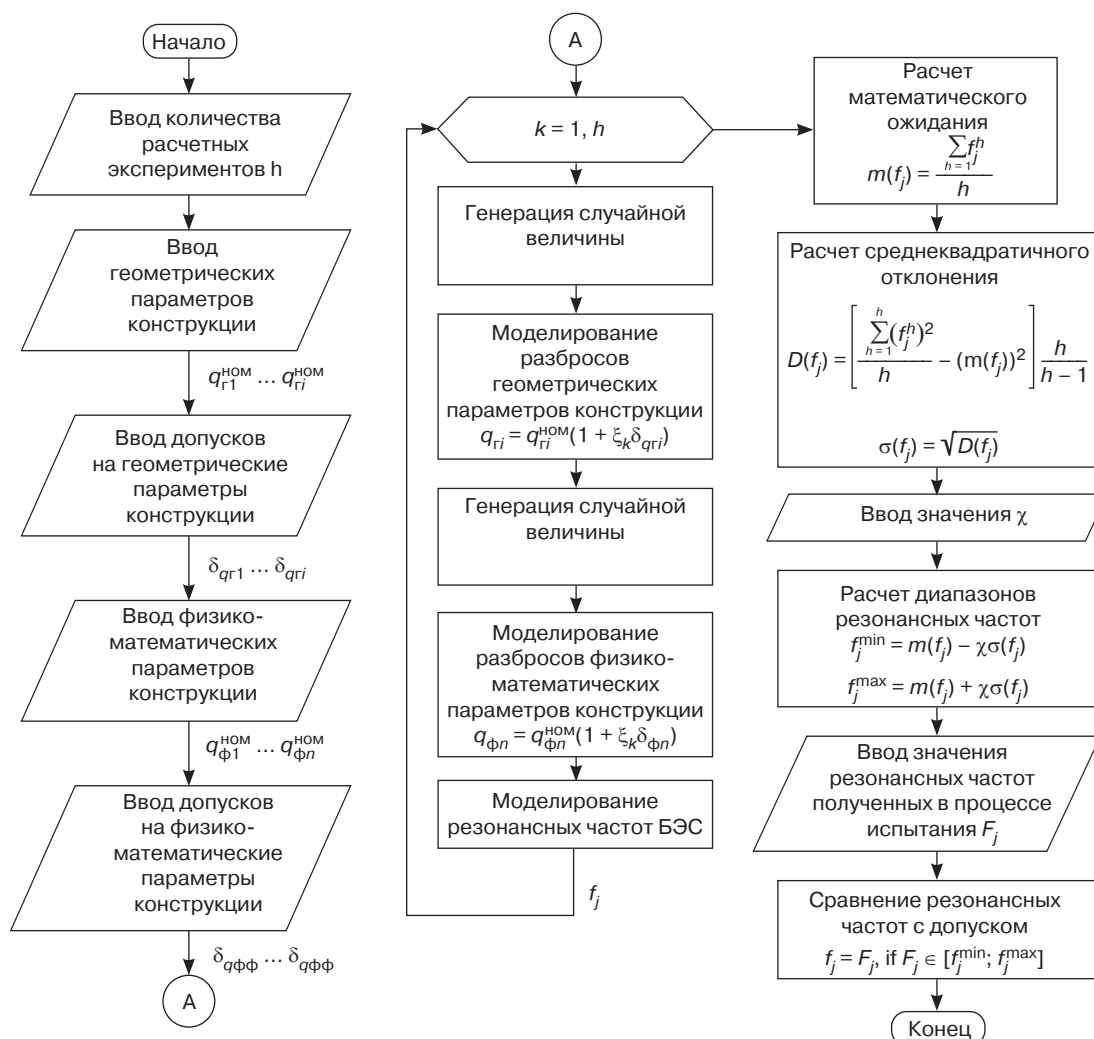


Рис. 2. Блок-схема алгоритма диагностирования механических дефектов

оптимальных координат точек расположения чувствительных элементов позволяет существенно уменьшить погрешность моделирования механических процессов и повысить достоверность диагностического обследования электронного средства.

Данная задача относится к классу поисковых оптимизационных задач и ее решение весьма трудоемко. Основными ограничивающими факторами здесь являются плотная и сложная компоновка печатных узлов (ПУ), количество свободных областей для размещения чувствительных элементов, максимальное удаление их от точек крепления ПУ, виды диагностируемых неисправностей.

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритма определения координат точек размещения актюатора и акселерометра.

Предложенный алгоритм содержит цепь обратной связи, которая позволяет изменить точку размещения акселерометра в случае недостаточной полноты контроля.

Последовательность работы алгоритма следующая:

1. Ввод начальных координат точки размещения акселерометра с учетом вида и влияния неисправности.

2. Последовательный ввод данных о наиболее распространенных дефектах данной конструкции.
3. Ввод математической модели ЭС в программу моделирования механических характеристик.
4. Сравнение рассчитанных значений резонансных частот с характеристиками исправного блока.
5. Проверка условия выявления дефекта.
6. Изменение точки размещения акселерометра по решению оператора.

Для выбора оптимальной точки размещения датчика гармонических колебаний предварительно необходимо выполнить дискретизацию свободных областей коммутационного пространства печатного узла (не занятых ЭРИ) на элементарные ячейки (дискреты). Линейные размеры ячеек должны быть сопоставимы с габаритными размерами датчика, чтобы служить в дальнейшем посадочным местом для размещения чувствительного элемента. Как правило, в результате дискретизации получается некоторая совокупность свободных областей. Координаты их центров являются исходными данными (контрольными точками) для запуска алгоритма.

Затем начинается анализ чувствительности каждой контрольной точки. Для этого из сформированной

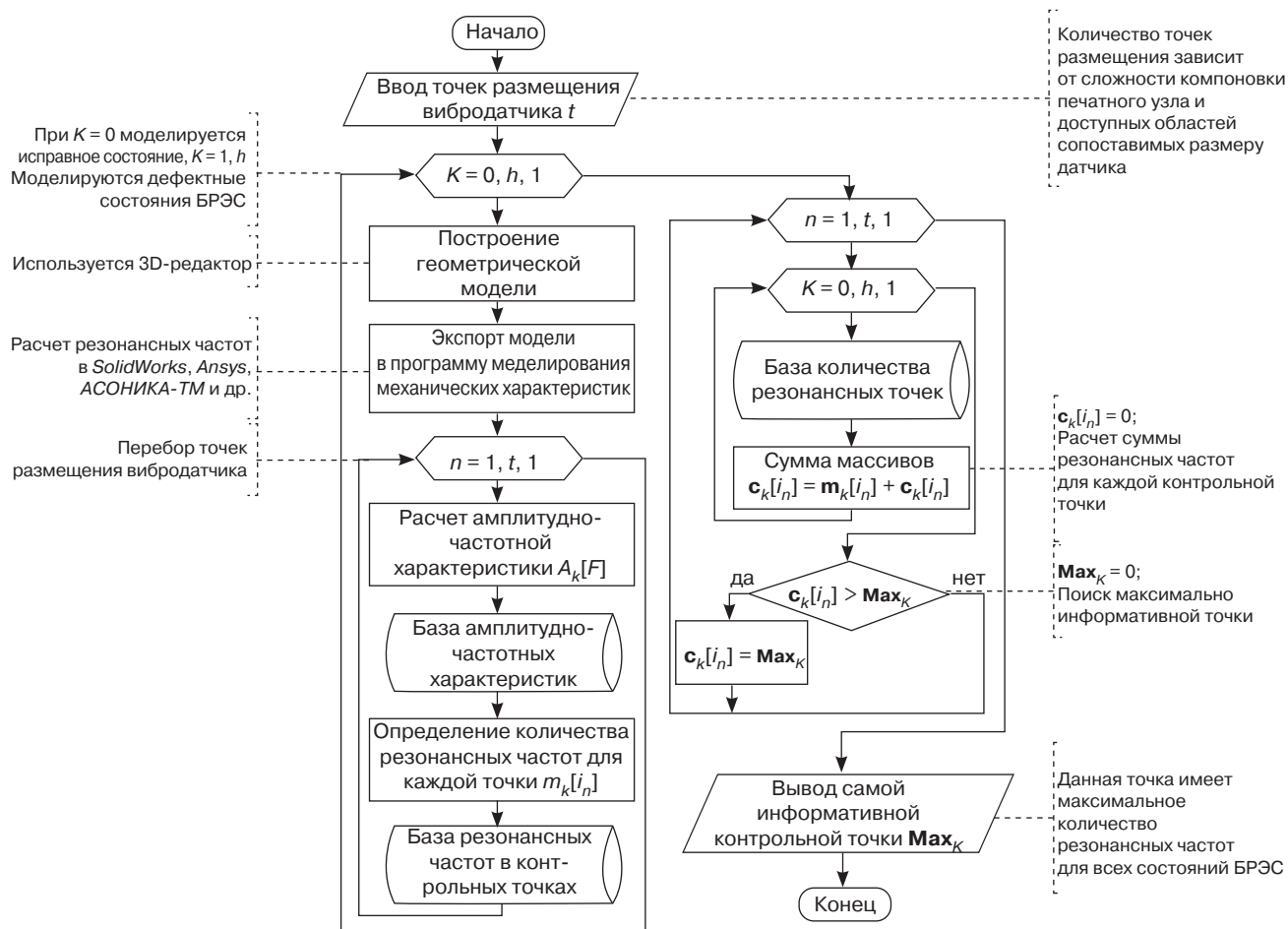


Рис. 3. Блок-схема алгоритма выбора точек размещения актюатора и акселерометра

базы неисправностей в блок моделирования последовательно загружаются наборы параметров исправного (образцового) БРЭС и БРЭС с различными дефектами конструкции. Процесс продолжается до полного перебора всех возможных состояний БРЭС (основной цикл), при этом для каждого состояния электронного средства выполняется перебор всех контрольных точек (внутренний цикл).

Каждый основной цикл завершается построением геометрической модели состояния БРЭС и импортом ее в программу моделирования механических характеристик. Здесь для каждой контрольной точки формируется АЧХ, которая сохраняется в базе данных. Затем АЧХ обрабатывается с целью выявления характерных резонансных частот и подсчета их количества.

Критерием оптимальности точки размещения чувствительного элемента является максимальное количество резонансных частот, зафиксированных в контрольной точке. Для этого, после выполнения основного и внутреннего циклов алгоритма, формируется массив данных, где для конкретного состояния БРЭС указывается количество резонансных частот, выявленных в каждой контрольной точке.

Дальнейшие циклические операции выборки и суммирования позволяют определить общее количество резонансных частот для каждой контрольной точки. На основе сравнения полученных значений определяется экстремум (максимальная сумма), который характеризует наиболее информативную контрольную точку, поскольку в ней определяется

наибольшее количество резонансных частот, выявленных для каждого состояния БРЭС. Данная точка становится посадочным местом для установки вибродатчика при проведении физических испытаний БРЭС в рамках проводимого диагностирования его технического состояния.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Следующим этапом проводимого исследования стала разработка алгоритма функционирования комплекса программных средств (КПС) с целью автоматизации предложенного метода диагностирования электронных средств [14].

Структура комплекса программных средств представлена на рис. 4.

Исходя из особенностей моделирования механических процессов [15], протекающих в конструкциях электронных средств, и методик автоматизированного контроля их технического состояния, были сформулированы требования к функциональным возможностям КПС. Наиболее значимые из них:

- осуществление математического моделирования механических характеристик в автоматизированном режиме как для исправного состояния ЭС, так и для состояний с внесенными изменениями параметров конструкции;
- вычисление координат контрольных точек размещения чувствительных элементов;

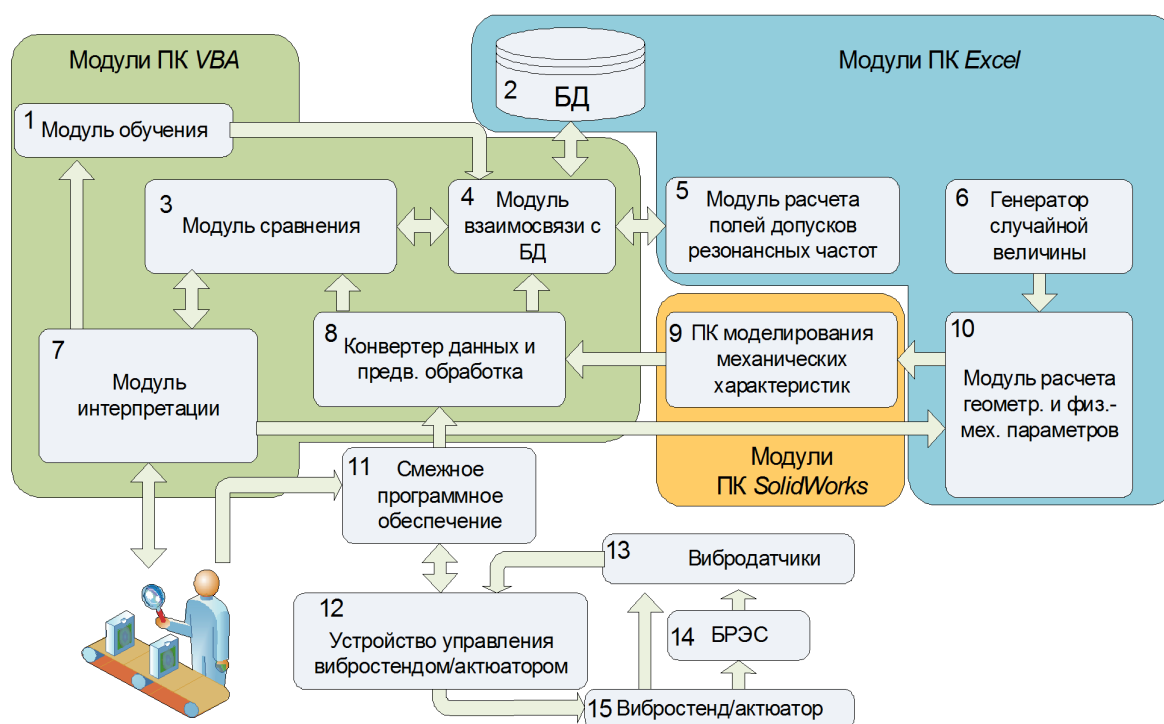


Рис. 4. Структура комплекса программных средств обработки информации на основе подсистемы Integrity



Рис. 5. Блок-схема алгоритма формирования интервалов резонансных частот с учетом внесенных дефектов

- формирование базы данных резонансных частот, полученных с учетом допусков на геометрические и физико-механические параметры устройства;
- расчет значений резонансных частот для неисправных БРЭС с учетом видов дефектов, встречающихся в конструкциях;
- сравнительный анализ результатов испытаний и «образцов», хранящихся в базе данных как для исправного состояния ЭС, так и для состояния с дефектом;
- принятие решения о техническом состоянии ЭС и, в случае необходимости, формирование рекомендаций;
- контроль ЭС на этапе эксплуатации с возможностью сохранения результатов испытаний в базе данных.

С точки зрения архитектурного решения, комплекс программных средств должен:

- иметь блочно-модульную структуру;
- быть законченным программным продуктом со сформированным функционалом;
- работать в автономном режиме;

- иметь возможность интеграции в состав специализированной САПР.

С точки зрения производительности и вычислительной мощности, временные затраты КПС, определяемые расчетными моделями, сеткой частот и объемом глобальных параметров, должны лежать в диапазоне от десятков секунд до десятков минут.

С точки зрения информационной безопасности, КПС должен обеспечить процедуру аутентификацию пользователя при подключении к БД.

В начале работы КПС осуществляется ввод исходных данных: количество расчетных экспериментов, геометрические и физико-механические параметры конструкции ЭС, допуски на параметры.

По окончании ввода данных запускается процесс моделирования, результатом которого является сформированная математическая модель ЭС, в которой учтены разбросы параметров конструкции и получены значения резонансных частот ЭС.

Далее результаты математического моделирования импортируются в модуль расчета интервалов резонансных частот, после чего происходит сравнение резонансных частот, полученных в процессе испытаний ЭС, со значениями частот для исправного состояния. В случае выхода какой-либо резонансной частоты из допустимого интервала начинается процесс диагностики.

На заключительном этапе работы КПС выполняется обработка полученных результатов, и на их основе принимается решение о техническом состоянии ЭС. На рис. 5 изображена блок-схема алгоритма формирования интервалов резонансных частот. Импорт характеристик в БД осуществляется из интерфейса подсистемы *Integrity*.

В блоке 1 осуществляется построение математической модели физических процессов ЭС.

В блоке 2 выполняется импорт модели в модуль расчетов.

В блоке 3 определяются контрольные точки модели.

В блоке 4 вводятся номинальные значения параметров модели.

В блоке 5 выполняется расчет параметров в программном комплексе математического моделирования физических процессов ЭС.

В блоке 6 осуществляется импорт рассчитанных значений характеристик и сохранение их в БД (блок 7).

В блоке 8 обновляются глобальные переменные модели в соответствии с набором параметров, полученных с помощью метода Монте-Карло, и выполняется расчет резонансных частот, который повторяется заданное количество раз.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

В рамках исследования проведена проверка эффективности разработанного метода диагностирования ЭС [16, 17]. В качестве объекта выбран печатный узел (ПУ) делителя напряжения блока контроля летательного аппарата, макет и модель которого приведены на рис. 6.

Электронный узел представляет собой печатную плату прямоугольной формы, выполненную из фольгированного стеклотекстолита марки FR4 толщиной 1.5 мм (толщина медного покрытия составляет 35 мкм), с размещенными на ней электрорадиоэлементами (ЭРЭ) (резисторы, конденсаторы, интерфейсные разъемы). На рис. 7 представлен график АЧХ исследуемого электронного средства.

Расчеты выполнены с применением ПО *Solid-Works Simulation*. Моделирование проводилось при

амплитуде тестового вибрационного воздействия, равной 25 м/с².

Первичный анализ печатного узла в интервале частот [0; 2000] Гц позволил выявить шесть резонансных частот. После отсева резонансных частот, амплитуды которых не превышают значения 0.1 А входного воздействия, к рассмотрению остаются четыре резонансные частоты: 188.90 Гц, 298.78 Гц, 327.92 Гц, 418.74 Гц.

В соответствии с методом Монте-Карло проводится многократный анализ при различных значениях конструктивных параметров. В каждой реализации параметры элементов принимают случайные значения в пределах установленного допуска:

$$q_{\Xi i} = q_{\Xi i}^{\text{НОМ}} (1 + \xi_k \delta_{\Xi i}),$$

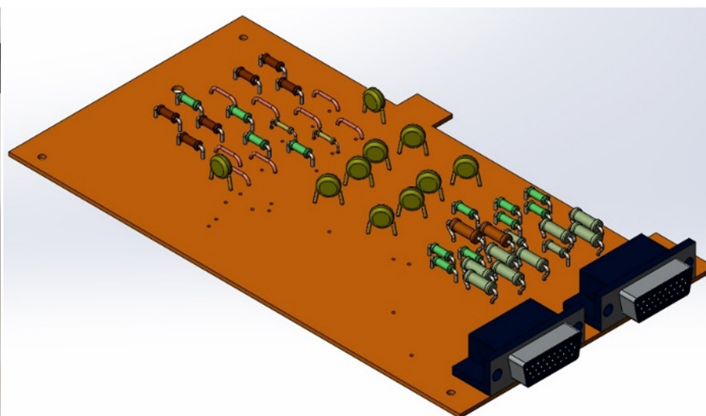


Рис. 6. Макет и модель печатного узла делителя напряжения

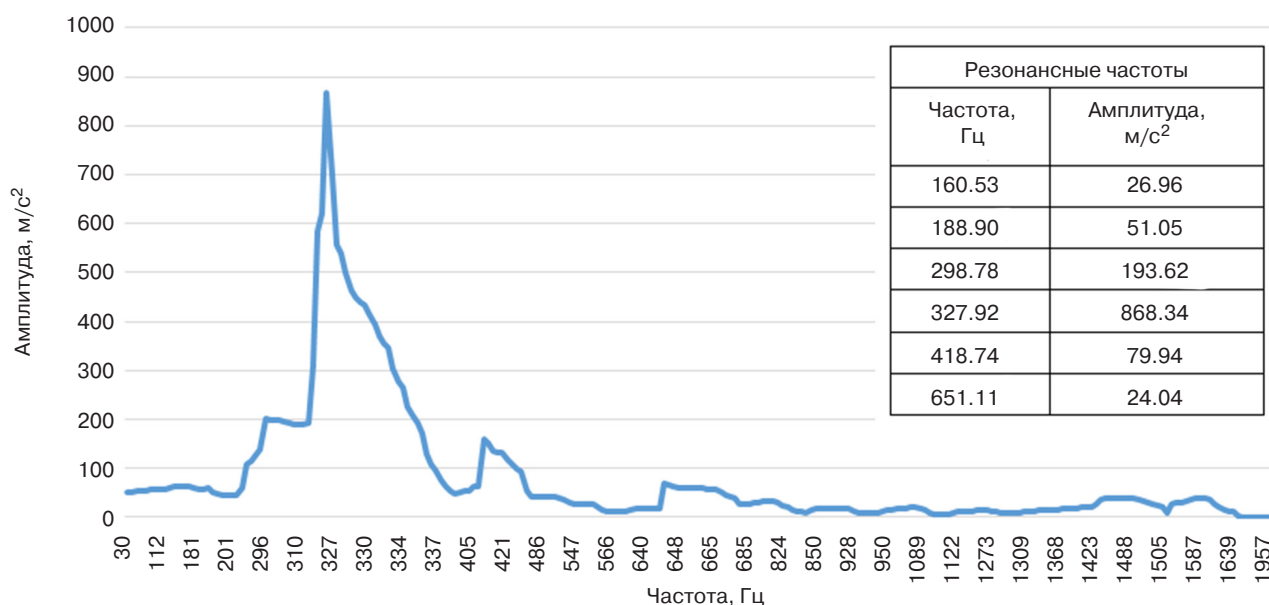


Рис. 7. АЧХ печатного узла, исследуемого ЭС (моделирование)

где q_{zi} – текущее значение i -го конструктивного параметра на k -й реализации; $q_{zi}^{\text{ном}}$ – номинальное значение i -го конструктивного параметра; ξ_k – случайная величина ($-1 < \xi_k < 1$); δ_{zi} – относительный допуск на i -й конструктивный параметр.

Таким образом, в результате расчетов определяется диапазон $[f_i^{\min}, f_i^{\max}]$, в котором может находиться значение i -й резонансной частоты.

Проведенное исследование позволило сформировать допустимые интервалы для каждого значения резонансной частоты. Эти данные приведены в табл. 1.

Таблица 1. Допустимые интервалы отклонения значений резонансных частот

№ резонанса	$f^{\min}$, Гц	$f^{\max}$, Гц
1	179.20	193.93
2	293.51	317.33
3	315.21	339.79
4	404.84	438.30

Амплитудно-частотная характеристика исследуемого печатного узла снята в ходе физических испытаний на вибростенде фирмы IMV с пьезоэлектрическим датчиком VP-15. Ее вид представлен на рис. 8, а значения резонансных частот – в табл. 2.

На графике (рис. 8) явно выражены 4 резонансные частоты, имеющие значения: 181 Гц, 302 Гц, 336 Гц, 406 Гц. Эти резонансы лежат в интервалах допустимых значений, что говорит о корректности построенной модели.

Таблица 2. Значения резонансных частот печатного узла, полученные в ходе физических испытаний

Резонансные частоты		Резонансные частоты	
Частота, Гц	Амплитуда, м/с ²	Частота, Гц	Амплитуда, м/с ²
181	53.06824	560	28.38914
224	60.14173	980	13.67248
254	83.23940	1320	17.98542
302	112.58300	1380	17.37603
336	433.62880	1510	14.11300
406	224.02070	1670	21.38155
478	44.64481	1730	25.87121

Для конструктивных неисправностей бортовой аппаратуры наиболее характерными являются отрыв креплений, деформация конструкции, отрыв ЭРИ, трещина печатной платы и др.

Результаты диагностического моделирования неисправности вида «отрыв крепления» приведены на рис. 9.

Анализ результатов моделирования демонстрирует смещение резонансных частот относительно имеющихся интервалов исправного состояния. Резонансные частоты $f_1 = 125$ Гц, $f_2 = 250$ Гц, $f_4 = 362$ Гц выходят за граничные значения, соответствующие исправному состоянию, т.е. $f_1 \notin [179.2; 193.9]$,

$f_2 \notin [293.5; 317.3]$, $f_4 \notin [404.8; 438.3]$, что говорит о наличии дефекта в исследуемом ЭС.

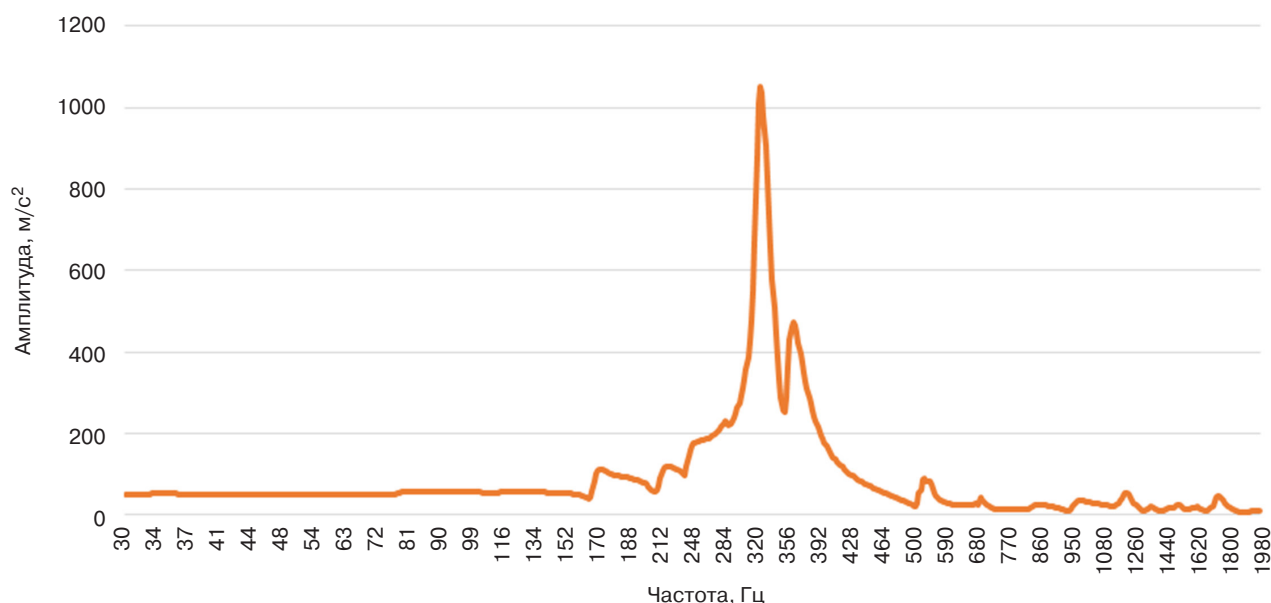


Рис. 8. АЧХ печатного узла, исследуемого ЭС (испытания)

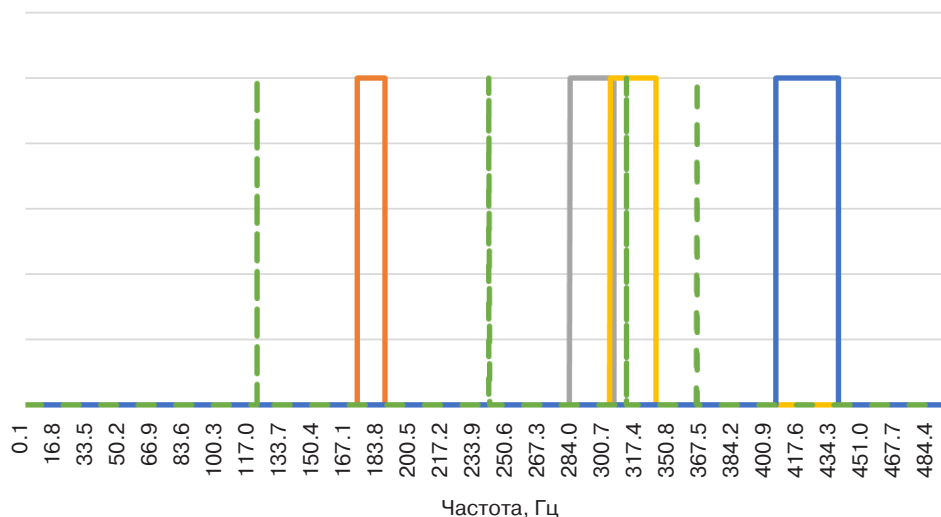


Рис. 9. Диагностическое моделирование ПУ исследуемого ЭС (отрыв крепления)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработан метод вибродиагностики технического состояния БРЭС и алгоритм диагностирования механических дефектов. В рамках метода созданы математические модели для исправного (образцового) состояния электронного средства и состояний с различными дефектами конструкций. Предложен новый подход, основанный на анализе резонансных частот исследуемого электронного узла, вместо анализа АЧХ. Для этого разработан алгоритм формирования допустимых диапазонов резонансных частот. Выполнена проверка работоспособности предложенного метода на основе моделирования неисправного состояния БРЭС с дефектом в виде отрыва

крепления. С учетом погрешности измерений была получена экспериментальная АЧХ. Разработанный метод позволил определить вид дефекта в каждом из 10 экспериментов, проведенным на физической установке (с заданной погрешностью).

Таким образом, результаты исследования позволяют сделать вывод о возможности применения метода диагностирования конструктивных неисправностей электронного узла посредством вибрационных воздействий, о корректности разработанной диагностической модели и сопоставимости результатов физических испытаний численным экспериментам.

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. Комаров А.С., Крапухин Д.В., Шульгин Е.И. *Управление техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем (научно-технологические проблемы и аспекты развития)*; под ред. П.П. Мальцева. М.: Техносфера; 2014. 240 с. ISBN 978-5-94836-397-4
2. Увайсов Р.И. Метод диагностирования дефектов бортовых радиотехнических устройств: дисс. канд. техн. наук. М.: МИЭМ; 2008. 157 с.
3. Donskoy D.M., Ramezani M. Separation of amplitude and frequency modulations in Vibro-Acoustic Modulation Nondestructive Testing Method. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics*. 2018;34(1):045002. <https://doi.org/10.1121/2.0000831>
4. Lyshov S.M., Ivanov I.A., Uvaiov S.U., Chernoverskaya V.V. Vibration control of electronic means technical condition based on analysis of resonant frequencies. In: *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. Prague, Czech Republic; 2019. 4 p. <https://doi.org/10.1109/SED.2019.8798407>

REFERENCES

1. Komarov A.S., Krapukhin D.V., Shul'gin E.I. *Upravlenie tekhnicheskim urovнем vysokointegrirovannykh elektronnykh sistem (nauchno-tehnologicheskie problemy i aspekty razvitiya)* (Management of the technical level of highly integrated electronic systems (scientific and technological problems and aspects of development)), P.P. Maltsev (Ed.). Moscow: Tekhnosfera; 2014. 240 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-397-4
2. Uvaiov R.I. Metod diagnostirovaniya defektov bortovykh radiotekhnicheskikh ustroystv: Cand. Sci. Thesis. Moscow: MIEM; 2008. 157 p. (in Russ.).
3. Donskoy D.M., Ramezani M. Separation of amplitude and frequency modulations in Vibro-Acoustic Modulation Nondestructive Testing Method. In: *Proceedings of Meetings on Acoustics*. 2018;34(1):045002. <https://doi.org/10.1121/2.0000831>
4. Lyshov S.M., Ivanov I.A., Uvaiov S.U., Chernoverskaya V.V. Vibration control of electronic means technical condition based on analysis of resonant frequencies. In:

5. Тихонов А.Н., Увайсов С.У., Иванов И.А., Лышов С.М. Концепция и метод диагностирования печатных узлов с использованием встроенных эмуляторов вибрационных колебаний. *ПРИКАСПИЙСКИЙ ЖУРНАЛ: управление и высокие технологии*. 2016;4(36):144–154.
6. Лышов С.М., Иванов И.А., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Расчет разбросов резонансных частот печатных узлов электронных средств. *Вестник кибернетики*. 2018;4(32):129–135.
7. Bach Phi Duong, Jong-Myon Kim. Prognosis of remaining bearing life with vibration signals using a sequential Monte Carlo framework. *J. Acoust. Soc. Am.* 2019;146(4):EL358. <https://doi.org/10.1121/1.5129076>
8. Zhao X., Gao H., Zhang G., Ayhan B., Yan F., Kwan C., Rose J.L. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring. *Smart Mater. Struct.* 2007;16(4):1208. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/4/032>
9. Храмов А.М. Напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов пьезоактюатора: дисс. канд. физ.-мат. наук. Томск: МИЭМ; 2017. 135 с.
10. Tua P., Quek S., Wang Q. Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves. *Smart Mater. Struct.* 2004;13(4):643. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/4/002>
11. Воловиков В.В. Разработка методов повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры, основанных на непрерывном комплексном моделировании физических процессов. *Надежность*. 2008;1(24):3–9.
12. Иванов И.И., Наумова Е.Н. Анализ результатов моделирования вибрационных процессов в различных САПР. *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*. 2018;1:476–482.
13. Кофанов Ю.Н., Шалумов А.С., Журавский В.Г., Гольдин В.В. *Математическое моделирование радиоэлектронных средств при механических воздействиях*. М.: Радио и связь; 2000. 226 с. ISBN 5-256-01539-7
14. Malpass L. *SolidWorks 2009 API – Advanced Product Development*. 2009. 246 p.
15. Иванов И.А., Сулейманов С.П., Увайсов Р.И. Программный комплекс диагностирования нарушений целостности конструкций. *Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий*. 2007;1:227–229.
16. Лышов С.М., Увайсов С.У., Черновверская В.В., Фам Лэ Куок Хань. Инженерная методика вибродиагностики конструкций бортовых радиоэлектронных средств. *Наукоемкие технологии*. 2020;21(2-3):17–28. <https://doi.org/10.18127/j19998465-202002-3-03>
- 2019 *International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. Prague, Czech Republic; 2019. 4 p. <https://doi.org/10.1109/SED.2019.8798407>
5. Tikhonov A.N., Uvaisov S.U., Ivanov I.A., Lyshov S.M. Conception and method of diagnosis of printed board assembly with using of on-board emulators oscillation. *PRIKASPIISKII ZhURNAL: upravlenie i vysokie tekhnologii = CASPIAN JOURNAL: Management and High Technologies*. 2016;4(36):144–154 (in Russ.).
6. Lysov S.M., Ivanov I.A., Uvaisova A.S., Uvaisova S.S. Calculation of resonant frequencies spread of printed circuit assembly of electronic devices. *Vestnik kibernetiki = Proceedings of Cybernetics*. 2018;4(32):129–135 (in Russ.).
7. Bach Phi Duong, Jong-Myon Kim. Prognosis of remaining bearing life with vibration signals using a sequential Monte Carlo framework. *J. Acoust. Soc. Am.* 2019;146(4):EL358. <https://doi.org/10.1121/1.5129076>
8. Zhao X., Gao H., Zhang G., Ayhan B., Yan F., Kwan C., Rose J.L. Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring. *Smart Mater. Struct.* 2007;16(4):1208. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/4/032>
9. Khramtsov A.M. Stress-strain state of interacting elements of a piezo actuator: Cand. Sci. Thesis. Tomsk: MIEM; 2017. 135 p. (in Russ.).
10. Tua P., Quek S., Wang Q. Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves. *Smart Mater. Struct.* 2004;13(4):643. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/4/002>
11. Volovikov V.V. Development of methods for improving the reliability of radio electronic equipment based on continuous complex modeling of physical processes. *Nadezhnost' = Dependability*. 2008;1(24):3–9 (in Russ.).
12. Ivanov I.I., Naumova E.N. Analysis of simulation results of vibration processes in various CAD systems. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii*. 2018;1:476–482 (in Russ.).
13. Kofanov Yu.N., Shalumov A.S., Zhuravskii V.G., Gol'din V.V. *Matematicheskoe modelirovanie radioelektronnykh sredstv pri mekhanicheskikh vozdeistviyakh (Mathematical modeling of radio electronic devices under mechanical influences)*. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 226 p. (in Russ.). ISBN 5-256-01539-7
14. Malpass L. *SolidWorks 2009 API – Advanced Product Development*. 2009. 246 p.
15. Ivanov I.A., Suleimanov S.P., Uvaisov R.I. A software complex for diagnosing structural integrity violations. *Innovatsii v usloviyakh razvitiya informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologii*. 2007;1:227–229 (in Russ.).
16. Lyshov S.M., Uvaisov S.U., Chernoverskaya V.V., LeQuocKhanhPham. Engineering technique for vibration diagnostics of structures on-board radio electronic means. *Naukoemkie Tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2020;21(2-3):17–28 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j19998465-202002-3-03>

Об авторах

Лышов Сергей Максимович, ассистент кафедры 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: lyshov@mirea.ru.

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: uvajsov@mirea.ru. Scopus Author ID 55931417100, ResearcherID H-6746-2015, <https://orcid.org/0000-0003-1943-6819>

Черновверская Виктория Владимировна, к.т.н., доцент кафедры 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.

Фам Лэ Куок Хань, аспирант кафедры 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: kxanhmtak45@gmail.com.

About the authors

Sergey M. Lyshov, Assistant, Department of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: lyshov@mirea.ru.

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

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

Pham Le Quoc Han, Postgraduate Student, Department of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kxanhmtak45@gmail.com.

УДК 537.226.1

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-57-65>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование диэлектрических характеристик материалов, изготавливаемых с применением аддитивных технологий

С.В. Харалгин[@],
М.И. Войтович

АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», Москва, 107078 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: hsvl92@mail.ru

Резюме. На основе существующих методов измерения диэлектрических характеристик материалов выбран метод конечного интегрирования, оптимальный для проведения расчетов в системе электродинамического автоматизированного проектирования. Исходя из расчетных значений матрицы рассеяния по заданному алгоритму вычислены диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь образцов печатаемого полимера. При оценке точности расчета диэлектрических характеристик осуществлена валидация для образца с заданными характеристиками. Для образца, печатаемого по технологии послойного наплавления полимерных нитей, проведена оценка влияния параметров заполнения на диэлектрические характеристики печатаемой модели в X-диапазоне длин волн. Приведено описание модели, реализованной в системе автоматизированного проектирования. Путем обработки результатов моделирования получены аппроксимирующие зависимости для диэлектрической проницаемости и потерь от степени заполнения диэлектриком. Из расчетных угловых диаграмм следует, что снижение степени заполнения диэлектрика напрямую отражается на степени анизотропии получаемого при печати полимера в плоскости расположения экструдированных слоев. При этом также увеличивается глубина экстремумов, наблюдаемых при углах 0°, 90° и 180°. Наличие этих экстремумов напрямую связано с тем, что силовые линии напряженности основного типа волны в волноводе располагаются перпендикулярно широкой стенке, и в ситуации, когда объемы воздушных зазоров между цилиндрами оказываются параллельными силовым линиям напряженности, наблюдается общее снижение диэлектрической проницаемости. Для печатаемого образца, состоящего из двух слоев перекрещенных цилиндров, воздушные объемы оказываются параллельными силовым линиям с периодом в 90°, что и подтверждается полученными результатами. Увеличение глубины экстремумов при снижении степени заполнения связано с соответствующим увеличением воздушного пространства между цилиндрами в слое печатаемого полимера.

Ключевые слова: технология 3D-печати, аддитивные технологии, волноводный метод определения диэлектрических характеристик

• Поступила: 24.02.2021 • Доработана: 03.03.2021 • Принята к опубликованию: 05.03.2021

Для цитирования: Харалгин С.В., Войтович М.И. Исследование диэлектрических характеристик материалов, изготавливаемых с применением аддитивных технологий. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):57–65. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-57-65>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Investigation of the dielectric characteristics of materials manufactured using additive technologies

**Sergey V. Kharalgin[@],
Maksim I. Voytovich**

Academician A.I. Berg Central Radio-Research Institute, Moscow, 107078 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: hsvl92@mail.ru

Abstract. Based on the existing methods of measuring the dielectric characteristics of materials, the most optimal method for performing calculations in the electrodynamic computer-aided design system is selected by the finite integration method. Based on the calculated values of the scattering matrix, the permittivity and the tangent of the dielectric loss angle of the printed polymer samples are calculated according to a given algorithm. When evaluating the accuracy of the calculation of the dielectric characteristics, validation was performed for a sample with the specified characteristics. For a sample printed using the technology of fused filament fabrication, the influence of the filling parameters on the dielectric characteristics of the printed model in the X-band of wavelengths was estimated. The description of the model implemented in the computer-aided design system is given. By processing the simulation results, approximating dependences for the permittivity and losses on the degree of filling with the dielectric are obtained. It follows from the calculated angular diagrams that the decrease in the degree of filling of the dielectric directly affects the degree of anisotropy of the polymer obtained during printing in the plane of the extruded layers. This also increases the depth of the extremes observed at angles of 0°, 90° and 180°. The presence of these extremes is directly related to the fact that the force lines of the main wave type in the waveguide are located perpendicular to the wide wall and in a situation where the volumes of air gaps between the cylinders are parallel to the force lines of tension, there is a general decrease in the dielectric constant. For a printed sample consisting of two layers of crossed cylinders, the air volumes are parallel to the lines of force with a period of ninety degrees, which is confirmed by the results obtained. An increase in the depth of the extremes with a decrease in the degree of filling is associated with a corresponding increase in the air space between the cylinders in the layer of the printed polymer.

Keywords: 3D printing technology, additive technologies, waveguide method for determining dielectric characteristics

• Submitted: 24.02.2021 • Revised: 03.03.2021 • Accepted: 05.03.2021

For citation: Kharalgin S.V., Voytovich M.I. Investigation of the dielectric characteristics of materials manufactured using additive technologies. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):57–65 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-2-57-65>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

Термины:

ABS-пластик – ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом.

Fused filament fabrication (FFF) – технология изготовления трехмерных объектов посредством послойного наплавления полимерных нитей.

Selective Laser Sintering (SLS) – технология аддитивного производства, основанная на послойном спекании порошковых материалов (полиамиды, пластик) с помощью луча лазера.

Stereolithography (SLA) – технология 3D-печати, основанная на послойном отверждении жидкого материала под действием луча лазера.

ВВЕДЕНИЕ

Применение аддитивных технологий в современном производстве охватывает все новые сферы промышленности. Исследования в рамках применимости 3D-печати для изготовления сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств представлены

в большом количестве научных материалов, например [1–6]. Помимо применения технологии 3D-печати устройств СВЧ металлами [7–9], применяется и полимерная печать с нанесением проводящих покрытий розничными методами. На данном этапе, помимо широко известной печати различными полимерами, исследованы возможности аддитивных методов по изготовлению СВЧ устройств проводящими материалами с удельным сопротивлением $5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [1], а также низкотемпературными спекаемыми керамиками [2]. Основным преимуществом данной технологии является возможность создания устройств, обладающих уникальными характеристиками, изготовить которые классическими методами очень сложно либо невозможно. Так, например, в [3] представлены результаты исследования метаматериалов, изготавливаемых с помощью 3D-печати. На электронном ресурсе [4] авторы представили сравнение возможностей по изготовлению спиральной антенны по технологиям лазерной стереолитографии (SLA) и технологии спекания порошков (SLS) с нанесением проводящего слоя с использованием аэрозольного напыления. Результаты измерения диаграммы направленности и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) от входа спиральной антенны авторы не предоставляют, ссылаясь на неприемлемость полученных характеристик, связанную с неучтенными электродинамическими характеристиками печатаемого полимера. В [5] приведены результаты полного цикла исследований и изготовления рупорной антенны и коаксиально-волноводных переходов с использованием технологии послойного наплавления (Fused filament fabrication): проектирование, моделирование, изготовление образца и валидация характеристик. Исследования, направленные на определение диэлектрических характеристик печатаемых материалов, отражены в [1, 6]. В [6] авторы при помощи резонаторного метода определили диэлектрические характеристики печатаемого материала и получили некоторую дисперсию по выборке из девяти образцов, обосновывая расхождения в значениях неполной заливкой с образованием воздушных карманов. К сожалению, авторы не уделили внимания влиянию на диэлектрическую проницаемость степени заполнения полимером пространства модели. В [1] за счет уменьшения степени заполнения печатаемых полых цилиндров авторы добиваются снижения диэлектрической проницаемости, однако соответствующих зависимостей диэлектрических характеристик и исследования возникающей при этом анизотропии не представлено. При этом, использование печатаемого пластика в качестве структуры проводящей электромагнитную энергию встречается в большом количестве публикаций [10–13].

Целью данной работы является оценка влияния характеристик заполнения печатаемого образца по технологии послойного наплавления полимерных нитей FFF на диэлектрические характеристики печатаемой модели в X-диапазоне длин волн. В работе проводится описание модели, реализованной в системе автоматизированного проектирования, с дальнейшим вычислением диэлектрических характеристик при различных степенях заполнения.

1. ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Известно, что модели при печати по технологии послойного наплавления полимерных нитей обладают неоднородностями в виде воздушных карманов, направление которых напрямую зависит от того, каким образом модель была разбита на слои. В связи с этим при выборе метода определения диэлектрических характеристик закладывалось требование по чувствительности системы к анизотропии измеряемых материалов. Среди разнообразия существующих методов определения диэлектрических характеристик материалов, обладающих специфическими особенностями, можно выделить следующие [15]: резонаторные методы, методы линии передач, методы свободного пространства и конденсаторные методы. Резонаторные методы, к сожалению, весьма узкополосны. Конденсаторные методы находят свое применение в низкочастотной части длин волн, которая может достигать до 1 ГГц. При измерении свойств материалов методами свободного пространства используют направленные свойства антенн, при этом аналогично методам линии передач измеряются коэффициенты передачи и коэффициент отражения от исследуемого образца. С точки зрения электродинамического моделирования методы свободного пространства являются ресурсоемкими по причине того, что для создания направленной диаграммы требуется антенна больших, относительно длины волн, размеров.

В связи с необходимостью измерений характеристик анизотропных материалов в широком диапазоне частот при сравнительно небольшой ресурсоемкости для моделирования был выбран метод линии передач с использованием прямоугольного волновода. Сущность метода заключается в том, что измеряемый образец размещается в прямоугольном волноводе с последующим измерением комплексных коэффициентов отражения и передачи, а далее по алгоритму, описанному в [15], проводилось вычисление диэлектрических характеристик образца.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА, ИЗГОТАВЛИВАЕМОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Для оценки влияния плотности заполнения печатаемого образца на диэлектрические характеристики в системе автоматизированного проектирования (САПР) была создана и реализована 3D-модель. Ее вид показан на рис. 1.

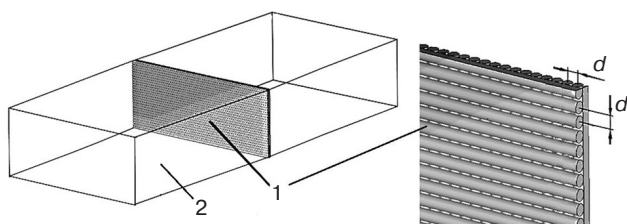


Рис. 1. Модель печатаемого образца, расположенного в волноводе:
1 – измеряемый образец,
2 – волновод

Модель состоит из металлического волновода из числа стандартизированных размеров сечения 23×10 мм, работающего в X-диапазоне длин волн. В волноводе располагается измеряемый образец, состоящий из двух перекрестно расположенных слоев, расстояние между которыми 0.27 мм. Каждый слой представляет собой ряд цилиндров диаметром 0.3 мм, состоящих из материала с диэлектрической проницаемостью ϵ равной 2.6 и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon) = 0.02$ [6], как и у полимера акрилонитрил бутадиен стирол (ABS-пластик). В виде параметра задано расстояние d между соседними в слое цилиндрами. При варьировании значений параметра d в диапазоне от 0.24 до 0.35 мм с шагом 0.01 мм, были получены комплексные коэффициенты передачи $\dot{S}_{21}$ и отражения $\dot{S}_{11}$, которые впоследствии пересчитывались в диэлектрические характеристики ϵ и $\text{tg}(\epsilon)$ по алгоритму, приведенному в [15].

При этих расчетах использованы следующие зависимости комплексных коэффициента отражения и коэффициента передачи волноводной секции с размещенным образцом от диэлектрической проницаемости:

$$\dot{S}_{11}(\dot{\epsilon}) = \frac{(\mu\gamma_1 - \gamma_2)}{(\mu\gamma_1 + \gamma_2)} \times \frac{\left(1 - \exp\left[2l(k_{\text{кр}}^2 - k_0^2\dot{\epsilon}\mu)^{0.5}\right]\right)}{\left(1 - \left[\frac{(\mu\gamma_1 - \gamma_2)}{(\mu\gamma_1 + \gamma_2)}\right]^2 \exp\left[2l(k_{\text{кр}}^2 - k_0^2\dot{\epsilon}\mu)^{0.5}\right]\right)}, \quad (1)$$

$$\dot{S}_{21}(\dot{\epsilon}) = \frac{\exp\left[l(k_{\text{кр}}^2 - k_0^2\dot{\epsilon}\mu)^{0.5}\right] \left(1 - \left[\frac{(\mu\gamma_1 - \gamma_2)}{(\mu\gamma_1 + \gamma_2)}\right]^2\right)}{\left(1 - \left[\frac{(\mu\gamma_1 - \gamma_2)}{(\mu\gamma_1 + \gamma_2)}\right]^2 \exp\left[2l(k_{\text{кр}}^2 - k_0^2\dot{\epsilon}\mu)^{0.5}\right]\right)}, \quad (2)$$

где γ_1, γ_2 – постоянные распространения для волноводов с воздушным и диэлектрическим заполнением, соответственно; l – длина образца в волноводе; μ – магнитная проницаемость образца (для немагнитных материалов $\mu = 1$); $\dot{\epsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость образца; k_0 – волновое число для вакуума; $k_{\text{кр}}$ – волновое число для критической длины волны в волноводе.

Для численного анализа анизотропии среды проводилось вращение образца (рис. 2) на угол Θ в плоскости, перпендикулярной распространению волны в волноводе. При этом не допускалось образование воздушных зазоров между стенками волновода и образцом.

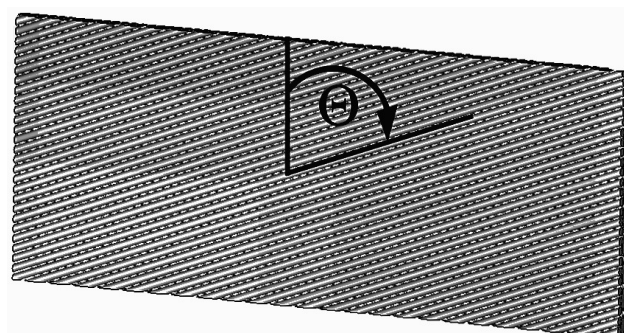


Рис. 2. Модель печатаемого образца при численном анализе анизотропии

При анализе анизотропии в силу симметрии структуры модель печатаемого образца вращалась в диапазоне углов Θ от 0° до 180° с шагом 5° , с одновременным варьированием степени заполнения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для анализа точности алгоритма [15] по обработке комплексных коэффициентов передачи и отражения в модель волновода был установлен тестовый образец, представляющий собой цельный параллелепипед с диэлектрической проницаемостью ϵ равной 2.6 и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon) = 0.02$. Результаты вычисления диэлектрических характеристик представлены на рис. 3 и 4.

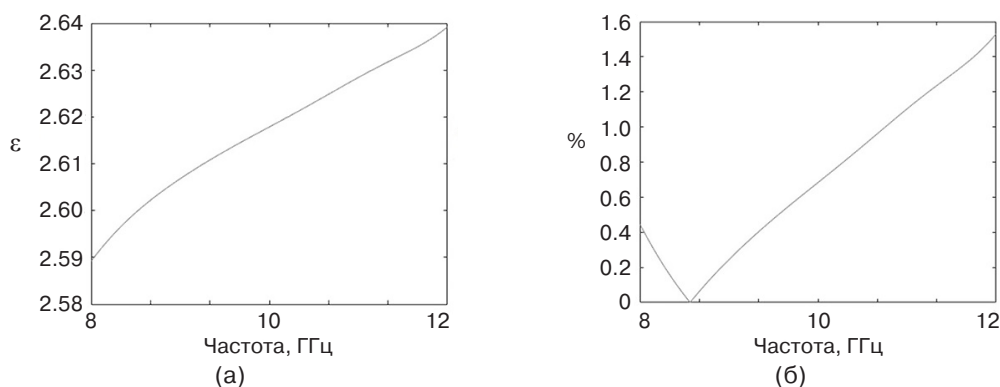


Рис. 3. Результаты вычисления диэлектрической проницаемости ϵ (а) и ошибка вычисления (б)

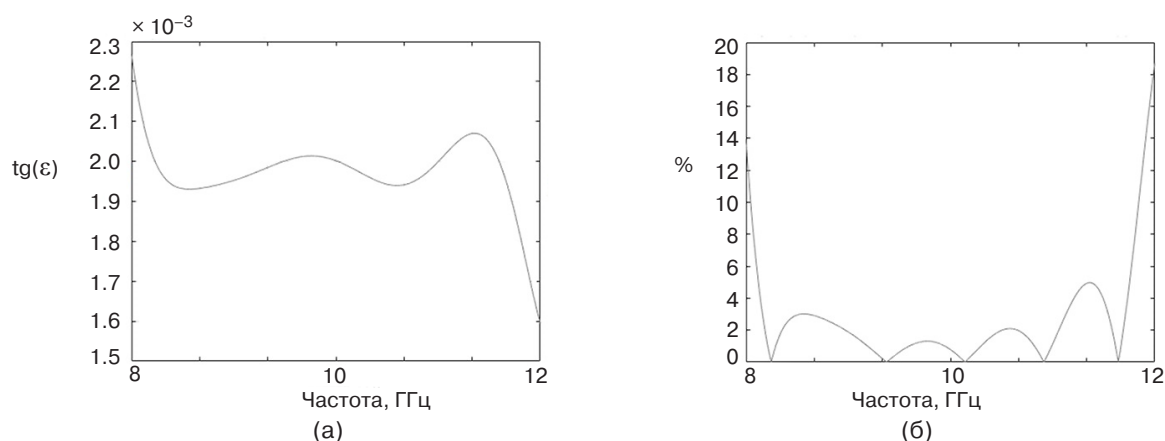


Рис. 4. Результаты вычисления тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon)$ (а) и ошибка вычисления (б)

Полученные результаты вычислений для тестового образца показали приемлемую сходимость. Так для реальной части диэлектрической проницаемости ошибка не превысила 1.6%, а для тангенса угла диэлектрических потерь ошибка возрастает на краях диапазона до 18%, однако в среднем не превышает 5%.

Зависимости вычисленных значений диэлектрических характеристик от степени заполнения диэлектриком и частоты электромагнитной волны представлены на рис. 5 и 6. При этом степень заполнения вычислялась как отношение объема печатаемого образца к объему цельного параллелепипеда.

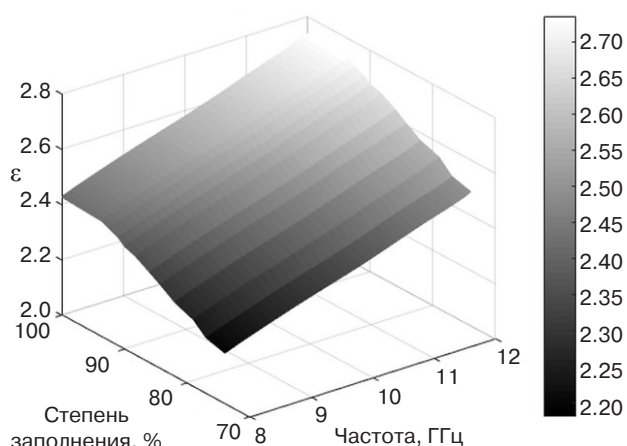


Рис. 5. Зависимость реальной части диэлектрической проницаемости ϵ от степени заполнения материалом и частоты электромагнитной волны

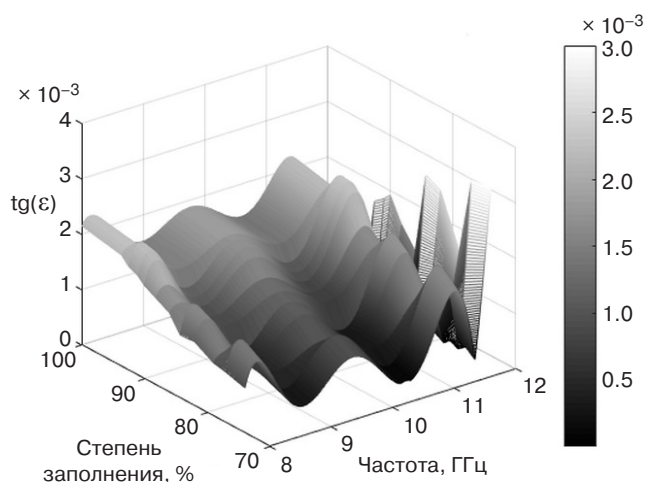


Рис. 6. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon)$ от степени заполнения диэлектриком и частоты электромагнитной волны

Из результатов вычисления диэлектрических характеристик следует, что с возрастанием степени заполнения печатаемого образца возрастают потери и диэлектрическая проницаемость. С увеличением частоты электромагнитного излучения также наблюдается рост диэлектрической проницаемости. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты имеет сложный волнообразный характер, причиной которого может являться ограниченная точность электродинамического моделирования, проявление которой так же отражено на рис. 4.

С целью уменьшения ошибки электродинамического моделирования было выполнено усреднение результатов по 1001 частотной точке. Результирующие выборки, состоящие из 13 значений, и их аппроксимирующие кривые представлены на рис. 7 и 8.

Аппроксимации были выполнены полиномами третьего порядка вида:

$$F(k_3) = a_1 k_3^3 + a_2 k_3^2 + a_3 k_3 + a_4, \quad (3)$$

где для диэлектрической проницаемости: k_3 – коэффициент заполнения в процентах; $a_1 = -1.34 \cdot 10^{-5}$;

$a_2 = 3.3 \cdot 10^{-3}$; $a_3 = -0.26 \cdot 10^{-2}$; $a_4 = 9$; а для тангенса угла диэлектрических потерь: $a_1 = 8.07 \cdot 10^{-8}$; $a_2 = 2.16 \cdot 10^{-5}$; $a_3 = -2 \cdot 10^{-3}$; $a_4 = 5.3 \cdot 10^{-2}$.

Результатами численного анализа анизотропии являются угловые диаграммы распределения реальной части диэлектрической проницаемости ϵ в декартовой системе координат при различных степенях заполнения (указано в процентах), представленные на рис. 9.

Из угловой диаграммы следует, что снижение степени заполнения диэлектрика напрямую отражается на степени анизотропии получаемого при печати полимера в плоскости расположения экструдированных слоев. При этом также увеличивается глубина экстремумов, наблюдаемых при углах 0° , 90° и 180° . Наличие этих экстремумов напрямую связано с тем, что силовые линии напряженности основного типа волны H_{10} располагаются перпендикулярно широкой стенке волновода и в ситуации, когда объемы воздушных зазоров между цилиндрами оказываются параллельными силовым линиям напряженности, наблюдается общее снижение диэлектрической проницаемости.

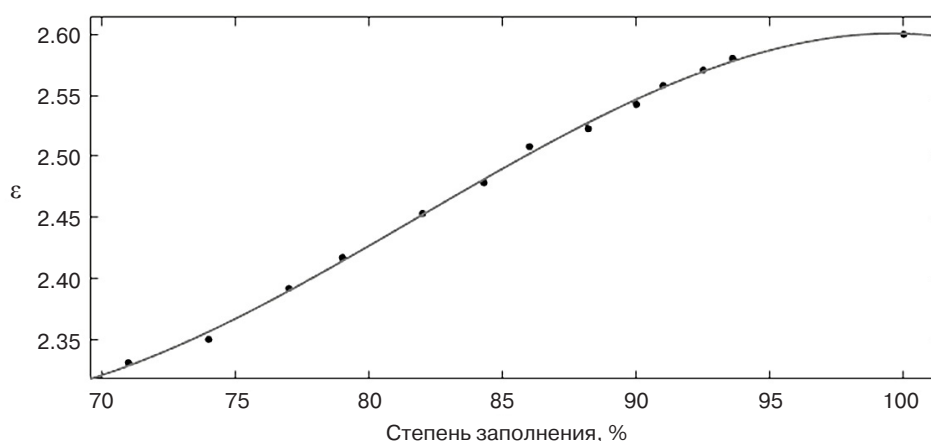


Рис. 7. Аппроксимация зависимости реальной части диэлектрической проницаемости ϵ

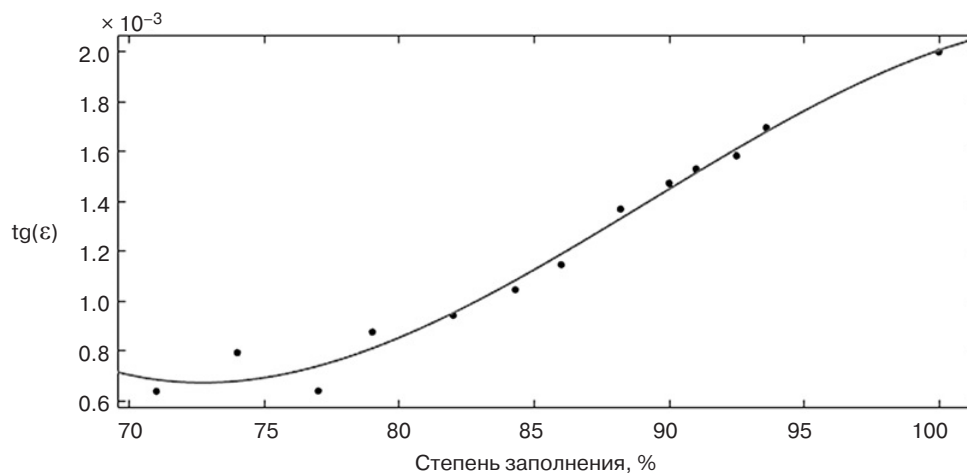


Рис. 8. Аппроксимация зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon)$

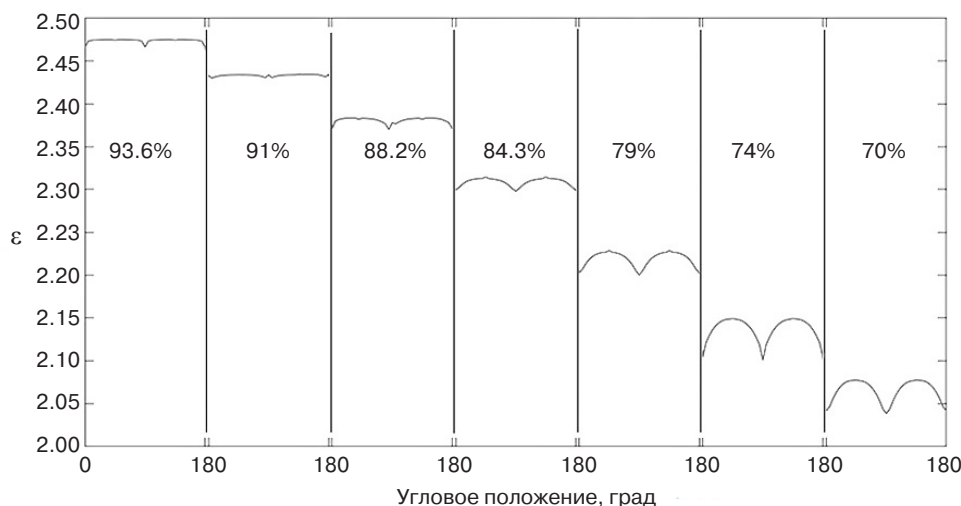


Рис. 9. Угловая зависимость диэлектрической проницаемости ϵ образца при различной степени заполнения диэлектриком

Ввиду того, что для характеристик диэлектрической проницаемости наблюдается симметрия в диапазоне углов от 0° до 90° и от 90° до 180° , для упрощения их аналитического описания в (1) и (2) следует ограничиться соответствующим сектором углов. Тогда выражения для реальной части диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, входящие в (1), (2), в зависимости от степени заполнения (3) и угла поворота печатаемых слоев запишутся следующим образом:

$$\epsilon = F_{\epsilon}(k_3) \left[\left(-2.61 - 0.29 \cdot F_{\epsilon}(k_3)^2 \right) \cdot 10^{-6} \times \right. \\ \left. \times \Theta^2 + 2.5 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta + 1 \right], \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}(\epsilon) = F_{\operatorname{tg}(\epsilon)}(k_3) \times \\ \times \left[\left(39.4 \cdot 10^{-3} - 45 \cdot F_{\operatorname{tg}(\epsilon)}(k_3) \right) \Theta + 1 \right], \quad (5)$$

где Θ — угол (в градусах) расположения печатаемых слоев лежит в интервале $(-45^\circ; 45^\circ)$, нулевым следует считать расположением печатаемых слоев под 45° относительно стенок волновода; k_3 — коэффициент заполнения в процентах, находится в интервале (60; 100).

Для печатаемого образца, состоящего из двух слоев перекрещенных цилиндров, воздушные объемы оказываются параллельными силовым линиям с периодом в 90° , что и подтверждается полученными результатами, приведенными на рис. 9. Увеличение глубины экстремумов при снижении степени заполнения связано с соответствующим увеличением воздушного пространства между цилиндрами в слое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведена оценка влияния характеристик заполнения образца, печатаемого по технологии послойного наплавления полимерных нитей FFF, на диэлектрические характеристики печатаемой модели в X-диапазоне длин волн. Приведено описание модели, реализованной в системе автоматизированного проектирования, выполнена оценка точности вычисления диэлектрических характеристик по алгоритму, представленному в [15]. Результаты вычисления диэлектрических характеристик для тестового образца показали приемлемую сходимость: средняя ошибка для реальной части диэлектрической проницаемости не превысила 1,6%, а для тангенса угла диэлектрических потерь — 5%.

При оценке влияния степени заполнения диэлектриком в диапазоне от 70% до 100% на анализируемые характеристики получены аппроксимирующие зависимости для величин ϵ и $\operatorname{tg}(\epsilon)$, из которых можно сделать вывод о характере их уменьшении при снижении степени заполнения. Из результатов численного анализа анизотропии образцов следует вывод, что снижение степени заполнения диэлектриком напрямую отражается на степени анизотропии получаемого при печати полимера в плоскости расположения экструдированных слоев. При этом помимо общего снижения диэлектрической проницаемости и потерь наблюдается увеличение глубины экстремумов, наблюдаемых при углах 0° , 90° и 180° .

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. Elsallal M.W., Hood J., McMichael I. 3D Printed Material Characterization for Complex Phased and Metamaterials. *Microwave Journal*. 2016;59(10):20–34.
2. Zhang S., Cadman D., Whittow W. et al. 3D Antennas, Metamaterials, and Additive Manufacturing. In: *Proc. Conf. 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*. Guangzhou, China. May 19–22, 2019. N.Y.: IEEE; 2019. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IEEE-IWS.2019.8803909>
3. Sadeqi A., Rezaei Nejad H., Oweyung R.E., Sonkusale S. Three dimensional printing of metamaterial embedded geometrical optics (MEGO). *Microsystems & Nanoengineering*. 2019;5:16. <https://doi.org/10.1038/s41378-019-0053-6>
4. Как мы напечатали антенну. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/ilyavyazigin/3d-antenna>
5. Харалгин С.В., Куликов Г.В., Котельников А.Б., Снастин М.В., Добычина Е.М. Изготовление устройств СВЧ с применением технологии 3D-печати. *Российский технологический журнал*. 2019;7(1):80–101. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101>
6. Демиденко Е.В., Кузьмин С.В., Кирик Д.И. 3D-печать антенно-фидерных устройств с использованием полимерных материалов. В сб.: *VII Всероссийская НТК «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*: сб. тез. докл. (28–31 мая 2018 г., Санкт-Петербург) СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; 2018. С. 491.
7. Creedon D.L., Goryachev M., Kostylev N., Sercombe T.B., Tobar M. A 3D Printed Superconducting Aluminium Microwave Cavity. *Applied Physics Letters*. 2016;109(3). <https://doi.org/10.1063/1.4958684>
8. Zhang B., Linnér P., Karnfelt C., Tarn P.L., Södervall U., Zirath H. Attempt of the metallic 3D printing technology for millimeter-wave antenna implementations. In: *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. Nanjing, China, 2015, p. 1–3. <https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7413011>
9. Zhang B. et al. Metallic 3-D Printed Antennas for Millimeter- and Submillimeter Wave Applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016;6(4):592–600. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2562508>
10. Honari M.M., Mirzavand R., Saghlatoon H. Mousavi P. Investigation of the 3D Printing Roughness Effect on the Performance of a Dielectric Rod Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2018;17(11):2075–2079. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2869580>
11. Moscato S. et al. Infill-Dependent 3-D-Printed Material Based on NinjaFlex Filament for Antenna Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2016;15:1506–1509. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2516101>
12. Ahmadloo M. Design and fabrication of geometrically complicated multiband microwave devices using a novel integrated 3D printing technique. In: *2013 IEEE 22nd Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems*. San Jose, CA, USA. 2013, p. 29–32. <https://doi.org/10.1109/EPEPS.2013.6703460>
13. Le T. et al. A novel strain sensor based on 3D printing technology and 3D antenna design. In: *2015 IEEE*
1. Elsallal M.W., Hood J., McMichael I. 3D Printed Material Characterization for Complex Phased and Metamaterials. *Microwave Journal*. 2016;59(10):20–34.
2. Zhang S., Cadman D., Whittow W. et al. 3D Antennas, Metamaterials, and Additive Manufacturing. In: *Proc. Conf. 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*. Guangzhou, China. May 19–22, 2019. N.Y.: IEEE; 2019. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IEEE-IWS.2019.8803909>
3. Sadeqi A., Rezaei Nejad H., Oweyung R.E., Sonkusale S. Three dimensional printing of metamaterial embedded geometrical optics (MEGO). *Microsystems & Nanoengineering*. 2019;5:16. <https://doi.org/10.1038/s41378-019-0053-6>
4. Kak my napechatali antenu (How have we printed the antenna) URL: <https://3dtoday.ru/blogs/ilyavyazigin/3d-antenna>
5. Kharalgin S.V., Kulikov G.V., Kotelnikov A.B., Snastin M.V., Dobychina E.M. Prototyping of microwave devices with specified electrodynamic characteristics using additive 3D printing technology. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(1):80–101 (in Russ.) <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101>
6. Demidenko E.V., Kuz'min S.V., Kirik D.I. 3D printing of antenna-feeder devices using polymer materials. In: *VII Vserossiiskaya NTK "Elektronika i mikroelektronika SVCh," sb. tez. dokl. (VII All-Russian Scientific and Technical Conference "Microwave Electronics and Microelectronics," Collection of Abstracts)*. Saint Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University; 2018, p. 491. (in Russ.).
7. Creedon D.L., Goryachev M., Kostylev N., Sercombe T.B., Tobar M. A 3D Printed Superconducting Aluminium Microwave Cavity. *Applied Physics Letters*. 2016;109(3). <https://doi.org/10.1063/1.4958684>
8. Zhang B., Linnér P., Karnfelt C., Tarn P.L., Södervall U., Zirath H. Attempt of the metallic 3D printing technology for millimeter-wave antenna implementations. In: *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. Nanjing, China, 2015, p. 1–3. <https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7413011>
9. Zhang B. et al. Metallic 3-D Printed Antennas for Millimeter- and Submillimeter Wave Applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016;6(4):592–600. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2562508>
10. Honari M.M., Mirzavand R., Saghlatoon H. Mousavi P. Investigation of the 3D Printing Roughness Effect on the Performance of a Dielectric Rod Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2018;17(11):2075–2079. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2869580>
11. Moscato S. et al. Infill-Dependent 3-D-Printed Material Based on NinjaFlex Filament for Antenna Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2016;15:1506–1509. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2516101>
12. Ahmadloo M. Design and fabrication of geometrically complicated multiband microwave devices using a novel integrated 3D printing technique. In: *2013 IEEE*

- 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). San Diego, CA, USA, 2015, p. 981–986. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2015.7159714>
14. Раков А.В., Думчиков К.А., Жуков В.В., Ухандеев В.И., Колединцева М.Ю. Диэлектрические свойства короноэлектретов на основе полилактида. В сб.: *XXIV Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (Фундаментальные физические исследования)»*, сб. тез. докл. (18–19 ноября 2016 г., Москва). М.: НИУ «МЭИ»; 2016. С. 617.
15. Пархоменко М.П., Каленов Д.С., Еремин И.С. и др. Повышение точности измерений комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в сверхвысокочастотном диапазоне волноводным методом. *Радиотехника и электроника*. 2020;65(8):764–768. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.9.6>
- 22nd Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems. San Jose, CA, USA. 2013, p. 29–32. <https://doi.org/10.1109/EPEPS.2013.6703460>
13. Le T. *et al.* A novel strain sensor based on 3D printing technology and 3D antenna design. In: *2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. San Diego, CA, USA, 2015, p. 981–986. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2015.7159714>
14. Rakov A.V., Dumchikov K.A., Zhukov V.V., Ukhandeev V.I., Koledintseva M.Yu. Dielectric properties of coronobacter based on polylactide. In: *XXIV Mezhdunarodnaya konferentsiya “Elektromagnitnoe pole i materialy (Fundamental'nye fizicheskie issledovaniya)”*, sb. tez. dokl. (*Proceedings of the XXIV International Conference Electromagnetic Field and Materials (Fundamental Physical Research)*). Moscow: MPEI; 2016, p. 617. (in Russ.).
15. Parkhomenko M.P., Kalenov D.S., Eremina I.S., Fedoseeva N.A., Kolesnikova V.M., Dyakonova O.A. Improving the accuracy in measuring the complex dielectric and magnetic permeabilities in the microwave range using the waveguide method. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2020;65(8):894–898. <https://doi.org/10.1134/S1064226920080100> [Parkhomenko M.P., Kalenov D.S., Eremin I.S., Fedoseev N.A., Kolesnikova V.M., Barinov Yu.L. Povyshenie tochnosti izmerenii kompleksnykh dielektricheskoi i magnitnoi pronitsaemosti v sverkhvysokochastotnom diapazone volnovodnym metodom. *Radiotekhnika i elektronika = Journal of Communications Technology and Electronics*. 2020;65(8):746–768 (in Russ.).]

Об авторах

Харалгин Сергей Владимирович, инженер-электроник 1 категории АО «ЦНИРТИ им. Академика А.И. Берга» (107078, Россия, Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9). E-mail: hsvl92@mail.ru.

Войтович Максим Иванович, начальник лаборатории АО «ЦНИРТИ имени академика А.И. Берга» (107078, Россия, Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9). E-mail: maksimvoytovich@gmail.com.

About the authors

Sergey V. Kharalgin, Electronics Engineer of the 1st category, Academician A.I. Berg Central Radio-Research Institute (20, Novaya Basmannaya ul., Moscow, 107078 Russia). E-mail: hsvl92@mail.ru.

Maksim I. Voytovich, Head of Laboratory, Academician A.I. Berg Central Radio-Research Institute (20, Novaya Basmannaya ul., Moscow, 107078 Russia). E-mail: maksimvoytovich@gmail.com.

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 621.3.08:621.3.089.2:621.311.6

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-66-77>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Топология безындуктивных DC/DC преобразователей с гальваническим разделением цепей

В.П. Бабенко,
В.К. Битюков[@]

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме. В малоэнергопотребляющих и высокоинтегрированных электронных системах используются безындуктивные (бездроссельные) DC/DC преобразователи, позволяющие избежать характерных ограничений для дроссельных преобразователей – стоимость и массогабариты дросселей. Проведен схемотехнический анализ базовых топологий безындуктивных DC/DC преобразователей с накачкой заряда, выполняющих типовые преобразования напряжения постоянного тока – понижение, повышение и инвертирование. Гальваническая развязка между входной и выходной цепями преобразователя достигается даже в интегральном исполнении за счет формирования временной задержки ключей (Dead Time, DT), коммутирующих «летающий» конденсатор, перекачивающий заряд в накопительный конденсатор и нагрузку. Разработана схема формирователя DT и исследованы его параметры, при которых обеспечивается предотвращение сквозных токов через ключи, и выполняются условия гальванической развязки входной и выходной цепей. Имитационное моделирование выполнено в популярной программе *Electronics Workbench*, широко используемой в подготовке специалистов радиоэлектронного профиля в высшей школе. Представлены результаты исследования основных энергетических характеристик DC/DC преобразования, таких как выходные ток и напряжение, коэффициент передачи напряжения, КПД, выходное эквивалентное сопротивление. Проведена оценка эффективности преобразования при вариации емкостей «летающего» и накопительного конденсаторов, сопротивления ключей в замкнутом состоянии и частоты коммутации. Показано, что метод накачки заряда прост и эффективен при небольших токах нагрузки (единицы мА), когда коэффициент передачи напряжения с входа на выход и КПД высоки и приближаются к единице. Однако при увеличении тока нагрузки снижается коэффициент передачи напряжения и КПД, растут пульсации выходного напряжения.

Ключевые слова: радиоэлектроника, DC/DC, преобразователь, накачка заряда, зарядовый насос, безындуктивный, моделирование, «летающий» конденсатор, конденсатор фильтра, пульсации, X-точка

• Поступила: 15.06.2020 • Доработана: 03.07.2020 • Принята к опубликованию: 30.08.2020

Для цитирования: Бабенко В.П., Битюков В.К. Топология безындуктивных DC/DC преобразователей с гальваническим разделением цепей. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):66–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-66-77>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Topology of non-inductive DC/DC converters with galvanic isolated circuits

Valery P. Babenko,
Vladimir K. Bitukov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract. Non-inductive (throttle-free) DC/DC converters are used in low-power and highly integrated electronic systems. A circuit analysis of the basic topologies of non-inductive DC/DC charge-pumped converters which perform typical DC-voltage conversions, i.e., lowering, raising and inverting, was carried out. The galvanic isolation between the input and output circuits of the converter was achieved even in the integrated version due to forming a time delay of the switches (Dead Time, DT), commuting a “flying” capacitor, which is transferring the charge to the storage capacitor and the load. A circuit of the DT driver was developed and its parameters, at which the through-current flow in the switch is prevented and the conditions of galvanic isolation of the input and output circuits are satisfied, were studied. The simulation was built with a popular Electronics Workbench software, widely used in training of specialists in radio electronics at higher educational institutions. The results of the study of the basic power characteristics of DC/DC conversion, such as output current and voltage, voltage transfer coefficient, efficiency, output equivalent resistance, were presented. The efficiency of conversion was estimated by varying the capacities of the “flying” and storage capacitors, the resistance of the switches in the closed state, and the frequency of switching. It is proved that the charge pumping method is simple and effective at low load currents (mA units), when both the voltage transfer coefficient from input to output and efficiency are high, and are approaching to “one”. However, with the increase of the load current, the voltage transfer coefficient and efficiency decrease, the output voltage ripples increase.

Keywords: radio electronics, DC/DC, converter, current charge pumping, a charge pump, non-inductive, simulation, “flying” capacitor, filter capacitor, ripples, X-point

• Submitted: 15.06.2020 • Revised: 03.07.2020 • Accepted: 30.08.2020

For citation: Babenko V.P., Bitukov V.K. Topology of non-inductive DC/DC converters with galvanic isolated circuits. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):66–77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-66-77>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

Емкостные зарядовые насосы относятся к классу безындуктивных (бездрессельных) DC/DC преобразователей с накоплением энергии в конденсаторе и переносом заряда от одного конденсатора к другому с помощью системы переключателей. Подобные преобразователи имеют превосходные массогабаритные характеристики, высокий КПД, совместимы с интегральной технологией и не требуют дорогих катушек индуктивности. Они прекрасно работают в слаботочных портативных устройствах с батарейным питанием, требующих нескольких напряжений, где первостепенное значение имеет комбинация малых массогабаритных параметров, микропотребления,

высокого КПД и не предъявляется жестких требований к качеству стабилизации. Эти простые схемы могут удваивать, инвертировать постоянное входное напряжение, прекрасно совмещаются с архитектурой микроконтроллерных систем, находящих большую часть времени в режиме ожидания с минимальным энергопотреблением (когда система лишь изредка переключается в активный режим) [1–4].

В литературе безындуктивные преобразователи без регулировки выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ или с дискретным регулированием получили названия «зарядовый насос» или «преобразователи с накачкой (или подкачкой) заряда». В случае если в структуре

зарядового насоса имеется какой-либо механизм регулировки выходного напряжения, то такие DC/DC преобразователи обычно относят к классу преобразователей на переключаемых конденсаторах [1].

В последние годы проблеме построения DC/DC преобразователей с накачкой заряда посвящено достаточно много работ. Физика и схемотехника DC/DC преобразователей рассмотрены в [5–11], результаты моделирования – в [12–16], а экспериментального исследования конкретных микросхем, например, MAX1759, MCP1253 и LM27762 – в [5, 17–23].

Необходимо поддерживать инновационный подход к исследованию DC/DC, который изложен в [23]. В этой работе представлены результаты моделирования работы микросхемы двухполярного DC/DC преобразователя LM27762 с помощью программного обеспечения *WEBENCH Power Designer*, разработанного компанией-производителем *Texas Instruments*. Расчеты проведены непосредственно на сайте компании. При выполнении экспериментальных исследований была использована полученная от производителя микросхемы LM27762 готовая тестовая плата – тестовый модуль LM27762EVM. Наличие тестовой платы, модели и программного обеспечения, созданных производителем микросхемы, снимает все проблемные вопросы сопоставления результатов моделирования с результатами эксперимента, которые могут быть связаны с использованием компонентов схемы с отличающимися характеристиками и влиянием разводки платы. В технической документации на микросхему отсутствует информация о характеристиках использованных в микросхеме ключей и конденсаторов. К сожалению, нет и описания разработанной модели. Выполнено сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов. Показано, что созданная производителем модель работы микросхемы LM27762 является приближенной. Модель работы микросхемы не позволяет получать данные по пульсациям отрицательного напряжения на ее выходе. Эксперименты показали, что приводимые в документации на микросхему очень ограниченные данные по пульсациям выходного напряжения являются заниженными.

Они существенно зависят от входного и выходного напряжения и токов нагрузки. В целом сравнение результатов моделирования работы системы накачки заряда микросхемы LM27762 при ее работе в режиме пачек с соответствующими результатами экспериментов показывает, что на качественном уровне совпадение результатов расчета с экспериментом можно считать удовлетворительным. Обнаруженное расхождение результатов экспериментов с результатами моделирования, полученными при использовании модели производителя LM27762, показало, что реальная проверка совершенства микросхем должна опираться на три фактора: эксперимент, моделирование и совместный анализ полученных результатов.

Однако многие вопросы схемотехнических особенностей DC/DC преобразователей с накачкой заряда не изучены.

В типовой реализации (рис. 1) DC/DC преобразователя с накачкой заряда используется принцип коммутации конденсатора C1 с помощью двояных ключей S1 и S2. Преобразование напряжения происходит за счет перераспределения заряда в конденсаторах C1 и C2. Конденсатор C1 называется «летающим» (очевидно термин связан с его «перелетом» (переключением) от входной цепи к выходной). Конденсатор C2 – накопительный конденсатор, обеспечивающий сглаживание пульсаций выходного напряжения.

Значимым параметром DC/DC преобразователей является коэффициент k_u передачи напряжения со входа на выход, определяемый формулой $k_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$, где $U_{\text{вх}}$ – входное напряжение. Он, в свою очередь, определяется конфигурацией включения конденсаторов в первой и второй фазах работы DC/DC преобразователя.

В начальном тактовом цикле, когда двоянные ключи S1 и S2 находятся в положении 1, «летающий» конденсатор C1 заряжается током $I_{\text{зар}}$ от источника E1 постоянного входного напряжения (рис. 1а) до напряжения $U_{\text{вх}}$, а в следующем тактовом цикле, когда ключи S1 и S2 находятся в положении 2, «летающий» C1 разряжается током $I_{\text{разр}}$ на параллельно включенные накопительный конденсатор C2 фильтра и нагрузку R1 (рис. 1б) до напряжения $U_{\text{вых}}$.



Рис. 1. Циклы заряда/разряда «летающего» конденсатора C1 в режиме повторителя:
(а) цикл заряда; (б) цикл разряда

В таком DC/DC преобразователе «летающий» конденсатор C1 перекачивает заряд из входной цепи в выходную. Напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ на резисторе нагрузки R1 имеет ту же полярность, что и $U_{\text{ВХ}}$. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ практически равно входному напряжению $U_{\text{ВХ}}$ или несколько меньше. Различие напряжений $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ зависит от емкости конденсаторов C1 и C2 и постоянной времени τ разряда конденсатора C2 через резистор нагрузки R1, т.е. $\tau = R_1 C_2$. Особенностью преобразователей подобного типа, представляющих практический интерес, является гальваническая развязка источника входного $U_{\text{ВХ}}$ и выходного $U_{\text{ВЫХ}}$ напряжений, что позволяет комбинировать включение этих гальванически независимых источников напряжения при высоком КПД перекачки заряда. Фактически рассматриваемая топология DC/DC преобразователя реализует повторитель напряжения (рис. 1).

На рис. 2 показана упрощенная схема DC/DC преобразователя с инверсией полярности выходного напряжения и с накачкой заряда $U_{\text{ВЫХ}} \approx -U_{\text{ВХ}}$.

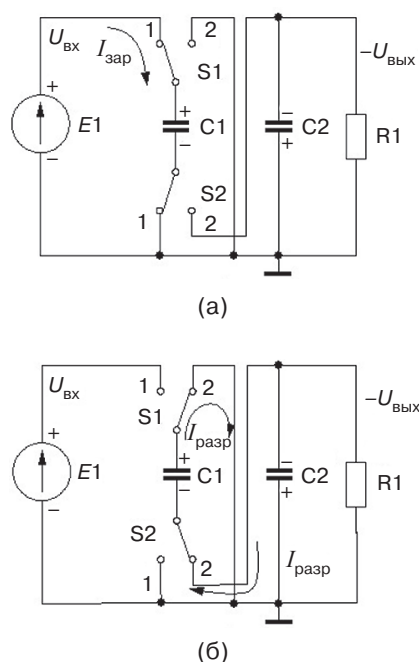


Рис. 2. Циклы заряда/разряда «летающего» конденсатора C1 в режиме инвертора: (а) цикл заряда; (б) цикл разряда

«Летающий» конденсатор C1 заряжается, как и в предыдущем случае, до напряжения $U_{\text{ВХ}}$ входного источника напряжения и разряжается на накопительный конденсатор C2 с инверсией знака напряжения. Отсутствие гальванической связи между источником выходного напряжения (конденсатор C2) и входной цепью позволяет заземлить любой выход конденсатора фильтра C2 и получить отрицательное напряжение на выходе относительно «земли» (рис. 2) по модулю несколько меньшее входного или последовательно

сложить напряжение на «летающем» конденсаторе C1 с входным напряжением $U_{\text{ВХ}}$, получая на нагрузке напряжение приблизительно вдвое большее, чем входное, как показано на рис. 3.

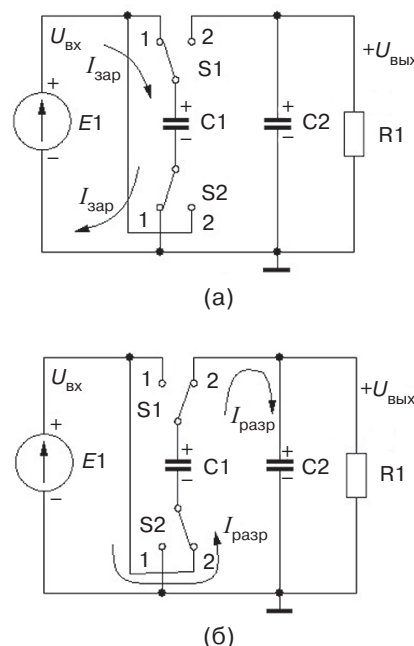


Рис. 3. Циклы заряда/разряда «летающего» конденсатора C1 в режиме удвоителя напряжения: (а) цикл заряда; (б) цикл разряда

В отличие от DC/DC преобразователей с индуктивными элементами, напряжение на выходе которых обычно регулируется изменением коэффициента заполнения импульсов, регулирование и стабилизация выходного напряжения с сохранением высокого КПД в устройствах с коммутацией конденсаторов возможно лишь дискретно изменением коммутации ключей, выполняемой управляющим контроллером.

Топология преобразователя с единственным «летающим» конденсатором является простейшей и позволяет реализовать высокий КПД лишь тогда, когда выходное напряжение кратно входному напряжению при коэффициенте передачи k_u напряжения со входа на выход равном 2/1, 1/1, 1/2. При усложнении схемы, например, при увеличении количества коммутируемых параллельно-последовательно включенных конденсаторов, можно обеспечить более тонкую градацию коэффициента передачи напряжения со входа на выход. При n коммутируемых конденсаторах можно обеспечить значение k_u в диапазоне [3]

$$\frac{2n-2}{2n-1} \geq k_u \geq \frac{1}{2n-1}.$$

Дискретная регулировка позволяет сохранить высокий КПД во всем диапазоне регулируемого

напряжения, но точность поддержания выходного напряжения невысока и определяется топологией ключей и возможностями управляющего контроллера.

В тех случаях, когда предъявляются более жесткие требования к стабильности выходного напряжения DC/DC преобразователей, используется плавная регулировка с помощью линейного стабилизатора с малым падением напряжения на регулирующем элементе LDO, что обеспечивает высокий уровень стабилизации выходного напряжения, низкие пульсации и шум при некотором снижении КПД.

Основными элементами DC/DC преобразователей с накачкой заряда является набор переключателей и конденсаторов. В конструкциях на дискретных компонентах переключателями служат диоды (в выпрямителях с умножением напряжения), а в интегральном исполнении вместо них используются MOSFET переключатели с малым сопротивлением открытого канала, управляемые встроенным тактовым генератором. Конденсаторы обычно не включаются в состав микросхем, что позволяет выбирать их тип и емкость в зависимости от рабочей частоты и требований к пульсациям выходного напряжения. Выпускаются также микросхемы со встроенными конденсаторами, но выбор их невелик, а цена высока.

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При проектировании DC/DC преобразователей с накачкой заряда необходимо учитывать особенности процессов обмена энергией в коммутируемых конденсаторах, а также способы, которыми достигается высокая эффективность преобразования и особенности коммутационных процессов в переходных режимах работы.

Схемотехническое моделирование позволяет исследовать коммутационные процессы работы DC/DC преобразователя, а это, в свою очередь, позволяет выбрать технические решения для минимизации потерь преобразования и тепловыделения, обеспечивающих большой КПД, и оптимизировать частоту переключения.

При моделировании подобных преобразователей следует учитывать следующие особенности:

- силовой ключ работает в режиме с большими импульсными токами и возможным изменением полярности напряжений на его выводах;
- драйверы управления ключом должны обеспечивать необходимые управляющие токи и напряжения, обеспечивая высокое быстродействие и гальваническую развязку между силовыми и управляющими цепями;
- использование топологии множества силовых ключей, работающих в определенной последовательности, требует формирования временной

задержки («мертвое» время, Dead Time) – паузы в интервалах между включением и выключением, чтобы исключить протекания сквозных токов во время переходных процессов.

В качестве среды моделирования была использована программа *Electronics Workbench (EWB)*, что обусловлено спецификой поставленной задачи. Программа *EWB* (младшие версии) давно и успешно используется при проведении имитационного моделирования [2, 4, 5], отличается удобным, интуитивно понятным интерфейсом. Кроме традиционного Spice анализа *EWB* позволяет пользователям подключать к исследуемой схеме виртуальные контрольно-измерительные приборы, приближенные к реальным аналогам. В *EWB* имеется встроенная обширная библиотека аналоговых и цифровых электронных компонентов, большой набор методов анализа различных характеристик электронных схем. Имеется большая библиотека мощных *n*- и *p*-канальных MOSFET транзисторов фирм *International Rectifier* и *Zetex Semiconductors*, открывающая возможность анализа схемотехники силовых устройств. В настоящее время накоплен значительный опыт и существует обширная литература по использованию *EWB* в разных областях аналоговой и цифровой электроники.

Однако задача моделирования осложняется отсутствием в библиотеке программы *EWB* элементной базы контроллеров и драйверов с функцией «Dead Time». Вопросы формирования и оптимизации временных задержек требуют соответствующего схемотехнического решения.

При моделировании DC/DC преобразователя с накачкой заряда простое и естественное решение реализовать ключи на MOSFET транзисторах с соответствующими драйверами, как часто и бывает, не является самым лучшим. Недостатки очевидны: сложность и большое количество компонент, в том числе, по крайней мере, четыре силовых ключа, управляемых каждый своим контроллером. Причем работа контроллеров должна быть определенным образом синхронизована для предотвращения сквозных токов через каждую пару последовательно включенных ключей. В литературе информация о подобных устройствах ограничивается на уровне функциональных схем без рассмотрения электрических схем.

Процесс схемотехнического моделирования целесообразно разбить на два этапа. На первом этапе отрабатывается коммутационная схема преобразователя на базе идеализированного ключа. Исследуются основные характеристики, связанные с управлением, уточняются требования к коммутаторам. И лишь на втором этапе возможна разработка и отладка электрической схемы преобразователя на MOSFET компонентах и исследование энергетических характеристик работы преобразователя.

В функциональном наборе средств программы *EWB* имеется несколько инструментов, которые пригодны при моделировании ключей с гальванической развязкой управляющих сигналов от силовых ключей. Простейшим решением является библиотечный компонент *Voltage-Controlled Switch* – двухконтактный электромеханический ключ, привлекающий несомненными достоинствами:

- управляется логическим сигналом;
- нет ограничений по току, напряжению и быстродействию;
- цепь управления и силовая цепь гальванически развязаны;
- имеется возможность задавать в опциях сопротивление ключа во включенном и выключенном состоянии.

При моделировании схемы (рис. 1) зарядового насоса трехконтактные ключи были заменены на двухконтактные S1–S4 (рис. 4), управление которыми производится парафазными импульсами, формируемыми логическими элементами (ЛЭ) U1 и U2. Частота коммутации задается генератором прямоугольных импульсов V2 (Clock) 500 кГц с коэффициентом заполнения импульса 0.5. Цепочка R1C3 и логические элементы U1 и U2 формируют временную паузу t_3 («мертвое» время, Dead Time) между моментом закрытия силовых ключей S1 и S2, через которые осуществляется заряд «летающего» конденсатора C1 и моментом включения ключей S3 и S4, через которые конденсатор C1 перекачивает заряд в накопительный конденсатор C2 и нагрузку R4.

Контроль входного тока (постоянной составляющей), потребляемого зарядовым насосом от источника напряжения V1, выполняется амперметром M1. Контроль формы импульсов входного тока осуществляется осциллографом и преобразователем

ток-напряжение V3 (Current Controlled Voltage Source), который преобразует ток, протекающий через датчик тока, в эквивалентное ему напряжение, выделяемое на заземленном резисторе R3. Входной фильтр L1C4 уменьшает влияние импульсной составляющей входного тока на показания амперметра M1.

Выходной ток и напряжение на нагрузке R4 (постоянная составляющая) измеряются приборами M3 и M4, а форма напряжения пульсаций выходного напряжения контролируется осциллографом.

Гальваническая развязка между выходным напряжением на сопротивлении нагрузки и входным напряжением, формируемым источником напряжения V1, позволяет заземлить выходную секцию зарядового насоса C2 и R4 двумя способами, как показано пунктиром на схеме (рис. 4) – GND1 и GND2. Если выполнено заземление GND1, то напряжение на выходе отрицательное, а зарядовый насос работает в режиме инвертора. Если выполнено заземление GND2, то напряжение на выходе положительное, и зарядовый насос работает в режиме повторителя.

Временные диаграммы работы преобразователя приведены на рис. 5.

Время задержки импульсов t_3 в схеме управления коммутаторами связано с искажением фронтов интегрирующей RC-цепочкой R1C3 (рис. 5б). Длительность временного интервала задержки

$$t_3 \cong \tau \cdot \ln \frac{E^1}{U_{\text{пор}}},$$

где E^1 – высокий логический уровень, $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение переключения логического элемента, $\tau = R1C3$ – постоянная времени RC-цепи, $R1 = 1 \text{ кОм}$, $C1 = 100 \text{ пФ}$.

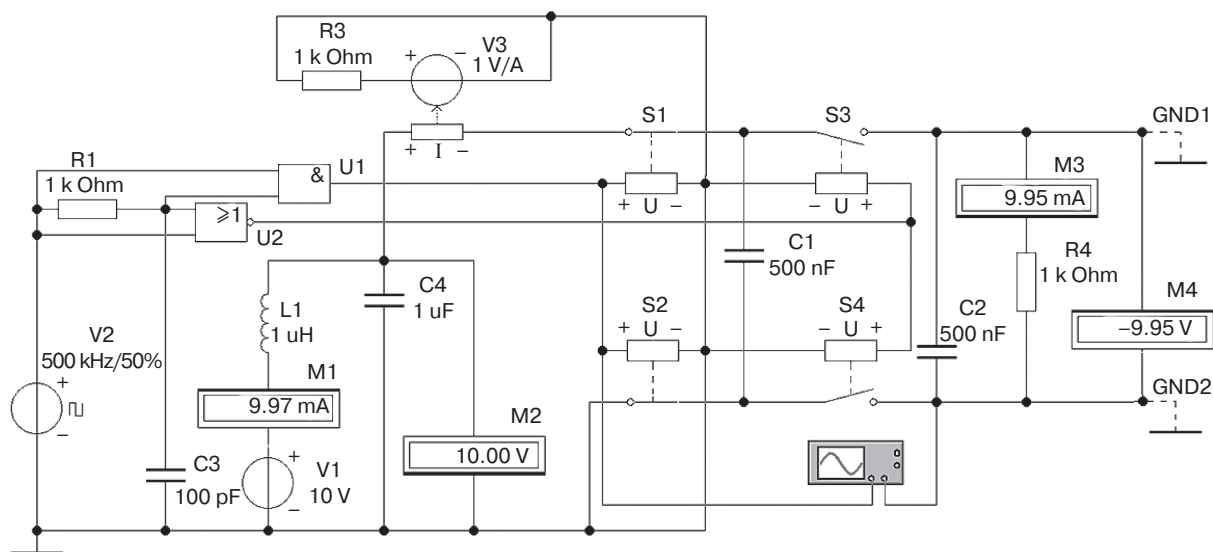


Рис. 4. Схема для исследования зарядового насоса в режиме инвертора и повторителя

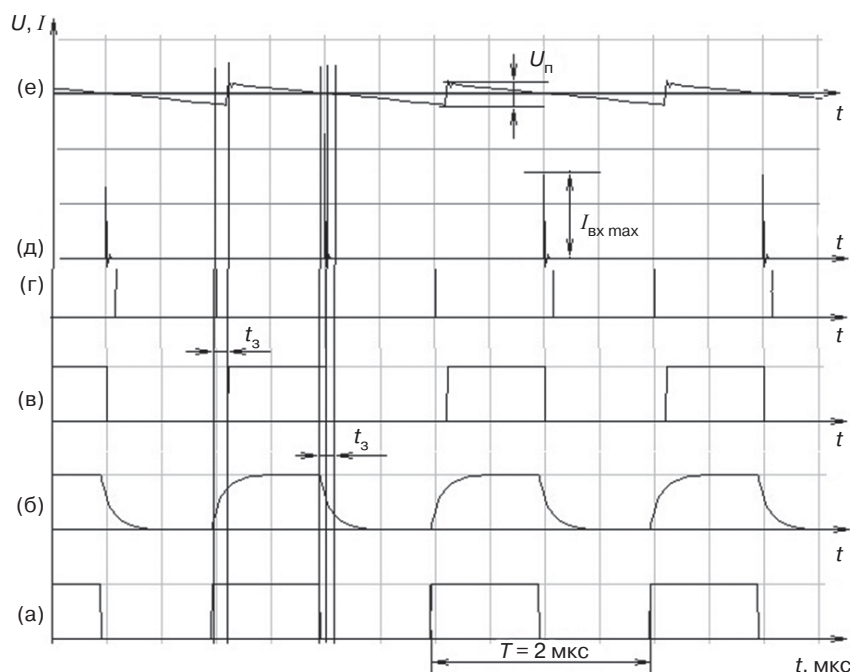


Рис. 5. Временные диаграммы:

- (а) тактовые импульсы генератора V2; (б) напряжение на конденсаторе C1;
(в, г) напряжение задержанного импульса на выходе ЛЭ U1 и U2, соответственно;
(д) входной ток преобразователя;
(е) напряжение пульсаций на выходе преобразователя

Конъюнкция входного импульса (диагр. (а) рис. 5) и импульса после RC цепи (диагр. (б) рис. 5) на элементе U1 «И» позволили получить задержанный импульс управления (диагр. (в) рис. 5) для коммутации ключей S3, S4. Та же комбинация сигналов на входе логического элемента U2 «ИЛИ-НЕ» позволила получить задержанный импульс управления (диагр. (г) рис. 5) для коммутации ключей S1, S2. Время задержки коммутирующих импульсов, достаточное для надежного функционирования, составило около $t_3 = 80$ нс.

Входной ток преобразователя (диагр. (д) рис. 5) содержит постоянную составляющую и короткий импульс тока в момент заряда «летающего» конденсатора с пиковым значением $I_{vx \max}$ около 80 А. Токвые импульсы могут быть источником помех, уровень которых целесообразно снижать использованием входного фильтра L1C4.

Выходное напряжение (вольтметр V4) при токе нагрузки около 0.8 А составляло 8.15 В, что соответствует коэффициенту передачи k_u напряжения со входа на выход равным 0.81. Размах пульсации U_n выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ (диагр. (е) рис. 5) составлял примерно 200 мВ.

Необходимо отметить ряд особенностей моделирования рассматриваемых устройств. При наладке схемы моделирования критерием правильной работы схемы является обеспечение гальванической развязки между входной секцией «летающего»

конденсатора C1 и выходной секцией накопительного конденсатора C2.

Во-первых, необходимо убедиться, что напряжение на нагрузке R4, контролируемое вольтметром M4, не изменяется при подключении «земли» к любому выводу нагрузки R4 (верхнему или нижнему) GND1 или GND2, что соответствует положительному или отрицательному напряжению на выходе относительно «земли». Изменение напряжения на вольтметре M4 при подключении заземления GND1 или GND2 является признаком того, что имеются сквозные токи через ключи S1–S4, за счет чего существует гальваническая связь между входной и выходной цепью.

Во-вторых, убедиться в наличии сквозных токов можно в несложном эксперименте. Для этого надо перевести схему, показанную на рис. 4, в режим повторителя, заземлив вывод GND2, отключить или уменьшить до 1 пФ емкости конденсаторов C1, C2 и C3 и на осциллографе наблюдать короткие импульсы (амплитудой, равной напряжению питания V1 и длительностью, равной десяткам наносекунд) сквозного тока на нагрузке R4. Увеличивая емкость конденсатора C3, таким образом увеличивая время задержки DT, добиваются исчезновения сквозного тока; затем нужно восстановить исходные значения емкостей конденсаторов C1 и C2 и убедиться, что в рабочем режиме напряжение на выходе не изменяется при подключении заземления GND1 или GND2.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование влияния сопротивления нагрузки на выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ выполнено в режиме Analysis Parameter Sweep, когда варьируемым параметром было сопротивление нагрузки R_H , а контролируемым – напряжение на выходе. Несмотря на то, что исследуемое выходное напряжение постоянно, моделирование приходилось проводить во временной области в режиме Transient Analysis, так как при включении установившийся режим наступает с задержкой порядка 100 мкс (рис. 6). При малом токе нагрузки (линия 3 на рис. 6) и сопротивлении нагрузки R_H , превышающем 1 кОм, коэффициент k_u передачи напряжения со входа на выход практически равен единице. Однако с увеличением тока нагрузки при сопротивлении нагрузки $R_H < 100$ Ом k_u быстро снижается (линии 1, 2 на рис. 6). Также с ростом тока нагрузки увеличиваются пульсации выходного напряжения (график 1 на рис. 6).

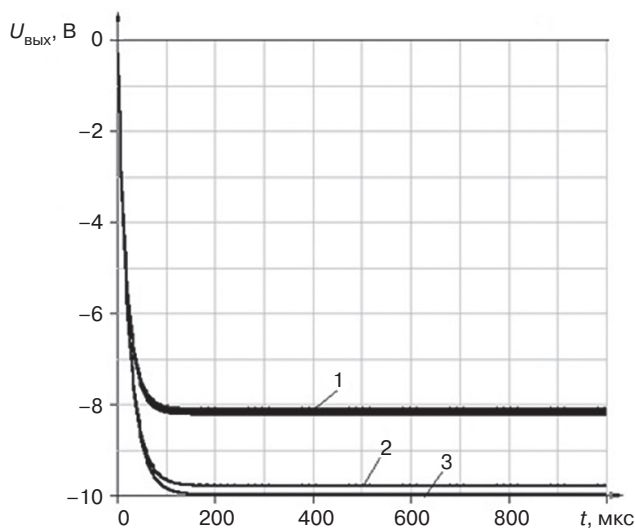
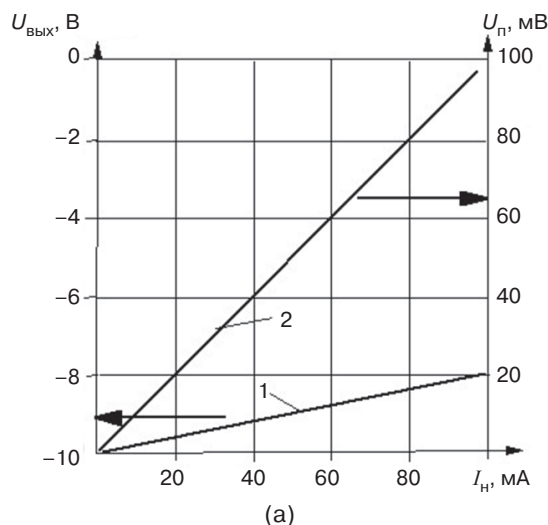


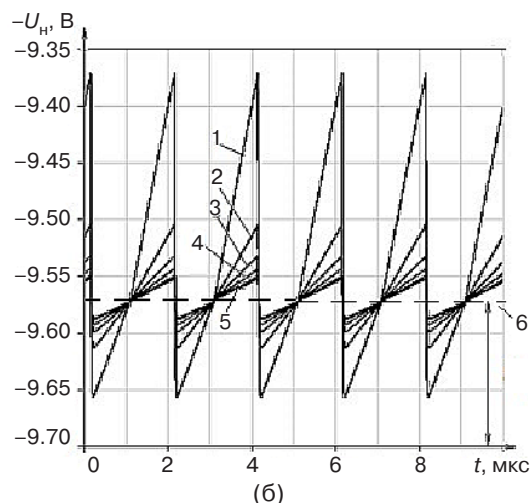
Рис. 6. Зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ зарядового насоса в режиме инвертора от сопротивления нагрузки (при $C1 = 1$ мкФ, $C2 = 10$ мкФ):
1 – $R_H = 10$ Ом; 2 – $R_H = 100$ Ом; 3 – $R_H = 1000$ Ом

Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ инвертора в установившемся режиме уменьшается при увеличении тока нагрузки. Зависимость постоянной составляющей выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от тока нагрузки I_H удобно представить в классической форме в виде нагрузочной характеристики (график 1 на рис. 7а), полученной по результатам показаний приборов МЗ и М4. Линейная зависимость нагрузочной характеристики позволяет вместо графического представления использовать параметр динамического сопротивления $R_{\text{экв}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_H$, зависящий от емкости «летающего» конденсатора $C1$ и частоты коммутации f . Так при емкости «летающего» конденсатора $C1 = 1$ мкФ, динамическое сопротивление $R_{\text{экв}}$

преобразователя при частоте коммутации $f = 500$ кГц составило 2 Ом, а при емкости «летающего» конденсатора $C1 = 0.01$ мкФ – 200 Ом.



(а)



(б)

Рис. 7. Выходные характеристики DC/DC инвертора:
(а) зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от тока нагрузки I_H :
1 – постоянная составляющая;
2 – амплитуда пульсаций $U_{\text{п}}$;
(б) форма пульсаций выходного напряжения при емкости конденсатора $C2$:
1 – 1 мкФ; 2 – 3 мкФ; 3 – 5 мкФ; 4 – 7 мкФ;
5 – 10 мкФ; 6 – уровень постоянной составляющей выходного напряжения $U_{\text{вых}}$

С ростом тока нагрузки I_H возрастает амплитуда пульсаций $U_{\text{п}}$ выходного напряжения (линия 2 на рис. 7а), величина которой в основном определяется величиной емкости конденсатора $C2$ фильтра и током нагрузки I_H . Осциллограммы пульсаций выходного напряжения (рис. 7б) получены для разной емкости конденсатора $C2$ фильтра при $C1 = 1$ мкФ и сопротивления нагрузки $R_H = 10$ Ом. Форма пульсаций представляет собой линейно изменяющееся напряжение, крутизна которого различна, ниже и выше уровня $U_{\text{вых}}$, отмеченного пунктиром 6, что особенно замет-

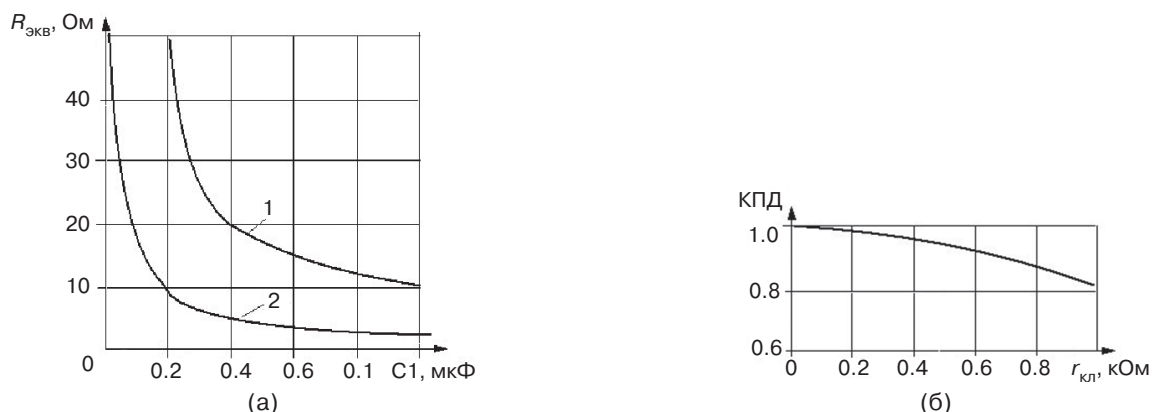


Рис. 8. Энергетические характеристики инвертора:

- (а) зависимость выходного эквивалентного сопротивления $R_{\text{экв}}$ от емкости «летающего» конденсатора $C1$ при частотах коммутации:
1 – $f = 100$ кГц; 2 – $f = 500$ кГц;
(б) зависимость КПД преобразователя от сопротивления ключа $r_{\text{кл}}$

но при уменьшении емкости фильтра $C2$ (линия 1 на рис. 7б) и повышенной амплитуде пульсаций.

Особенность временной зависимости мгновенного выходного напряжения при вариации емкости конденсатора $C2$ фильтра проявляется в наличии Х-точки, амплитуду которой и называют постоянной составляющей выходного напряжения $U_{\text{вых}}$.

Подобный факт, а именно наличие Х-точки, ранее был отмечен у спектральной монохроматической излучательной способности ряда металлов, например, молибдена, золота, кобальта, платины, рения, то есть точки пересечения изотерм излучательной способности [24]. Более того, тантал имеет даже Х-область.

Асимметрия формы пульсаций выходного напряжения связана с изменением постоянной времени цепи нагрузки во время циклов заряда/разряда «летающего» конденсатора. Уровень напряжения $U_{\text{вых}}$, отмеченный пунктиром 6 (рис. 7б), лишь в первом приближении можно называть постоянной составляющей выходного напряжения. Постоянная составляющая выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, измеренная осциллографом (рис. 7б), не зависит от величины емкости конденсатора $C2$ фильтра, но при измерении выходного напряжения вольтметром М4 наблюдается слабое ее влияние вследствие асимметрии формы пульсаций.

Динамическое эквивалентное сопротивление DC/DC инвертора напряжения при указанных параметрах схемы составило 2 Ом и определялось емкостью конденсатора $C1$. На рис. 8а приведена экспоненциальная зависимость выходного динамического сопротивления $R_{\text{экв}}$ для разных значений «летающего» конденсатора $C1$. С увеличением частоты коммутации f выходное сопротивление снижается. Вследствие асимметрии формы пульсаций напряжения наблюдается некоторое расхождение в показании вольтметра М4, выполняющего интегрирование выходного напряжения, и измерениями $U_{\text{вых}}$ осциллографом, как показано на рис. 7б.

При выборе параметров коммутирующих транзисторов практический интерес представляет влияние сопротивления $r_{\text{кл}}$ ключей S1–S4 в замкнутом состоянии на работу преобразователя, что является определяющим фактором при выборе типа транзисторов, оценки потерь преобразования и КПД.

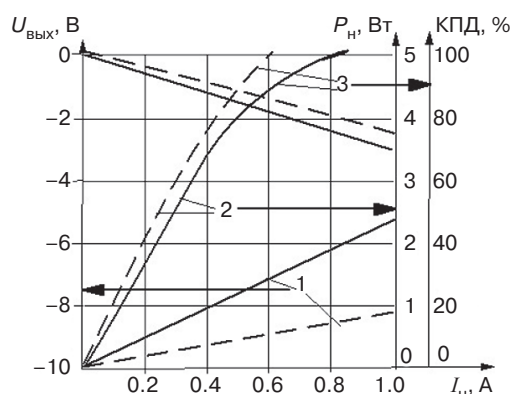


Рис. 9. Характеристики инвертора при разном токе нагрузки I_n и разной емкости конденсаторов $C1 = C2 = C$ (сплошные линии – $C = 0.5$ мкФ; штриховые линии – $C = 1$ мкФ):
1 – выходное напряжение $U_{\text{вых}}$;
2 – мощность P_n нагрузки; 3 – КПД

Количественно влияние $r_{\text{кл}}$ моделировали, изменяя параметр One State Resistance в опциях ключа Voltage-Controlled Switch при оценке КПД. Как и следовало ожидать, КПД снижается с ростом сопротивления ключа. На рис. 8б приведена зависимость КПД от сопротивления ключа $r_{\text{кл}}$. Моделирование проводилось при параметрах, указанных в схеме, и сопротивлении нагрузки 10 Ом. Как показало моделирование, сравнительно небольшое сопротивление $r_{\text{кл}} \leq 0.1$ Ом слабо влияет на выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ и КПД, что вполне согласуется с возможностями современных MOSFET транзисторов.

С ростом силы тока нагрузки I_H линейно уменьшается выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ инвертора, растет выходная мощность (график 2 на рис. 9), но снижается КПД (график 3 на рис. 9). Увеличение емкости конденсаторов C1 и C2 несколько улучшает картину (пунктирные графики на рис. 9), сохраняя основные тенденции. Однако приемлемые энергетические характеристики безындуктивного преобразователя с накачкой заряда обеспечиваются при токе нагрузки менее 100 мА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен схемотехнический анализ трех топологий безындуктивных DC/DC преобразователей с накачкой заряда и гальванической развязкой между входной и выходной цепями:

- топология повторителя обеспечивает гальваническую развязку выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ и входного напряжения $U_{\text{вх}}$, причем $U_{\text{вых}}$ имеет ту же полярность, что и $U_{\text{вх}}$, и выходное напряжение практически равно входному напряжению или несколько меньше;
- топология инвертора обеспечивает гальваническую развязку $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$, причем выходное напряжение приблизительно равно входному напряжению, но противоположного знака, то есть $U_{\text{вых}} \approx -U_{\text{вх}}$;
- топология удвоителя напряжения позволяет получить выходное напряжение той же полярности, что и входное, но приблизительно вдвое большее, чем входное $U_{\text{вых}} \approx 2U_{\text{вх}}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яблоков Д. Современные микропотребляющие DC/DC-преобразователи с накачкой заряда для приборов с батарейным питанием. *Компоненты и технологии*. 2005;2:96–99.
2. DC-DC conversion without inductors. Maxim Integrated Product. Appnote 725. 22 Jul. 2009. URL: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN725.pdf>
3. Ballo A., Grasso A.D., Palumbo G. A Review of Charge Pump Topologies for the Power Management of IoT Nodes. *Electronics*. 2019;8(5):480. <https://doi.org/10.3390/electronics8050480>
4. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. *Источники вторичного электропитания*. М.: Инфра-Инженерия; 2019. 376 с. ISBN: 978-5-9729-0267-5
5. Lubarsky G. The forgotten converter. Charge-pump basics. Operation. Texas Instruments Incorporated. SLPY005. 2 July 2015. URL: <http://www.ti.com/lit/wp/slp005/slp005.pdf>
6. Онышко Д. Преобразователи постоянного напряжения на коммутируемых конденсаторах. *Chip News*. 2002;3. http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/publ/_rtcs/90_pwm_C_MAX.htm

В рассмотренной топологии удвоителя гальваническая развязка не выполняется.

В рассмотренной схеме зарядового насоса использовались идеализированные ключи из библиотеки программы *Electronics Workbench*, управляемые логическими сигналами, гальванически не связанными с коммутируемыми цепями, которые не имеют ограничений по быстродействию и коммутируемому току. Но они позволили при моделировании DC/DC преобразователей с накачкой заряда варьировать сопротивление замкнутого ключа. Регулируемая схема задержки на логической цепочке обеспечивала формирование временной паузы («мертвое» время, Dead Time) между моментом закрытия одной пары силовых ключей, через которые осуществлялся заряд «летающего» конденсатора, и моментом открытия другой пары ключей, через которые «летающий» конденсатор перекачивает заряд в накопительный конденсатор и нагрузку. Проведенное исследование показало, что минимальное время задержки, при котором обеспечивается гальваническая развязка входной и выходной цепи, составило около 80 нс.

Исследованы энергетические характеристики зарядового насоса в режиме инвертора, форма входного тока, величина выходного напряжения, форма пульсаций выходного напряжения, частота коммутации и факторы, влияющие на выходные параметры.

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

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

REFERENCES

1. Yablokov D. Modern micro-consuming charge-pump DC/DC converters for battery powered devices. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*. 2005;2:96–99 (in Russ.).
2. DC-DC conversion without inductors. Maxim Integrated Product. Appnote 725. Jul. 22, 2009. URL: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN725.pdf>
3. Ballo A., Grasso A.D., Palumbo G. A Review of Charge Pump Topologies for the Power Management of IoT Nodes. *Electronics*. 2019;8(5):480. <https://doi.org/10.3390/electronics8050480>
4. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. *Istochniki vtorichnogo elektropitaniya (Secondary power supplies)*. Moscow: Infra-Inzheneriya; 2019. 376 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-9729-0267-5
5. Lubarsky G. The forgotten converter. Charge-pump basics. Operation. Texas Instruments Incorporated. SLPY005. 2 July 2015. URL: <http://www.ti.com/lit/wp/slp005/slp005.pdf>
6. Onyshko D. DC/DC voltage converters on switched capacitors. *Chip News*. 2002;3. (in Russ.). URL: http://www.gaw.ru/html/cgi/txt/publ/_rtcs/90_pwm_C_MAX.htm

7. Звонарев Е. Решения от Texas Instruments для AC/DC- и DC/DC-преобразователей. *Новости электроники*. 2007;9:6–12.
8. Frenzel L. Зарядовые насосы как альтернатива стабилизаторам других типов. *РадиоЛоцман*. 2017;12:32–35.
9. Бабенко В.П., Битюков В.К. Схемотехника формирователей паузы задержки DEAD TIME в силовых ключах. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2018;18(3):615–620.
10. Макаренко В. О выборе параметров DC/DC-преобразователей с накачкой заряда. *Электронные компоненты и системы*. 2016;2:33–39. URL: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2016_2/V.Makarenko_On%20the%20choice%20of%20parameters%20of%20DC-DC-converters%20with%20charge%20pumps_EKIS_2_2016-2.pdf
11. Бабенко В.П., Битюков В.К., Кузнецов В.В., Симачков Д.С. Моделирование статических и динамических потерь в MOSFET-ключах. *Российский технологический журнал*. 2018;6(1):20–39. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39>
12. Бабенко В.П., Битюков В.К. Имитационное моделирование процессов переключения силовых полевых транзисторов в программе ELECTRONICS WORKBENCH. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(2):199–205. <https://doi.org/10.1134/S0033849419020025>
13. Ковалева И.В., Лучанинов Д.В. Обзор сервисов моделирования и разработки электрических схем. *Постулат*. 2018;2-1(28):5. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32676210>
14. Wang C.-C., Wu J.-C. Efficiency Improvement in Charge Pump Circuits. *IEEE J. Solid-State Circuits*. 1997;32(6):852–860. <https://doi.org/10.1109/4.585287>
15. Hsu C.-P., Lin H. Analysis of power efficiency for four-phase positive charge pumps. In: *Proceeding of the Fifth Lasted International Conference CIRCUITS, SIGNAL, and SYSTEMS*. Banff. Alberta. Canada. July 2–4, 2007. URL: http://www.ee.nchu.edu.tw/Pic/Writings/2343_573-109.pdf
16. Vitchev V. Calculating Essential Charge-Pump Parameters. Maxim Integrated Products. July № 1. 2006. Sunnyvale. California. URL: https://www.researchgate.net/publication/293714428_Calculating_essential_charge-pump_parameters
17. Битюков В.К., Миронов А.В., Михневич Н.Г., Петров В.А. Работа системы накачки заряда DC-DC преобразователя MAX1759 в режиме повышения напряжения. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. 2017;1(20):48–58.
18. Битюков В.К., Петров В.А., Сотникова А.А. Работа DC-DC преобразователя MCP1253 с накачкой заряда в режиме понижения напряжения. *Российский технологический журнал*. 2017;5(4):13–21. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-4-13-21>
19. Битюков В.К., Иванов А.А., Миронов А.В., Михневич Н.Г., Перфильев В.С., Петров В.А. Исследование характеристик микросхем источников вторичного электропитания с накачкой заряда. *Радиотехника*. 2017;2:126–134.
20. Битюков В.К., Иванов А.А., Миронов А.В., Михневич Н.Г., Перфильев В.С., Петров В.А. Стенд для исследо-
7. Zvonarev E. Texas Instruments solutions for AC/DC and DC/DC converters. *Novosti elektroniki*. 2007;9:6–12 (in Russ.).
8. Frenzel L. Charge pumps as an alternative to other types of stabilizers. *RadioLotsman*. 2017;12:32–35 (in Russ.).
9. Babenko V.P., Bityukov V.K. An integrated circuit for forming DEAD TIME drivers in power switches. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya* = *Fundamental problems of radioengineering and device construction*. 2018;18(3):615–620 (in Russ.).
10. Makarenko V.O. On the choice of parameters of DC/DC converters with charge pumps. *Elektronnye komponenty i sistemy* = *Electronic Components and Systems*. 2016;2:33–39 (in Russ.). URL: http://www.ekis.kiev.ua/UserFiles/Image/pdfArticles/2016_2/V.Makarenko_On%20the%20choice%20of%20parameters%20of%20DC-DC-converters%20with%20charge%20pumps_EKIS_2_2016-2.pdf
11. Babenko V.P., Bityukov V.K., Kuznetsov V.V., Simachkov D.S. Simulation of static and dynamic losses in MOSFET keys. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2018;6(1):20–39 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-1-20-39>
12. Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of switching of high-power FETs using the electronics Workbench Software. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(2):176–181. <https://doi.org/10.1134/S1064226919020025>
- [Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of switching of high-power FETs using the electronics Workbench Software. *Radiotekhnika i elektronika* = *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(2):199–205 (in Russ.)]
13. Kovaleva I.V., Luchaninov D.V. Overview of modeling services and the development of electrical circuits. *Postulat*. 2018;2–1(28):5 (in Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32676210>
14. Wang C.-C., Wu J.-C. Efficiency Improvement in Charge Pump Circuits. *IEEE J. Solid-State Circuits*. 1997;32(6):852–860. <https://doi.org/10.1109/4.585287>
15. Hsu C.-P., Lin H. Analysis of power efficiency for four-phase positive charge pumps. In: *Proceeding of the Fifth Lasted International Conference CIRCUITS, SIGNAL, and SYSTEMS*. Banff. Alberta. Canada. July 2–4, 2007. URL: http://www.ee.nchu.edu.tw/Pic/Writings/2343_573-109.pdf
16. Vitchev V. Calculating Essential Charge-Pump Parameters. Maxim Integrated Products. July No. 1. 2006. Sunnyvale. California. URL: https://www.researchgate.net/publication/293714428_Calculating_essential_charge-pump_parameters
17. Bityukov V.K., Mironov A.V., Mikhnevich N.G., Petrov V.A. Charge pump system operation of DC–DC converter MAX1759 in the voltage boost mode. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antei* = *Bulletin of Concern PVO Almaz-Antei*. 2017;1(20):48–58 (in Russ.).
18. Bityukov V.K., Petrov V.A., Sotnikova A.A. Operation of MCP1253 DC/DC charge-pump converter MCP1253 in buck mode. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2017;5(4):13–21 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-4-13-21>

- вания характеристик микросхем источников вторичного электропитания с накачкой заряда. *Российский технологический журнал*. 2016;4(3):37–52. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-3-37-52>
21. Никитин Е. Методы уменьшения входных пульсаций для преобразователей с накачкой заряда. *Компоненты и технологии*. 2003;5:58–60.
22. Barbehenn G.H. Малошумящий повышающе-понижающий регулируемый преобразователь напряжения с выходным током 250 мА на основе зарядового насоса. *РадиоЛоцман*. 2014;2:31–34.
23. Битюков В.К., Михневич Н.Г., Петров В.А. Моделирование пульсаций отрицательного напряжения в системе накачки заряда и на выходе микросхемы двухполярного DC–DC преобразователя LM27762. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):80–96. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-80-96>
24. Латыев Л.Н., Петров В.А., Чеховской В.Я., Шестаков Е.Н. *Излучательные свойства твердых материалов*. Справочник, под общ. ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия; 1974. 472 с.
19. Bityukov V.K., Ivanov A.A., Mironov A.V., Mikhnevich N.G., Perfil'ev V.S., Petrov V.A. A study of characteristics of microcircuits of secondary power sources with charge pump. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 2017;2:126–134 (in Russ.).
20. Bityukov V.K., Ivanov A.A., Mironov A.V., Mikhnevich N.G., Perfil'ev V.S., Petrov V.A. Test bench for studying characteristics of integrated circuit chips of secondary regulated charge pump power supply. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2016;4(3):37–52 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-3-37-52>
21. Nikitin E. Methods for reducing input ripple for charge-pump converters. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*. 2003;5:58–60 (in Russ.).
22. Barbehenn G.H. Low-noise step up/down adjustable voltage converter with an output current of 250 mA based on a charge pump. *RadioLotsman*. 2014;2:31–34 (in Russ.).
23. Bityukov V.K., Mikhnevich N.G., Petrov V.A. Simulation of negative voltage ripples at the output of charge pump system and the microcircuit output of bipolar LM27762 DC–DC convert. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):80–96 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-80-96>
24. Latyev L.N., Petrov V.A., Chekhovskoi V.Ya., Shestakov E.N. *Izluchatel'nye svoistva tverdykh materialov. Spravochnik (Emissivity of solid materials. Handbook)*, Sheindlin A.E. (Ed.) Moscow: Energiya; 1974. 472 p. (in Russ.).

Об авторах

Бабенко Валерий Павлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vbabenko16091940@gmail.com.

Битюков Владимир Ксенофонович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

About the authors

Valery P. Babenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vbabenko16091940@gmail.com.

Vladimir K. Bityukov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bitukov@mirea.ru. ResearcherID Y8325-2018, Scopus Author ID 6603797260, <https://orcid.org/0000-0001-6448-8509>

УДК 004.93'14

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-78-87>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Идентификация темпоральных аномалий спектрограмм сигналов виброизмерений ротора турбогенератора с применением рекуррентного нейросетевого автоэнкодера

В.П. Кулагин[@],
Д.А. Акимов,
С.А. Павельев,
Е.О. Гурьянова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме. Предлагается метод распознавания предаварийных состояний роторных установок на основе применения окна Хэмминга и перспективных методик Deep Learning в ретроспективном анализе результатов учета факторов эксплуатации турбогенератора, диагностики и контроля при критических воздействиях. Разработана программа экспериментальных исследований на модели турбоустановки с имитацией неисправностей и получения вибросигналов. Эксперимент на основе гомостатического метода проверки сигнала окнами Хэмминга в частотной, временной и модуляционной областях и единых исходных данных позволяет определить наиболее перспективные для идентификации характеристики сигнала. Разработана методика осуществления мониторинга состояния турбогенераторов в автоматическом режиме для своевременного оповещения персонала тепловой электростанции (ТЭС) о появлении признаков предаварийных ситуаций, а также о характере неисправностей методом прогнозирования состояния предаварийной ситуации с помощью сверточных нейронных сетей с реализацией в виде рекуррентного автоэнкодера. Применяется кластеризация, и выявляются кластеры, соответствующие спектрограммам предаварийных ситуаций. Результативность применения гомостатического метода в сочетании с корреляционным анализом основана на модели принятия решений, более подробно изложенной в других работах. Рассмотрено использование глубоких нейронных сетей при обнаружении классов признакового пространства предаварийных ситуаций на промышленных турбогенераторах. Дана методика подготовки обучающей выборки и обучения глубокой нейронной сети при классификации аномалий спектрограмм. Диагностика дефектов выполняется на основе заранее сформированных экспериментальных баз данных и обобщенных баз знаний, ставящих в соответствие повышенный уровень виброактивности с вызвавшими ее причинами. Различные дефекты активных частей турбогенератора, возникающие в процессе эксплуатации, требуют аварийного останова генератора, что является крайне нежелательным событием для станции.

Ключевые слова: нейронные сети, предиктивная аналитика, окна Хэмминга, прогнозирование неисправностей, вибродиагностика, анализ спектрограмм, вибрационный стенд, турбогенератор, рекуррентный автоэнкодер

• Поступила: 11.12.2020 • Доработана: 25.12.2020 • Принята к опубликованию: 09.01.2021

Для цитирования: Кулагин В.П., Акимов Д.А., Павельев С.А., Гурьянова Е.О. Идентификация темпоральных аномалий спектрограмм сигналов виброизмерений ротора турбогенератора с применением рекуррентного нейросетевого автоэнкодера. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):78–87. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-78-87>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Identification of temporal anomalies of spectrograms of vibration measurements of a turbine generator rotor using a recurrent neural network autoencoder

Vladimir P. Kulagin[@],
Dmitry A. Akimov,
Sergey A. Pavelyev,
Ekaterina O. Guryanova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract: A method is proposed for recognizing pre-emergency conditions of rotary installations based on the use of the Hamming window and advanced Deep Learning techniques in retrospective analysis of the results of accounting for the factors of operation of a turbine generator, diagnostics and control under critical impacts. A program of experimental studies on the model of a turbine plant with simulation of faults and receiving vibration signals has been developed. An experiment based on the homostatic method of checking the signal with Hamming windows, in the frequency, time and modulation domains and common initial data, allows one to determine the most promising signal characteristics for identification. A method has been developed for monitoring the state of turbine generators in an automatic mode for timely notification of the CHPP personnel about the appearance of signs of pre-emergency situations, as well as about the nature of faults by the method of predicting the state of a pre-emergency situation using convolutional neural networks implemented in the form of a recurrent autoencoder. Clustering is applied and clusters are identified that correspond to the spectrograms of pre-emergency situations. The effectiveness of the use of the homostatic method in combination with correlation analysis is based on the decision-making model described in more detail in other works.

Keywords: neural networks, predictive analytics, Hamming windows, fault prediction, vibration diagnostics, spectrogram analysis, vibration stand, turbine generator, recurrent autoencoder

• Submitted: 11.12.2020 • Revised: 25.12.2020 • Accepted: 09.01.2021

For citation: Kulagin V.P., Akimov D.A., Pavelyev S.A., Guryanova E.O. Identification of temporal anomalies of spectrograms of vibration measurements of a turbine generator rotor using a recurrent neural network autoencoder. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):78–87 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-78-87>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в условиях нарастающей мощности вырабатываемой и потребляемой энергии актуальной задачей является автоматический контроль агрегатов электростанций в реальном времени. Однако имеет место нехватка аналитиков-экспертов, способных анализировать спектрограммы вибродиагностики турбогенераторов, регистрируемых вибродатчиками в режиме постоянного наблюдения, для распределенной энергетики.

Таким образом, необходима разработка автоматизированных интеллектуальных систем для мониторинга вибросостояний турбогенераторов ТЭС в режиме online с функцией прогнозирования аварийных ситуаций.

Реализация указанного метода позволит классифицировать вибросостояния турбогенераторов на основе использования нейросетевой обработки измерительных данных виброизмерений, представленных в спектральном виде, и знаний экспертов, имеющих опыт интерпретации спектрограмм, характеризующих вибросостояния турбогенераторов ТЭС, в автоматическом режиме.

Методика экспериментальных испытаний для оценки вибраций и прогнозирования состояния объекта описана в работах ряда исследователей. В работе [1] анализируется частота механических колебаний двигателя с короткозамкнутым ротором и идентичный двигатель, работающий под эксцентриситетом динамического ротора. Радиальные колебания моделируются на основе экспериментальных данных в режимах работы без нагрузки и номинальной нагрузки. Основное внимание уделяется частоте вибрации и разбросу колебаний частоты. Указывается необходимость дальнейшего изучения методов распознавания вибраций. Предложенный в [2] метод анализа работы подшипников отличается более детальным описанием диагностики спектров дефектных состояний. Работа [3] описывает новый подход к выявлению дефектов подшипников, а именно, спектральные изображения вибрационных сигналов. Изображения спектра просто получаются быстрым преобразованием Фурье. Такие изображения обрабатываются с использованием двумерного анализа основных компонентов (2DPCA) для уменьшения размеров признакового пространства, а затем к полученным результатам применяется метод минимального расстояния для классификации неисправностей подшипников [4]. Эффективность предлагаемого метода подтверждается экспериментальными данными.

Целью настоящей работы является разработка метода распознавания спектрограмм предаварийной ситуации на основе ретроспективной выборки

и проведение экспериментальных исследований на стенде. Для этого в составе технических средств был собран и настроен испытательный стенд AP 7000, осуществляющий имитацию сигналов, измеряемых вибродатчиками турбогенератора, и предназначенный для исследований экспериментального программного комплекса, обеспечивающего мониторинг состояния турбогенераторов ТЭС в автоматическом режиме с использованием технологий нейросетевой классификации спектрограмм виброизмерений.

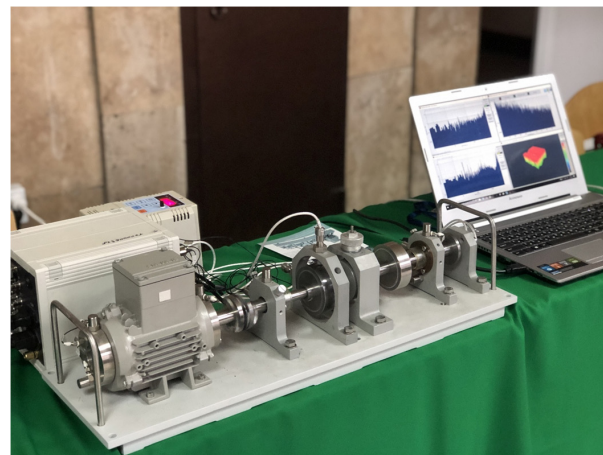


Рис. 1. Общая схема имитационного стенда AP 7000

Электромеханическая часть экспериментального стенда представляет из себя имитатор промышленного оборудования с вращающимися узлами машин и механизмов. В его состав входит электродвигатель Siemens 1LA7053-2AA10 мощностью 115 Вт и скоростью вращения ротора до 3000 об/мин.

Оперативная информация о значениях основных вибрационных периметров поступает потоком от объекта в блок допускового контроля с интервалом времени около 0.2 с. Выбор интервала обусловлен минимальным временем съема информации. Текущая информация представляется оператору по вибродиагностике в виде цветных графических спектрограмм комплекса и таблиц, в которых отображаются расчетные показатели.

Эта информация подается на вход блока диагностирования технического состояния турбогенератора, активизируемого по результатам допускового контроля. В этом же блоке переданная информация с объекта дополняется информацией о значениях технологических параметров для формирования двоичного вектора состояния.

Для обработки сигналов в блок диагностирования вызывается априорная экспертная информация. Она, как и другие необходимые данные, предварительно записывается в память. Обмен информацией между блоками технологического диагностирования и оператором осуществляется в диалоговом режиме.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

В процессе работы турбогенератора существует возможность прогнозировать отказы с помощью распознавания спектрограмм и интерполяции во времени. Существуют классы неисправностей, которые можно выделить в отдельные кластеры.

Для проводимых исследований был разработан экспериментальный программный комплекс, обеспечивающий мониторинг состояния турбогенераторов ТЭС в автоматическом режиме с использованием технологий нейросетевой классификации спектрограмм виброизмерений [5]. Экспериментальный программный комплекс функционирует под управлением операционной системы MS Windows XP/Vista/7 с установленным пакетом *Net Framework* версии не ниже 4.

Рассмотрим соединение ротора с подшипником качения. Если внутреннее кольцо подшипника качения посажено на вал с недостаточным натягом, то между этим кольцом и валом может возникнуть нежелательная ротация. Такая ротация, называемая проскальзыванием, приводит к круговому смещению кольца относительно вала. При появлении проскальзывания контактирующие поверхности истираются, что вызывает износ и значительное повреждение вала [6].

Ослабление посадки вращающейся детали на валу влияет на дисбаланс вращения ротора, который проявляется как периодические колебания амплитуды отклонения вала ротора от центральной оси, происходящие с частотой вращения вала.

На спектрограмме (рис. 2) запечатлен момент обнаружения вибродатчиками, расположенными на

валу и на подшипнике, гармоник, свидетельствующих о проскальзывании вала – неисправность «недостаточный натяг подшипника».

В роторных установках вибрационные колебания и их спектр удобно описывать моделью полигармонического возбуждения, представленной формулой (1). Подобная модель позволяет выделить определенные частоты $k\omega_r$, кратные основной частоте вращения ротора:

$$x(t) = \sum_k A_k(t) \cos[k\omega_r t - \varphi_k(t)] + \psi(t), \quad (1)$$

где $k\omega_r$ – средняя частота узкополосного процесса вибрационных колебаний; $A_k(t)$ – случайная, медленно меняющаяся огибающая узкополосного процесса вибрационных колебаний; $\varphi_k(t)$ – случайная, медленно меняющаяся фаза; $\psi(t)$ – шумовое возбуждение.

Погрешности изготовления и монтажа деталей, температурные изменения геометрических параметров деталей и зазоров в сочленениях, изменение вязкости смазки, искажение формы и качества поверхностей взаимодействующих деталей с наработкой, наконец, нестабильность оборотов вала двигателя, вызванная, например, нестабильностью частоты сетевого напряжения, и множество других случайных факторов приводят к флуктуациям амплитуд и размытию дискретных линий спектра полигармонических колебаний [7].

При возникновении дефекта спектрограмма меняется, на ней появляются дополнительные всплески определенной частоты. Такие всплески можно видеть на двумерной и трехмерной спектрограмме, показанной на рис. 3, в случае повреждения баббита вкладышей

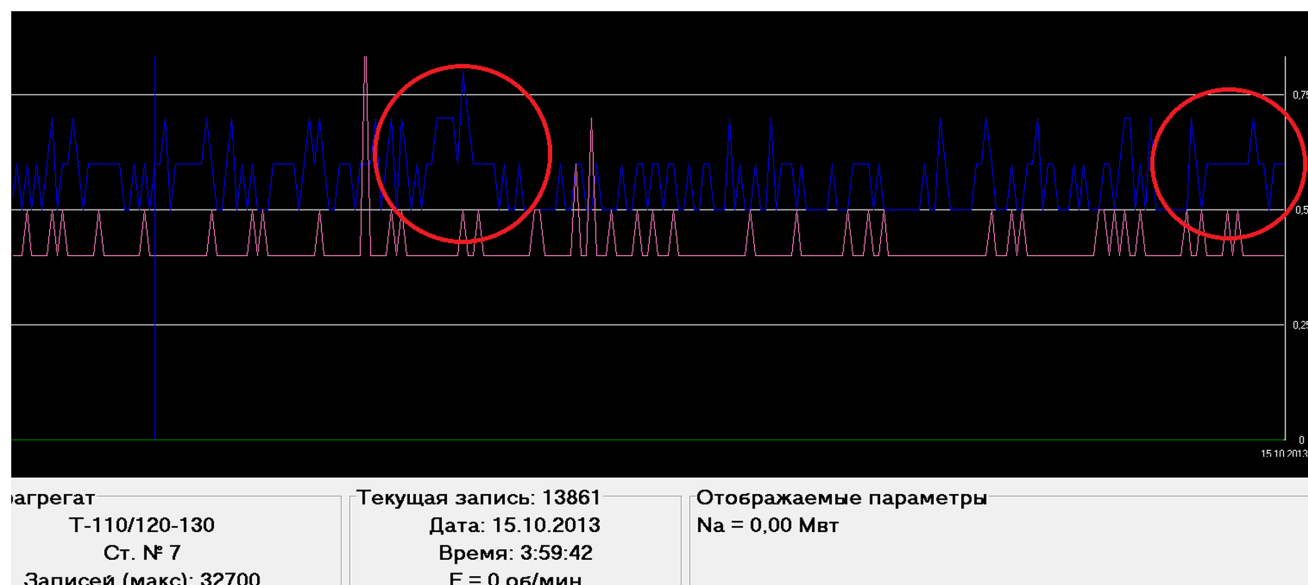


Рис. 2. Спектральный состав гармоник неисправности «недостаточный натяг подшипника»

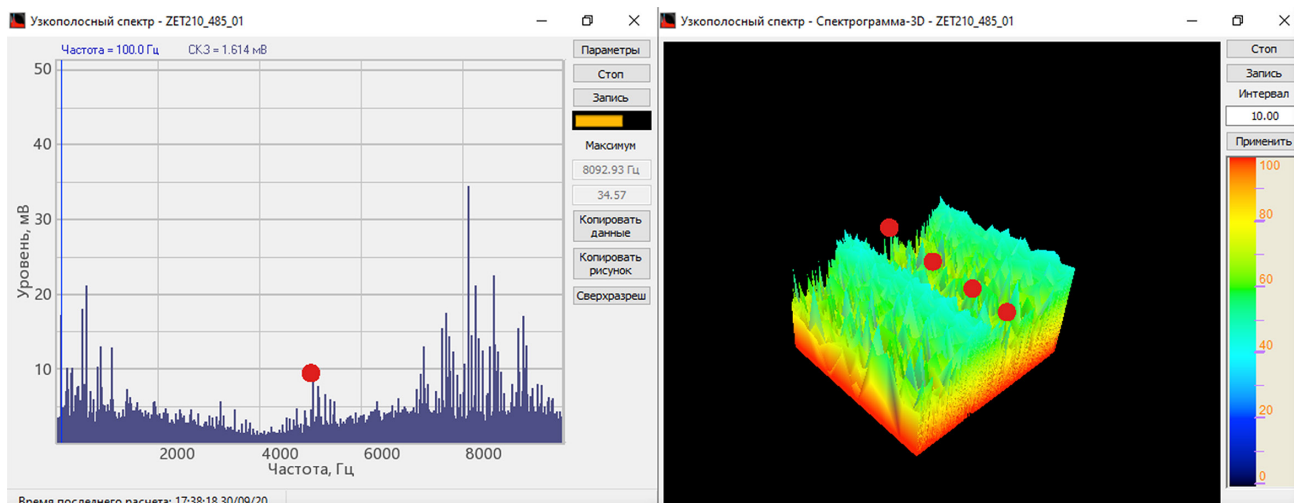


Рис. 3. Гармоники неисправности «Повреждение баббита вкладышей» на темпоральной записи спектрограммы

подшипников. На спектрограмме видно появление гармоники на 4630 Гц, а также видна ее периодичность на трехмерном графике, что свидетельствует о периоде появления самой гармоники. Применяя импульсную модель к описанию всплесков частоты, можно вычленивать новые импульсы периодического появления гармоник, отмеченных красными точками на трехмерной спектрограмме (рис. 3), соответствующие определенному дефекту. Обозначим такой импульс через функцию $f(t)$, тогда представим периодическую последовательность импульсов в виде:

$$\xi(t) = \sum_k (t - t_k), \quad (2)$$

где $t_k = kT + t_0$; k – целое число; T – период вращения вала; t_0 – время возникновения первого импульса.

Развитие дефекта вызывает рост амплитуд и числа кратковременных импульсов гармоники в вибросигнале, вызванных дефектом [8].

Выявить зарождающийся дефект, который меняет структуру спектра, можно методами оконного преобразования сигнала, который сводит к минимуму влияние помех и позволяет однозначно соотнести полученную характеристику сигнала с видом дефекта. Таким преобразованием, выделяющим аномальные компоненты, является преобразование с помощью окна Хэмминга в частотно-временной области нестационарного сигнала.

Рассмотрим прямоугольное окно

$$w_H(n) = \begin{cases} 0, n < -\left(\frac{N-1}{2}\right) \\ \alpha + (1-\alpha)\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), -\left(\frac{N-1}{2}\right) \leq n \leq \frac{N-1}{2} \\ 0, n > \frac{N-1}{2} \end{cases}, \quad (3)$$

где $w_H(n)$ – весовая функция окна Хэмминга при экспериментально установленной $\alpha = 0.54$ (случай для окна Хэмминга); N – ширина окна; n – целое число.

Частотную характеристику рассматриваемого окна можно получить как произведение прямоугольного окна (3) и окна Хэмминга (при $\alpha = 0.54$) для всех n :

$$w_H(n) = w_R(n) \left[\alpha + (1-\alpha)\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right], \quad (4)$$

где $w_R(n)$ – весовая функция прямоугольного окна с высотой 1.

Само прямоугольное окно можно задать частотной характеристикой [9]:

$$W_R(e^{j\omega}) = \frac{\sin(\omega N / 2)}{\sin(\omega / 2)}. \quad (5)$$

Частотная характеристика обобщенного окна Хэмминга равна круговой свертке частотной характеристики прямоугольного окна с последовательностью импульсов и может быть записана в виде:

$$W_H(e^{j\omega}) = W_R(e^{j\omega}) \times \left[\alpha u_0(\omega) + \frac{1-\alpha}{2} u_0\left(\omega - \frac{2\pi}{N}\right) + \frac{1-\alpha}{2} u_0\left(\omega + \frac{2\pi}{N}\right) \right]. \quad (6)$$

Применяя наилучшее окно высокого разрешения, конкретное окно Хэмминга зададим выражением [9]:

$$w_H(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \text{ при } N = 2 \quad (7)$$

где N – коэффициент ширины окна.

Применяя окно Хэмминга к нестационарному сигналу в случае дефекта подшипника, можно увидеть появление аномалии, показанной на рис. 4 – результате обработки спектрограммы.

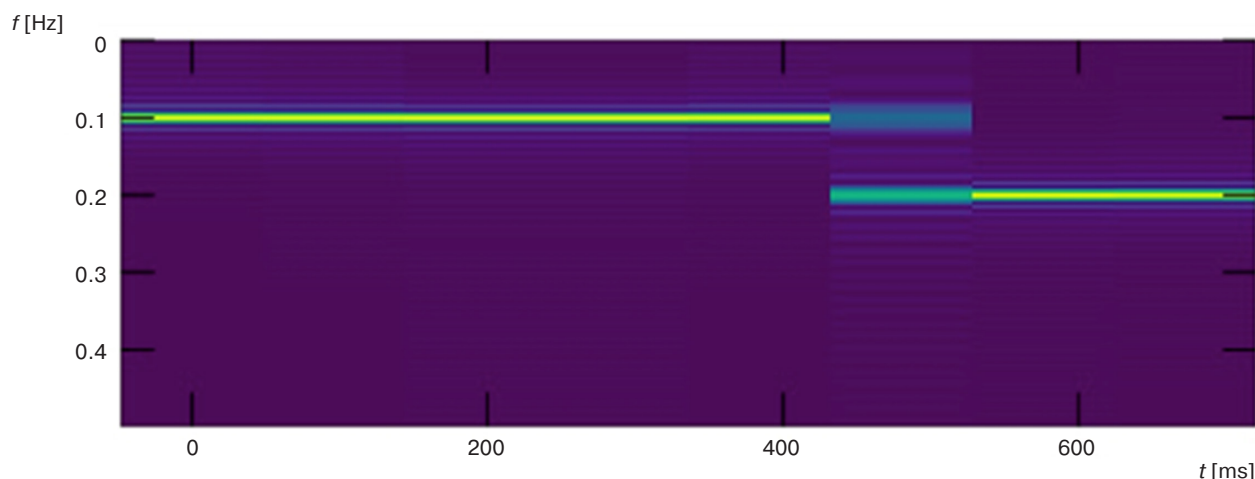


Рис. 4. Выявление аномалии разрыва спектра с помощью применения окна Хэмминга для спектрограммы, где f – частота, t – время. Интенсивность сигнала определяется градиентом цветовой палитры

Из рис. 4 видно разделение полосы спектра, обработанного с помощью окна Хэмминга. Сдвиг приведенной амплитуды спектра на рис. 4 и 5 отображает резкий скачок в частотной области, что свидетельствует об аномалии [10].

На рис. 6 отображена обработка исходного сигнала с выявленной аномалией.

Применение окна Хэмминга является только первым этапом к выявлению аномалий. В приведенных результатах показано его применение с $N = 2$, однако данный метод имеет свои ограничения [11]. Аномалии не всегда обозначают наличие дефекта или будущей неисправности, управляемая смена фазы или режима может также восприниматься методом как аномалия. Поэтому требуется дополнительная интеллектуальная обработка результатов применения окна Хэмминга, например, с помощью глубоких нейросетевых методов.

Для того, чтобы найти корреляцию между прогнозируемым состоянием турбогенератора и известным состоянием экспериментального стенда необходимо рассмотреть состояние турбины как вектор предикторов дефектов и выбрать наиболее критичные из них, обработанные с помощью окна Хэмминга [12].

Классом моделей, успешно решающих задачу корреляции, являются сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Network, CNN). CNN относятся к парадигме машинного обучения «deep learning», которая очень хорошо себя зарекомендовала в задачах распознавания аномалий вибросигнала [13]. На основе применения глубоких нейронных сетей можно задать рекуррентные автоэнкодеры. Принцип их использования заключается в последовательном применении операций свертки с последующей рекурсией и выбором максимального значения

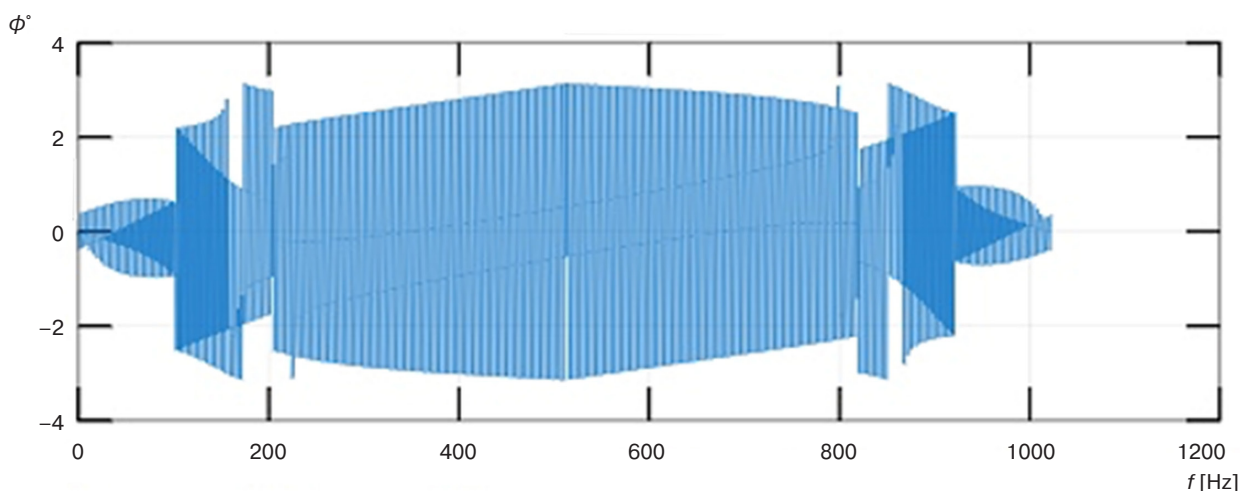


Рис. 5. Выявление аномалии с помощью применения окна Хэмминга для вибросигнала, где f – частота, ϕ – значение приведенной фазы в градусах

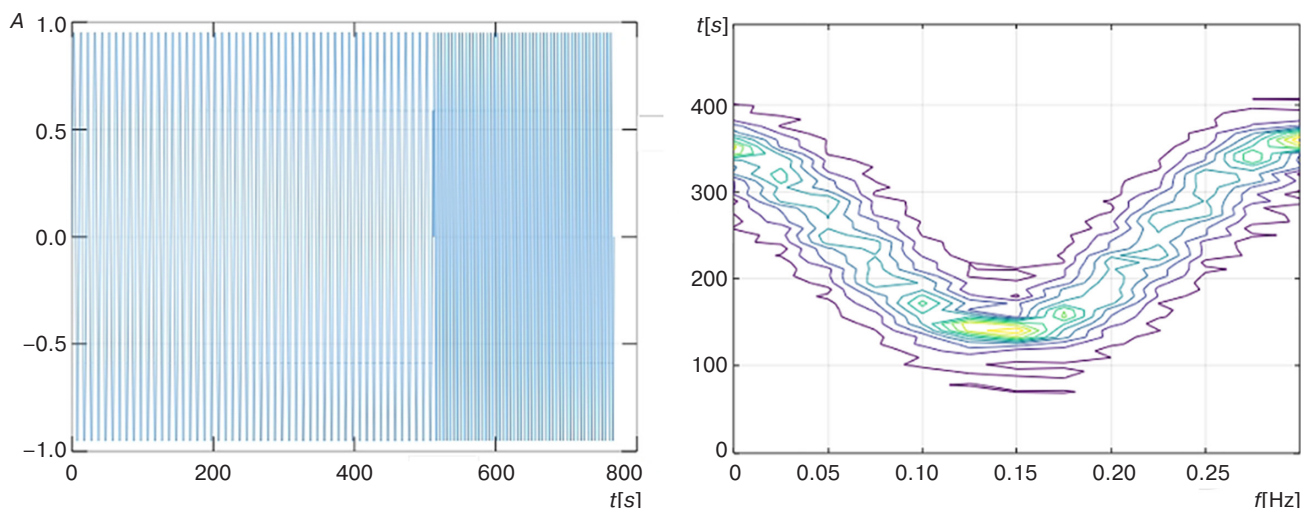


Рис. 6. Детализация сигнала с аномалией с применением окна Хэмминга, где A – амплитуда; t – время; f – частота

(max-polling). Рекуррентный автоэнкодер на основе UNET для анализа измерительных данных схематически изображен на рис. 7.

Чтобы получить данные об аномалии, сверточную нейронную сеть необходимо проверить на практике, оценив возможность решать задачу

корреляционного сопоставления аномалии с нормальным образом (без аномалий).

Рекуррентные слои $2 \times \text{Conv}$ выделяют пространство признаков спектрограмм, позволяющее найти подходящую критическую причину дефекта, отображенную на спектрограмме [14].

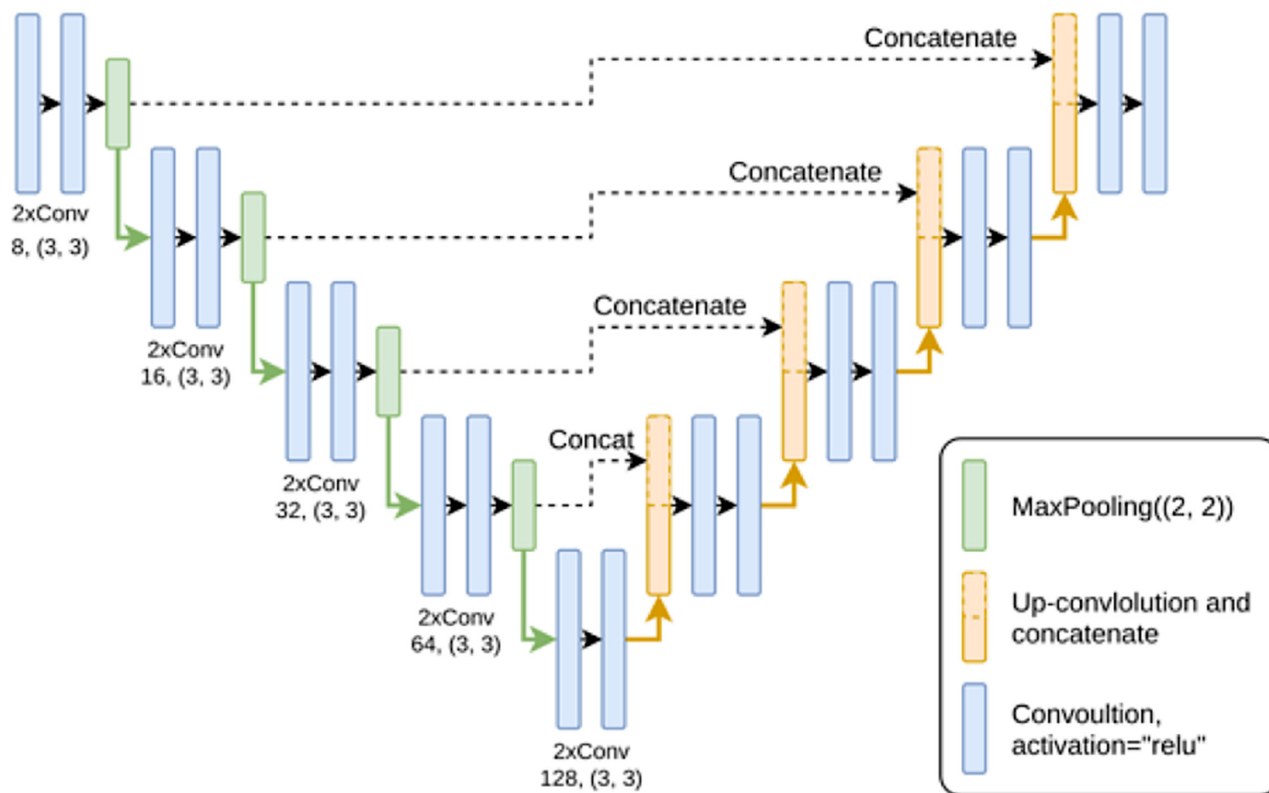


Рис. 7. Автоэнкодер на базе нейронной сети. Обозначения на рисунке: $2 \times \text{Conv}$ (3×3) – свертка с ядром 3×3 ; Concatenate – операция слияния признаков, $\text{MaxPooling}((2, 2))$ – операция максимального объединения признаков; Up-convolution and concatenate – операция повышающей дискретизации карты свойств; Convolution activation = "relu" – активационная функция вида ReLU (Rectified linear unit)

На выходе автоэнкодера получаем вектор $L(l_1, \dots, l_n)$, где $l_1, \dots, l_n$ – коэффициенты корреляции с кластером q , что и является результатом обучения нейронной сети.

В результате проведенного эксперимента были заданы обучающая и тестовая выборки в виде оцифрованных сигналов по 400 образцам спектрограмм. Далее все образцы прошли этапы предобработки спектрограмм. При этом полученные матрицы признаков подавались на вход нейронной сети.

Основой для проверки правильности предсказания критериальной переменной (корреляции) от предиктора выбрана ошибка обучения:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} (d_i - o_i)^2, \quad (8)$$

где N – число выходов сети; d_i – желаемое значение i -го выхода сети для k -го эталона; o_i – реальное значение i -го выхода сети для k -го эталона. Величина E_k должна вычисляться для каждого элемента обучающей выборки.

В качестве критерия в исследовании использовалась величина средней ошибки при сравнении с каждым эталоном:

$$\bar{E}(n) = \frac{1}{S} \sum_{k=0}^{S-1} E_k, \quad (9)$$

где S – мощность обучающей выборки; $\bar{E}(n)$ – средняя ошибка сети для n -й эпохи обучения.

На выходе нейронной сети были получены коэффициенты корреляции кластеров [15, 16]. Чем больше коэффициент корреляции на выходе, тем вероятнее, что именно в это рассматриваемое состояние попадет ротор турбогенератора с течением времени. Однако набор возможных состояний изначально задан в базе знаний экспертным методом. При таких данных можно проверить, как коррелируют экспертные оценки с оценкой нейронной сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе эксперимента было рассмотрено 16 440 записей спектрограмм турбогенератора и экспериментальной установки. При формировании обучающих векторов найдено 23% валидных спектрограмм относительно соответствия неисправному состоянию, из них 58% показало коэффициент корреляции выше 0.7 при сопоставлении данных с турбогенератором.

Логирование позволяет визуализировать ход обучения, например, просматривать, как менялись значения функции потерь с 3.6 до 0.5 (рис. 8).

Визуализацию выходных векторов в скрытом пространстве можно представить как пространство коррелированных признаков, сгруппированных в классы.

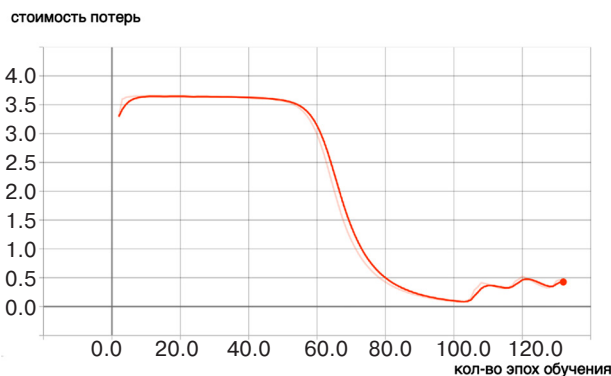


Рис. 8. График значений функции потерь

После обучения рекуррентного автоэнкодера программа сохраняет вектора скрытого пространства для валидационной выборки в файле `latent_vectors.csv`.

Вектора имеют размерность `latent_size`, по умолчанию равную 100. Чтобы визуализировать многомерное пространство используются следующие техники: анализ главных компонент (PCA) и t-SNE.

По результатам отбора классы с группировкой 0.64 показали коэффициент корреляции больше 0.7. В результате было выделено 4 класса неисправностей: дефект подшипника, расцентровка ротора, дефект опоры и протертость вкладышей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается подход к прогнозированию неисправностей турбогенератора на основе перспективных нейросетевых методик и хронологического анализа результатов работы при критических воздействиях.

В дальнейшем планируется перенести исследования с экспериментального стенда, имитирующего поведение турбогенератора ТЭЦ, на естественный промышленный образец с заведомо известной неисправностью. Предполагается, что более высокая амплитуда вибраций вала на промышленных генераторах может показать результаты корреляционного анализа, отличные от описанных в данной статье.

Описанные наработки могут быть использованы для создания технологий контроля безопасной работы промышленных установок с вибрирующими элементами.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта «Университетский» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» по теме «Выявление неявных неисправностей ответственных роторных агрегатов с помощью анализа темпоральных аномалий спектрограмм виброизмерений» (приказ № 1953 от 27.11.2019).

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. Sobra J., Vaimann T., Belahcen A. Mechanical vibration analysis of induction machine under dynamic rotor eccentricity. In: *Proceedings of 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Prague, Czech Republic, 2016, p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EPE.2016.7521732>
2. Boudiaf A., Djebala A., Bendjma H., Balaska A., Dahane A. A summary of vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in bearing. In: *Proceedings of 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. Algiers, Algeria, 2016, p. 37–42. <https://doi.org/10.1109/ICMIC.2016.7804187>
3. Wei Li, Mingquan Qiu, Zhencai Zhu, Bo Wu, Gongbo Zhou. Bearing fault diagnosis based on spectrum images of vibration signals. *Meas. Sci. Technol.* 2016;27(3): Article ID 035005. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/3/035005>
4. Serdukova L., Kuske R., Yurchenko D. Post-grazing dynamics of a vibro-impacting energy generator. *J. Sound and Vibration*. 2020;492: Article ID 115811. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115811>
5. Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. *Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов*. М.: Наука; 2006. 410 с. ISBN 5-02-033789-7
- [Okhtilev M. Yu., Sokolov B. V., Yusupov R. M. *Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoi dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov (Intelligent monitoring and control technology of the structural dynamics of complex technical objects)*. Moscow: Nauka; 2006. 410 p. (in Russ.). ISBN 5-02-033789-7]
6. Будадин О.Н., Каледин В.О., Кульков А.А., Пичугин А.Н. Теоретические и экспериментальные исследования возможности теплового контроля пространственной конструкции из полимерного композиционного материала в процессе одноосного силового нагружения. *Контроль. Диагностика*. 2014;5(191):72–81. <https://doi.org/10.14489/td.2014.05.pp.072-080>
- [Budadin O.N., Kaledin V.O., Kulkov A.A., Pichugin A.N., Nagaitseva N.V. Theoretical and experimental study of thermal control applicability to a 3-D polymer composite structure under uniaxial power loading. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2014;5(191):72–81 (in Russ.). <https://doi.org/10.14489/td.2014.05.pp.072-080>]
7. Акимов Д.А., Работкин В.Д., Терехин И.В., Редькин О.К. Представление знаний в распределительных информационных системах промышленных предприятий. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2013;1:33–38.
- [Akimov D.A., Rabotkin V.D., Terekhin I.V., Redkin O.K. Knowledge representation in distributed information systems industry. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial Automatic Control Systems and Controllers*. 2013;1:33–38 (in Russ.).]
8. Ostroukh A., Nikonov V., Ivanova I., Sumkin K., Akimov D. Development of the contactless integrated interface of complex production lines. *Journal of Artificial Intelligence (JAIR)*. 2014;7(1):1–12. <https://dx.doi.org/10.3923/jai.2014.1.12>
9. Akimov D., Krug P., Ostroukh A., Ivchenko V., Morozova T., Sadykov I. The Simulation Model of the Autonomous Truck Caravan in the Extreme and Non-Stationary Environment. *Int. J. App. Eng. Res.* 2016;11(9):6435–6440.
10. Kulagin V.P., Ivanov A.I., Kuznetsov Y.M., Chulkova G.M. Multidimensional mutual ordering of patterns using a set of pre-trained artificial neural networks. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017;803(1): Article ID 012083. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/803/1/012083>
11. Kulagin V., Akimov D., Pavelyev S., Potapov D. Automated Identification of Critical Malfunctions of Aircraft Engines Based on Modified Wavelet Transform and Deep Neural Network Clustering. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2020;714(1): Article ID 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/714/1/012014>
12. Hashish E., Miller K., Finley W., Kreitzer S. Vibration Diagnostic Challenges: Case Studies in Electric Motor Applications. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2017;23(4):22–34. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2016.2600718>
13. Zhou S., Qian S., Chang W., Xiao Y., Cheng Y. A Novel Bearing Multi-Fault Diagnosis Approach Based on Weighted Permutation Entropy and an Improved SVM Ensemble Classifier. *Sensors*. 2018;18(6):1934. <https://doi.org/10.3390/s18061934>
14. Arun P., Madhukumar S., Careena P. A Method for the Investigation of Bearing Vibration Based on Spectrogram Image Comparison. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2017;396(1): Article ID 012044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/396/1/012044>
15. Wen L., Gao L., Li X., Wang L., Zhu J. A Jointed Signal Analysis and Convolutional Neural Network Method for Fault Diagnosis. *Procedia CIRP*. 2018;72:1084–1087. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.117>
16. Jayakumar K., Thangavel S. Industrial drive fault diagnosis through vibration analysis using wavelet transform. *J. Vib. Control*. 2017;23(12):2003–2013. <https://doi.org/10.1177/2F1077546315606602>

Об авторах

Кулагин Владимир Петрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой КБ-5 «Аппаратное, программное и математическое обеспечение вычислительных систем» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulagin@mirea.ru. ResearcherID B-1297-2014, Scopus Author ID 56912007700, <https://orcid.org/0000-0001-8826-6724>

Акимов Дмитрий Александрович, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Автоматические системы» Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: akimov_d@mirea.ru. ResearcherID U-5717-2018, Scopus Author ID 55531854400, <https://orcid.org/0000-0001-6889-618X>

Павельев Сергей Александрович, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Автоматические системы» Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pavelev@mirea.ru. ResearcherID E-1577-2014, Scopus Author ID 56664390400, <https://orcid.org/0000-0003-1320-3061>

Гурьянова Екатерина Олеговна, старший преподаватель кафедры «Автоматические системы» Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: guryanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57216148759, <https://orcid.org/0000-0002-8809-8801>

About the authors

Vladimir P. Kulagin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Hardware, Software and Mathematical Support of Computer Systems, Institute of Integrated Safety and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulagin@mirea.ru. ResearcherID B-1297-2014, Scopus Author ID 56912007700, <https://orcid.org/0000-0001-8826-6724>

Dmitry A. Akimov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Teacher, Automatic Systems Department, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: akimov_d@mirea.ru. ResearcherID U-5717-2018, Scopus Author ID 55531854400, <https://orcid.org/0000-0001-6889-618X>

Sergey A. Pavelyev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Teacher, Automatic Systems Department, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pavelev@mirea.ru. ResearcherID E-1577-2014, Scopus Author ID 56664390400, <https://orcid.org/0000-0003-1320-3061>

Ekaterina O. Guryanova, Senior Teacher, Automatic Systems Department, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: guryanova@mirea.ru. Scopus Author ID 57216148759, <https://orcid.org/0000-0002-8809-8801>

Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств
Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries

УДК 33

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-88-91>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Трудности и перспективы развития высотехнологичных проектов в эпоху цифровой трансформации экономики

И.А. Мандыч[@],
А.В. Быкова

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

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

Резюме. В настоящее время принято говорить о возрастающей роли высокотехнологичных проектов при формировании цифровой модели российской экономики, а тот прорыв, который произошел на рубеже веков, называют информационной революцией. Одной из основных задач развития инновационной экономики в России является обеспечение условий, при которых будет увеличиваться объем производства наукоемкой продукции, доля которой пока крайне низка. Производством данной продукции занимаются высокотехнологичные проекты, требующие финансовой, информационной и ресурсной поддержки со стороны разных институтов, в том числе и государства. На сегодняшний день Россия имеет высокий уровень потенциала инновационного развития в мировом экономическом пространстве, однако, в настоящий момент отсутствие существенных изменений показателей глобального инновационного индекса свидетельствует о том, что это развитие не происходит. Целью данной статьи является выработка рекомендаций по формированию новой модели государственной поддержки развития отрасли высокотехнологичных проектов, которые выступают основой информационной, цифровой и инновационной экономики. Актуальность исследования по выбранной тематике обусловлена тем, что в настоящее время происходит цифровая трансформация экономики Российской Федерации, которая требует принятия решений по формированию нового подхода к участию в программах высокотехнологичных проектов. В рамках статьи решены следующие задачи: проведен анализ тенденций развития инновационной экономики России и ее ключевых проблем в рамках поддержки высокотехнологичных проектов и предложены рекомендации по формированию новой модели поддержки государством развития высокотехнологичных проектов на основе изучения и заимствования зарубежного опыта передовых стран, развивающих цифровую экономику, среди которых США, Германия и Япония.

Ключевые слова: высокотехнологичные проекты, инновационный менеджмент, программы поддержки, технологический сектор, инновационное развитие, цифровая экономика, промышленный комплекс России, инновационные проекты, государственная поддержка

• Поступила: 28.09.2020 • Доработана: 22.10.2020 • Принята к опубликованию: 12.11.2020

Для цитирования: Мандыч И.А., Быкова А.В. Трудности и перспективы развития высокотехнологичных проектов в эпоху цифровой трансформации экономики. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):88–95. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-88-95>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Difficulties and prospects for the development of high-tech projects in the epoch of digital transformation of economy

Irina A. Mandych[@],
Anna V. Bykova

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

Abstract. It is now customary to talk about the increasing role of high-tech projects in the formation of a digital model of the Russian economy. And the breakthrough that occurred at the turn of the century is called the information revolution. The task of developing an innovative economy in Russia is to ensure conditions under which the volume of production of science-intensive products, the share of which is extremely low, will increase. The production of these products is carried out by high-tech projects requiring financial, informational and resource support from various institutions, including the state. Today, Russia has a high level of potential for innovative development in the global economic space, however, at the moment, it does not contribute to its implementation. The aim of the scientific article is the formation of a new model of state support for the development of the industry of high-tech projects, which are the basis of the information, digital and innovative economy. The relevance of the research on the selected topic is due to the fact that in modern times there is a digital transformation of the economy of the Russian Federation (RF), which requires decision-making on the formation of a new approach to participation in high-tech projects programs. Within the framework of the article, the following tasks were solved: trends in the development of the innovative economy of Russia and its key problems in the framework of supporting high-tech projects were considered and recommendations were made on the formation of a new model of state support for the development of high-tech projects based on the study and borrowing of foreign experience of advanced countries of the digital economy, including the USA, Germany and Japan.

Keywords: high-tech projects, innovation management, support programs, technology sector, innovative development, digital economy, industrial complex of Russia, innovation projects, government support

• Submitted: 28.09.2020 • Revised: 22.10.2020 • Accepted: 12.11.2020

For citation: Mandych I.A., Bykova A.V. Difficulties and prospects for the development of high-tech projects in the epoch of digital transformation of economy. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):88–95 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-88-95>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современный мир и экономическое развитие стран все в большей мере зависят от уровня доступности информации, развития науки, внедрения ее достижений в экономику. Изменения коснулись всех сфер жизни: экономики, технологии производства, образа жизни, потребностей человека и много другого. Возникла новая экономика, которой дали название «экономика знаний». Ее основной характерной чертой является то, что за счет использования

знаний как фактора производства, достигается социально-экономический рост – результат формирования интеллектуального капитала и новых высокотехнологичных проектов. Последние, в свою очередь, образуют инновации и производство революционных технологий и продукции, которые могут перевернуть структуру определенного сегмента потребительского рынка России.

В настоящее время принято говорить о возрастающей роли высокотехнологичных проектов при формировании цифровой модели российской экономики, а тот прорыв, который произошел на рубеже

веков, называют информационной революцией. В рамках инновационно-ориентированной экономики России идет производство наукоемкой продукции с высокой добавленной стоимостью. Производством данной продукции занимаются высокотехнологичные проекты, требующие финансовой, информационной и ресурсной поддержки со стороны разных институтов, в том числе и государства.

Однако, оценивая примерное место России в вопросе развития инновационного потенциала, стоит проанализировать динамику глобального инновационного индекса с 2014 по 2020 г. Так, в общем глобальном индексе Россия поднялась с 49 до 47 места. По ресурсам инноваций Россия поднялась с 56 до 42 места, а по показателю результаты инноваций страна потеряла позиции с 49 до 58 рейтингового места [1, 2].

Вышеуказанные показатели говорят о России, как о государстве с высоким уровнем инновационного потенциала и низкой степенью ее реализации, что обуславливает проблематику данного научного исследования.

Причиной такой тенденции является устаревший подход к участию в программах поддержки высокотехнологичных проектов, что, в первую очередь, связано с низкой эффективностью функционирования текущей национальной инновационной системы Российской Федерации.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОНОМИКИ РОССИИ И ЕЕ КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ В РАМКАХ ПОДДЕРЖКИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОЕКТОВ

Современный этап развития высокотехнологичных проектов в высокой степени зависит от тенденций информатизации российской экономики. К этим трендам стоит отнести [3]:

- техногенный характер развития;
- сокращение интервалов между информационными революциями;
- уплотнение экономического пространства и времени с развитием информационных технологий;
- превращение информации в один из основных видов ресурсов экономики.

Инфраструктура поддержки высокотехнологичных проектов становится неотъемлемой частью экономического общества. В нашей стране в этом направлении был принят ряд основополагающих решений, которые очертили перспективы развития инновационной экономики. В 2010 г. Указом Президента РФ принята Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации до 2020 г., направленная на развитие информатизации общества, государственного сектора и бизнеса. В дальнейшем этот документ был преобразован в Государственную программу

Российской Федерации «Информационное общество (2011–2020 гг.)». Целью указанной программы провозглашено социально-экономическое развитие страны на основе использования информационных технологий.

Современное состояние российской науки, как главного фактора развития инновационной экономики, противоречиво. Отставание, которое произошло в российской науке в 90-е годы прошлого века, продолжает давать о себе знать. Вначале это было обусловлено переходом от командной экономики к рыночным началам, впоследствии в качестве задачи ставилось достижение уровня развитых стран. В настоящее время к нерешаемым задачам добавилась необходимость формирования экономики, отвечающей современным мировым требованиям в условиях нарушения экономических и социальных связей с зарубежными партнерами.

Российский ученый Дуров Р.А. выделяет следующие первоочередные задачи создания условия для поступательного инновационного развития [4]:

- определение триггеров роста инновационной активности предприятия в актуальных сферах экономики страны;
- поиск источников финансирования НИОКР и резервов их роста;
- оценка текущего положения дел с реализацией инноваций и определения фактических результатов их интеграции в бизнес-процессы предприятий.

В настоящее время мы видим тенденцию сокращения числа организаций, которые занимаются научными исследованиями и разработками [5]. При этом их число сокращалось неравномерно, что свидетельствует о постоянной смене политики государства в отношении научных учреждений.

Настораживают и тенденции, связанные с изменением финансирования научных исследований, которые наблюдаются в период с 2017 г. [6]. В 2021 г. на научные исследования и разработки гражданского назначения будет направлено 486.1 млрд руб., как следует из пояснительной записки к проекту федерального бюджета на ближайшие три года. Это на 6.3% (или 32.8 млрд руб.) меньше, чем планировалось в конце 2019 г. при утверждении предыдущего бюджета [7]. Доля финансовых затрат на науку практически не растет относительно объема ВВП страны несмотря на то, что научные исследования усложняются и требуют все больших расходов и ресурсов (рис. 1).

Эффективность научной деятельности измеряется достаточно сложно в связи с трудностью определения того, что является ее продуктом. Тем не менее, одним из показателей, который применяется для этого, является патентная активность (число поданных заявок, число выданных патентов и число действующих патентов). Несмотря на рост числа действующих патентов, число поданных заявок и выданных патентов в последние годы практически не меняется (рис. 2).

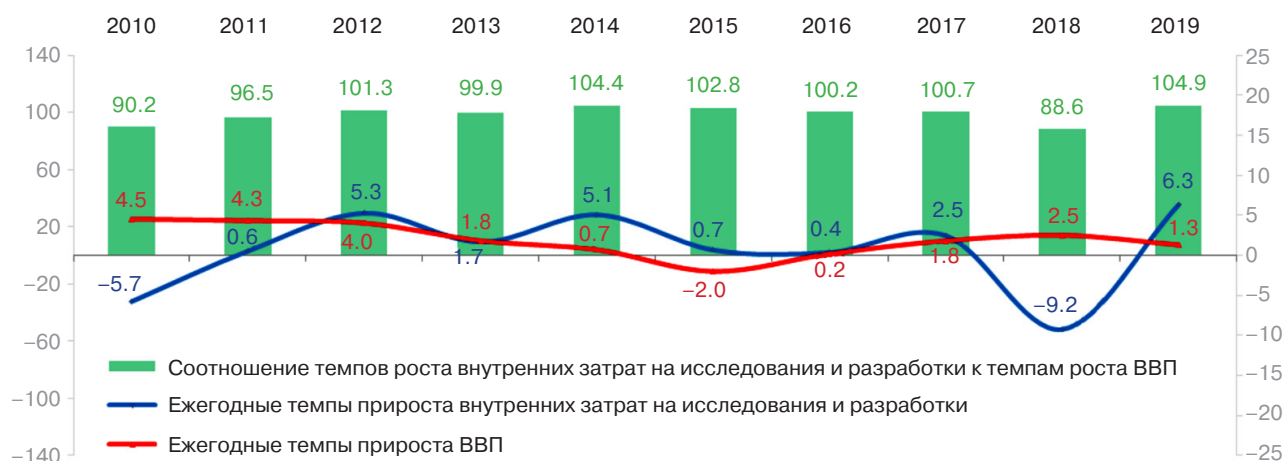


Рис. 1. Соотношение темпов роста внутренних затрат на исследования и разработки и валового внутреннего продукта (%) [8]

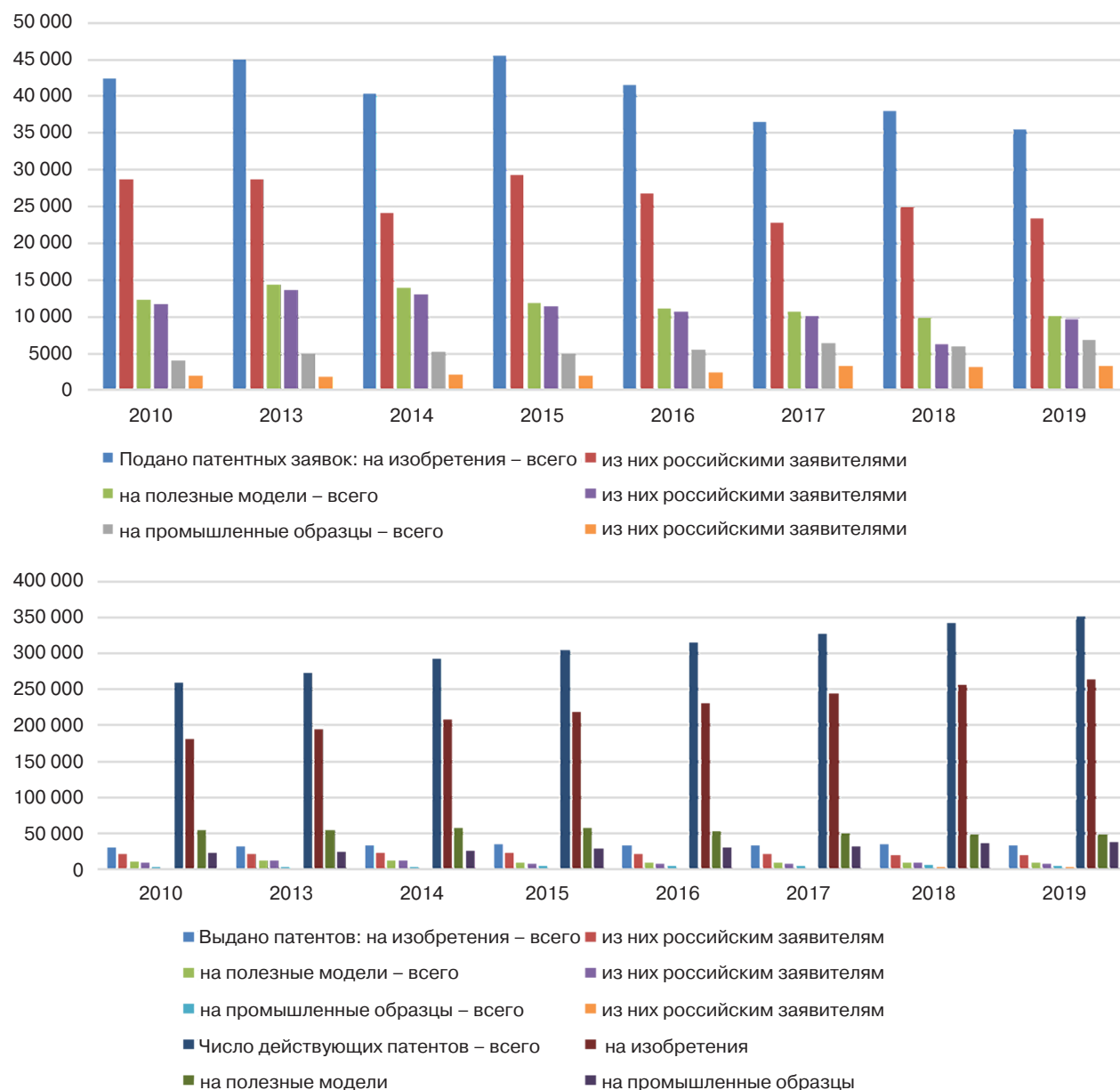


Рис. 2. Патентная активность в Российской Федерации [9]

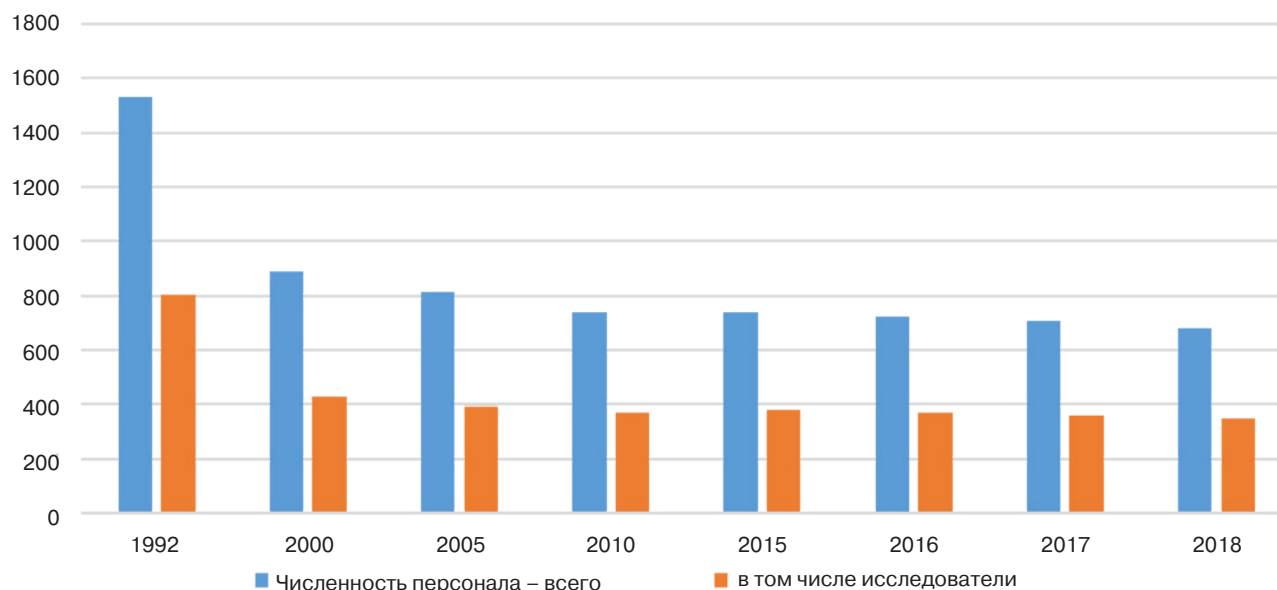


Рис. 3. Динамика численности персонала, занятого в научных исследованиях, в тыс. человек [9]

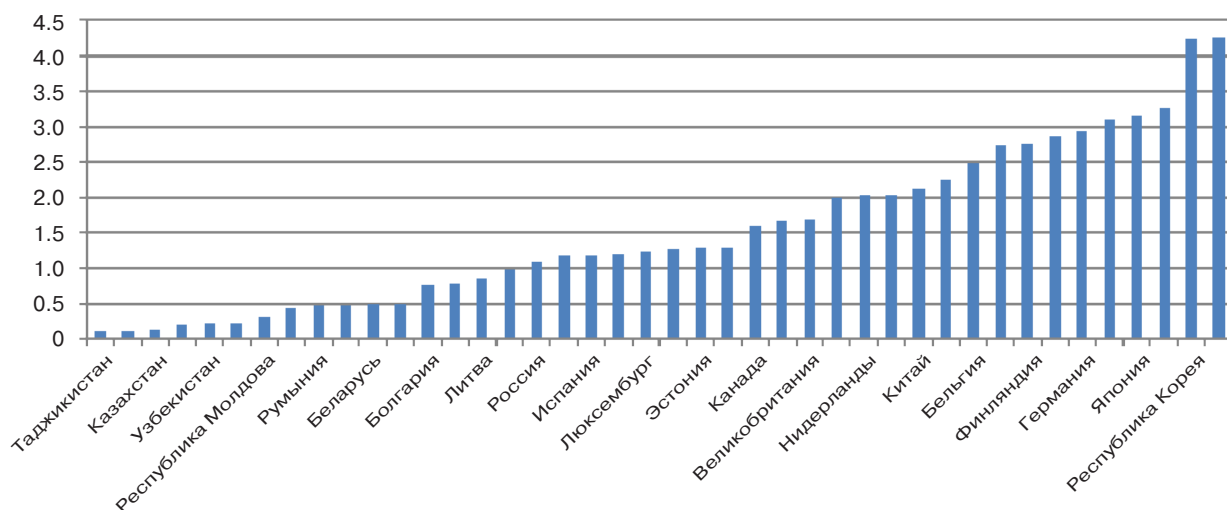


Рис. 4. Доля внутренних затрат на научные исследования (данные 2016 г.) [14]

Показанная тенденция усугубляется тем, что в общем числе поданных заявок и выданных патентов не все они представлены российскими заявителями.

Ситуация с патентной активностью вполне объяснима не только сокращением научных организаций и недостаточным финансированием, но и катастрофическим сокращением численности персонала, занятого в научных исследованиях (рис. 3).

Эти тенденции четко отражают проблемы, которые наблюдаются в российском секторе высокотехнологичных проектов.

Также к основным проблемам развития инновационной экономики в России стоит относить следующие факторы [1, 10–13]:

- дефицит бюджетных средств и недостаточный уровень финансирования национальных и региональных проектов, обеспечивающих формирование инновационной активности в экономике страны;

- отсутствие необходимого уровня нормативно-правового поля;
- низкий уровень инновационной активности предприятий;
- низкий уровень обеспечения безопасности интеллектуальной собственности российских предприятий;
- ограничение источников внешнего финансирования инновационной деятельности предприятий;
- низкий уровень эффективности государственных программ поддержки развития малых форм предприятий, как главных источников инновационной активности внутри экономики страны;
- отток интеллектуальных и человеческих ресурсов высокой профессиональной квалификации.

Для сравнения на рис. 4 показана доля внутренних затрат разных государств, выделяемых на научные исследования (в % к ВВП).

Важным условием поступательного развития системы высокотехнологичных проектов является стабильная государственная политика в отношении таких проектов, организаций, которые их формируют, а также предоставление помощи, в том числе и финансовой.

ФОРМИРОВАНИЕ НОВОЙ МОДЕЛИ ПОДДЕРЖКИ ГОСУДАРСТВОМ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОЕКТОВ

Прогноз развития сектора высокотехнологичных проектов в России может быть построен на том предположении, что он будет идти не столько по линии количественного расширения, сколько в направлении формирования новых способов использования технологий в жизни общества и экономике. Именно на это и ориентирована в настоящее время государственная политика.

Развитие же сферы науки, как сопутствующей отрасли высокотехнологичных проектов и инновационной экономики, также напрямую зависит от политики государства в этом направлении, и в первую очередь – возвращения прежнего статуса академическим институтам с увеличением их финансирования из государственного бюджета. Формирование фундаментальной науки позволит на базе ее достижений развивать и прикладные научные исследования.

С целью решения проблем поддержки высокотехнологичных проектов в России можно заимствовать зарубежный опыт. На сегодняшний день выделим три основные модели развития инновационной экономики, встречаемые в мире [15]:

- финансирование науки, образования и реализация крупных инновационных проектов (США, Англия и Франция);
- распространение инноваций, стимулирование модернизации всех отраслей экономики и создание благоприятной инновационной среды (Германия, Швейцария и Швеция);
- развитие инновационной инфраструктуры, координация инновационных центров между отраслями, интеграция с образованием и наукой (Япония и Южная Корея).

Теперь рассмотрим примеры отдельных зарубежных стран, использующих активные инструменты государственного стимулирования развития инновационной экономики.

Характеристикой стимулирования инновационной деятельности в Германии являются следующие процессы:

- проводится финансирование деятельности инновационных стартапов и субъектов малого бизнеса при помощи Германского банка развития и реконструкции;
- сформирован «Стартовый фонд ERP», финансирующий бизнес-проекты инновационных малых предприятий не старше 10 лет;

- проводится финансирование инновационных предприятий за счет субсидирования мероприятий, связанных с оформлением прав интеллектуальной собственности, подачи патентных заявлений на территории Германии и за рубежом.

Характеристикой стимулирования инновационной деятельности в США являются следующие процессы:

- главными субъектами инновационной деятельности выступают университеты и научно-исследовательские центры;
- формируются федеральные инновационные программы по созданию региональных инновационных кластеров, выступающих ключевыми субъектами национальной инновационной инфраструктуры;
- финансирование инновационных и научно-исследовательских разработок реализуется через договоры и гранты;
- реализация механизма государственно-частного партнерства происходит при включении не только университетов и крупного бизнеса, но и субъектов малого инновационного предпринимательства.

Характеристикой стимулирования инновационной деятельности в Японии являются следующие процессы:

- правительством на всех уровнях выделяются финансы на формирование программ и субсидий развития малого инновационного предпринимательства;
- проводится инициация создания технических кластеров и технопарков, стимулируется развитие частного венчурного капитала;
- идет постоянный процесс совершенствования законодательного поля по регулированию прав интеллектуальной собственности, что позволило ликвидировать любые пробелы в защите коммерческой деятельности инновационных субъектов и предприятий.

На основе вышесказанного можно сформулировать следующие рекомендации по повышению уровня развития инновационной экономики в Российской Федерации с учетом передового опыта зарубежных стран:

- формирование инфраструктуры и развитие интеграции государства, крупного и малого бизнеса. сферы образования с целью создания государственно-частных проектов инновационной деятельности и инновационных кластеров;
- привлечение внебюджетных и частных инвестиций в сферу научно-исследовательской деятельности и образования;
- формирование государственных грантов и программ для университетов, технопарков и инновационных предприятий по финансированию их проектной деятельности;
- ужесточение законодательства в части нормативно-правового поля защиты интеллектуальной собственности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, подводя итоги научного исследования, можно прийти к заключению, что низкий уровень развития высокотехнологичных проектов в России наносит непоправимый вред расширению научных связей и преобразованиям в экономической жизни государства. Бурное развитие информационных технологий в мире совпало для нашей страны с периодом серьезных экономических и политических преобразований. Это нанесло существенный удар по конкурентоспособности нашей страны в данной отрасли. Отставание показателей развития страны произошло, прежде всего, в результате трансформации экономики, не подкрепленной соответствующим финансированием передовых отраслей и науки.

К основным проблемами развития инновационной экономики в России стоит отнести следующие: дефицит бюджетных средств, недостаточный уровень финансирования национальных и региональных проектов, отсутствие необходимого уровня нормативно-правового поля, низкий уровень

инновационной активности предприятий, низкий уровень обеспечения безопасности интеллектуальной собственности, ограничение источников внешнего финансирования, низкий уровень эффективности государственных программ поддержки и отток интеллектуальных/человеческих ресурсов высокой профессиональной квалификации.

Построение адекватной системы финансирования науки стоит сейчас на повестке дня. Решение этой проблемы необходимо искать, сопоставляя два момента: вход – оценка суммарных инвестиций на развитие образования и научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, выход – оценка вклада по валовой добавленной стоимости отраслей, потребляющих новые знания. По этой причине необходимо заимствование зарубежного опыта при формировании нового подхода поддержки развития высокотехнологичных проектов.

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. Паньшин Б. Цифровая экономика: понятия и направления развития. *Наука и инновации*. 2019;3(193):48–55.
2. Гершман М.А., Гохберг Л.М., Рудь В.А., Стрельцова Е.А. Глобальный инновационный индекс – 2020. URL: <https://issek.hse.ru/news/396120793.html>
3. Буряк О.В. Информационный ресурс современной экономики. *Креативная экономика*. 2010;11(47):72–79.
4. Дуров Р.А. Анализ развития экономики знаний и инновационной среды. *Интернет-журнал «Наукovedenie»*. 2013;1(14):9. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/09evn113.pdf>
5. Отчет «Инновации и корпорации». URL: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/research-center/TechDays_report_rus.pdf
6. Отчет о результатах экспертно-аналитического мероприятия «Определение основных причин, сдерживающих научное развитие в Российской Федерации: оценка научной инфраструктуры, достаточность мотивационных мер, обеспечение привлекательности работы ведущих ученых». URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/89d/89d7d756dab6d050a260ecc55d3d5869.pdf>
7. Антикризисные меры. РБК. 06.10.2020. URL: <https://www.rbc.ru/economics/06/10/2020/5f7b372b9a7947fe8e8d644f>
8. Ратай Т.В. Динамика затрат на науку в России за последнее десятилетие. URL: <https://issek.hse.ru/news/408283757.html>
9. Россия в цифрах. 2020. Краткий статистический сборник. Росстат. М.; 2020. 550 с. ISBN 978-5-89476-488-7. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/GOyirK-PV/Rus_2020.pdf
10. Авдеева И.Л. Анализ перспектив развития цифровой экономики в России и за рубежом. В сб.: *Научно-практическая конференция с международным участием*

REFERENCES

1. Pan'shin B. Digital economy: concepts and lines of development. *Nauka i innovatsii = Science and innovations*. 2019;3(193):48–55 (in Russ.).
2. Gershman M.A., Gokhberg L.M., Rud' V.A., Strel'tsova E.A. Global'nyi innovatsionnyi indeks – 2020 (Global Innovation Index 2020). URL: <https://issek.hse.ru/news/396120793.html>
3. Buryak O.V. Informational resource of modern economy. *Kreativnaya ekonomika*. 2010;11(47):72–79 (in Russ.).
4. Durov R.A. Analysis of the development of knowledge economy and innovation environment. *Internet-zhurnal "Naukovedenie."* 2013;1(14):9. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/09evn113.pdf>
5. Innovatsii i korporatsii (Innovations and Corporations). Moscow: Deloitte; 2017. URL: https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ru/Documents/research-center/TechDays_report_rus.pdf
6. Otchet o rezul'tatakh ekspertno-analiticheskogo meropriyatiya "Opredelenie osnovnykh prichin, sderzhivayushchikh nauchnoe razvitie v Rossiiskoi Federatsii: otsenka nauchnoi infrastruktury, dostatochnost' motivatsionnykh mer, obespechenie privlekatel'nosti raboty vedushchikh uchenykh" (Report on the results of the expert-analytical event "Identification of the main reasons hindering scientific development in the Russian Federation: assessment of the scientific infrastructure, sufficiency of motivational measures, ensuring the attractiveness of the work of leading scientists." URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/89d/89d7d756dab6d050a260ecc55d3d5869.pdf>
7. Antikrizisnye mery (Anticrisis measures). RBC. 06.10.2020. URL: <https://www.rbc.ru/economics/06/10/2020/5f7b372b9a7947fe8e8d644f>
8. Ratai T.V. Dinamika zatrat na nauku v Rossii za poslednee desyatiletie (Dynamics of expenditures on science in

- «Цифровая экономика и «Индустрия 4.0»: проблемы и перспективы»: сб. тр. конф. (23–27 марта 2017 г., Санкт-Петербург). СПб.: СПбПУ Петра Великого; 2017. С. 19–25.
11. Уровень инноваций в российской экономике рухнул до минимума за 12 лет. URL: <https://www.finanz.ru/novosti/aktsii/uroven-innovatsiy-v-rossiyskoy-ekonomike-rukhnul-do-minimuma-za-12-let-1026115441>
 12. Сапрыкина В.Ю., Дегтяренко Е.А. Проблемы инновационного развития Российской Федерации. *Научный вестник Южного института менеджмента*. 2018;(1):44–48. URL: <https://uim.ru/images/Docs/nauka/NVesnik/jurnalNV-1-2018.pdf>
 13. Сосновская М.С. Проблемы развития инновационной инфраструктуры в России. *Международный научный журнал Инновационная наука*. 2018;1(5):137–143.
 14. Россия и страны мира. 2018. М.: Росстат; 2018. 375 с. ISBN 978-5-89476-461-0. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/world18.pdf
 15. Тополева Т.Н. Формирование инновационной модели развития предприятий промышленного комплекса. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки*. 2018;(4):220–232. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2018.4.18>
 - Russia over the last decade). URL: <https://issek.hse.ru/news/408283757.html>
 9. *Rossiya v tsifrakh. 2020. Kratkii statisticheskii sbornik. (Russia in numbers. 2020. Short statistical collection)*. Moscow: Rosstat; 2020. 550 p. ISBN 978-5-89476-488-7. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/GOyirKPV/Rus_2020.pdf
 10. Avdeeva I.L. Analysis of prospects for the development of the digital economy in Russia and abroad. In: *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Tsifrovaya ekonomika i "Industriya 4.0": problemy i perspektivy": sb. tr. konf. (Digital economy and Industry 4.0: problems and prospects. Proceedings of a scientific-practical conference with international participation)*. Saint Petersburg: SPbPU; 2017, p. 19–25 (in Russ.).
 11. Uroven' innovatsii v rossiiskoi ekonomike rukhnul do minimuma za 12 let (The level of innovation in the Russian economy has collapsed to a minimum in 12 years). URL: <https://www.finanz.ru/novosti/aktsii/uroven-innovatsiy-v-rossiyskoy-ekonomike-rukhnul-do-minimuma-za-12-let-1026115441>
 12. Saprykina V.Yu., Degtyarenko E.A. Problems of innovative development of the Russian Federation. *Nauchnyi vestnik Yuzhnogo instituta menedzhmenta = Scientific Bulletin of the Southern Institute of Management*. 2018;(1):44–48 (in Russ.). URL: <https://uim.ru/images/Docs/nauka/NVesnik/jurnalNV-1-2018.pdf>
 13. Sosnovskaya M.S. Problems of the development of innovative infrastructure in Russia. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Innovatsionnaya nauka = International Scientific Journal Innovative Science*. 2018;1(5):137–143 (in Russ.).
 14. *Rossiya i strany mira. 2018 (Russia and the countries of the world. 2018)*. Moscow: Rosstat; 2018. 375 c. ISBN 978-5-89476-461-0. URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/world18.pdf
 15. Topoleva T.N. Formation of innovative model of industrial complex enterprises development. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Sotsial'no-ekonomicheskie nauki = PNRPU Sociology and Economics Bulletin*. 2018;(4):220–232 (in Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2018.4.18>

Об авторах

Мандыч Ирина Александровна, к.э.н., доцент, доцент кафедры менеджмента Института инновационных технологий и государственного управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mandych@mirea.ru. Scopus Author ID: 57204072921, Researcher ID: N-4018-2018, <https://orcid.org/0000-0003-2957-6495>

Быкова Анна Викторовна, к.психол.н., доцент, доцент кафедры менеджмента Института инновационных технологий и государственного управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: bykova_a@mirea.ru. Scopus Author ID: 57204072980, ResearcherID: D-5163-2014, <https://orcid.org/0000-0003-2033-6647>

About the authors

Irina A. Mandych, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Management, Institute of Innovative Technologies and Public Administration, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mandych@mirea.ru. ResearcherID: N-4018-2018, Scopus Author ID: 57204072921, <https://orcid.org/0000-0003-2957-6495>

Anna V. Bykova, Cand. Sci. (Psy.), Associate Professor of the Department of Management, Institute of Innovative Technologies and Public Administration, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: bykova_a@mirea.ru. ResearcherID: D-5163-2014, Scopus Author ID: 57204072980, <https://orcid.org/0000-0003-2033-6647>

Математическое моделирование
Mathematic modeling

УДК 533+51-7

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-96-104>**НАУЧНАЯ СТАТЬЯ****Численное исследование влияния коагуляции
капель на динамику двухфракционного аэрозоля
в акустическом резонаторе****Д.А. Тукмаков^{1,®},
Н.А. Тукмакова²**¹ *Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»,
Казань, 402111 Россия*² *Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
Казань, 420111 Россия*[®] *Автор для переписки, e-mail: tukmakovda@imm.knc.ru*

Резюме. Исследование посвящено изучению влияния коагуляции капель дисперсной фазы на колебания аэрозоля в акустическом резонаторе. Математическая модель динамики аэрозоля реализует континуальную математическую модель динамики многофазной среды, учитывающей скоростную и тепловую неоднородность компонент смеси. Для описания динамики несущей среды применяется двухмерная нестационарная система уравнений Навье – Стокса для сжимаемого газа, записанная с учетом межфазного силового взаимодействия и межфазного теплообмена. Для описания динамики дисперсной фазы для каждой ее фракции решается система уравнений, включающая в себя уравнение неразрывности для «средней плотности» фракции, уравнения сохранения пространственных составляющих импульса и уравнение сохранения тепловой энергии фракции дисперсной фазы газовзвеси. Межфазное силовое взаимодействие включало в себя силу Архимеда, силу присоединенных масс и силу аэродинамического сопротивления. Также учитывался теплообмен между несущей средой – газом и каждой из фракций дисперсной фазы. Математическая модель динамики полидисперсного аэрозоля дополнялась математической моделью столкновительной коагуляции аэрозоля. Для составляющих скорости компонент смеси задавались однородные граничные условия Дирихле. Для остальных функций динамики многофазной смеси задавались однородные граничные условия Неймана. Уравнения решались явным методом Мак-Кормака со схемой нелинейной коррекции, позволяющей получить монотонное решение. В результате численных расчетов было определено, что вблизи генерирующего колебания поршня образуется область с повышенным содержанием крупнодисперсных частиц. Процесс коагуляции приводит к монотонному росту объемного содержания фракции крупнодисперсных частиц и монотонному уменьшению объемного содержания мелкодисперсных частиц.

Ключевые слова: многофазные среды, численное моделирование, полидисперсный аэрозоль, межфазное взаимодействие, коагуляция

• Поступила: 13.11.2020 • Доработана: 14.12.2020 • Принята к опубликованию: 25.12.2020

Для цитирования: Тукмаков Д.А., Тукмакова Н.А. Численное исследование влияния коагуляции капель на динамику двухфракционного аэрозоля в акустическом резонаторе. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):96–104. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-96-104>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Numerical study of the effect of droplet coagulation on the dynamics of a two-fraction aerosol in an acoustic resonator

Dmitry A. Tukumakov^{1,®},
Nadezhda A. Tukumakova²

¹ Federal Research Center Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, 402111 Russia

² Kazan National Technical University KNRTU-KAI, Kazan, 420111 Russia

® Corresponding author, e-mail: tukumakovda@imm.knc.ru

Abstract. The study is devoted to the study of the effect of coagulation of dispersed phase droplets on aerosol oscillations in an acoustic resonator. The mathematical model of aerosol dynamics implements a continuous mathematical model of the dynamics of a multiphase medium, taking into account the velocity and thermal inhomogeneity of the mixture components. To describe the dynamics of the carrier medium, a two-dimensional unsteady system of Navier – Stokes equations for a compressible gas is used, written taking into account the interphase force interaction and interphase heat transfer. To describe the dynamics of the dispersed phase, a system of equations is solved for each of its fractions, including the continuity equation for the «average density» of the fraction, the equations for the conservation of the spatial components of the momentum and the equation for the conservation of thermal energy of the fraction of the dispersed phase of the gas suspension. The interphase force interaction included the Archimedes force, the force of the added masses and the force of aerodynamic drag. The heat exchange between the carrier medium - gas and each of the dispersed phase fractions was also taken into account. The mathematical model of the dynamics of a polydisperse aerosol was supplemented by a mathematical model of collisional aerosol coagulation. For the velocity components of the mixture components, uniform Dirichlet boundary conditions were specified. For the remaining functions of the dynamics of the multiphase mixture, homogeneous Neumann boundary conditions were specified. The equations were solved by the explicit McCormack method with a nonlinear correction scheme that allows obtaining a monotonic solution. As a result of numerical calculations, it was determined that a region with an increased content of coarse particles is formed in the vicinity of the oscillating piston. The coagulation process leads to a monotonic increase in the volumetric content of the fraction of coarse particles and a monotonic decrease in the volumetric content of fine particles.

Keywords: multiphase media, numerical simulation, polydisperse aerosol, interphase interaction, coagulation

• Submitted: 13.11.2020 • Revised: 14.12.2020 • Accepted: 25.12.2020

For citation: Tukumakov D.A., Tukumakova N.A. Numerical study of the effect of droplet coagulation on the dynamics of a two-fraction aerosol in an acoustic resonator. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):96–104 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-2-96-104>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Многие природные явления и технические процессы связаны с движением сплошных сред, являющихся неоднородными по своим механическим и физико-химическим свойствам [1–14]. Проблема удаления дисперсной компоненты аэрозольных сред в каналах, трубах и емкостях встречается в ряде технологических процессов энергетики и топливной промышленности, химических технологиях, системах кондиционирования воздуха [7–10]. Для очистки газокапельного потока от дисперсной фазы часто применяются инерционные сепараторы. При этом мелкодисперсные частицы плохо отделяются инерционными сепараторами, и возникает задача удаления мелкодисперсных частиц дисперсной фазы за счет поглощения мелкодисперсных капель каплями большего размера, после чего крупнодисперсная фаза газокапельной среды отделяется от газа инерционным сепаратором.

Изучение динамики аэрозольных сред в случае, когда капельная компонента смеси имеет массовую долю, сопоставимую с массовой долей газа, требует использования математических моделей, учитывающих инерционное и тепловое взаимодействие газовой и капельной фаз смеси, скоростную и тепловую неоднородность течения многофазной среды [1]. В данной работе применяется математическая модель, описывающая поля скорости и температуры у каждой из компонент смеси. Дисперсная фаза смеси моделируется как многофракционная, фракции дисперсной фазы отличаются размером дисперсных включений. Математическая модель динамики полидисперсной газокапельной среды дополнялась моделью столкновительной коагуляции [5, 12]. Данная работа посвящена исследованию влияния коагуляции частиц дисперсной фазы аэрозоля на распределение объемного содержания фракций газозвеси при колебаниях аэрозоля в закрытой трубе.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Динамика полидисперсной газозвеси описывается системой уравнений полидисперсной газозвеси с учетом межфазного обмена импульсом и энергией. Движение несущей среды описывается системой уравнений Навье – Стокса [15] для сжимаемого теплопроводного газа с учетом межфазного силового взаимодействия и теплообмена:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla (\rho_i \mathbf{V}_i) = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1 V_1^k}{\partial t} + \nabla^i (\rho_1 V_1^k V_1^i + \delta_{ik} p - \tau_{ik}) = \\ = - \sum_{j=2}^m F_{jk} + \sum_{j=2}^m \alpha_j \nabla^k p, \quad i, k = 1, 2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_j V_j^k}{\partial t} + \nabla^i (\rho_j V_j^i V_j^k) = F_{jk} - \alpha_j \nabla^k p, \\ j = 2, \dots, n, \quad i, k = 1, 2, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (e_1)}{\partial t} + \nabla^i (V_1^i (e_1 + p - \tau_{ii}) - V_1^k \tau_{ki} - \lambda \nabla^i T) = \\ = - \sum_{j=2}^n Q_j - \sum_{j=2}^n |F_{jk}| (V_1^k - V_j^k) + \\ + \left(\sum_{j=2}^n \alpha_j \right) \nabla^k (p V_1^k), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (e_j)}{\partial t} + \nabla^k (e_j V_j^k) = Q_j, \quad j = 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} p &= (\gamma - 1) (e_1 - \rho_1 (u_1^2 + v_1^2) / 2), \\ e_1 &= \rho_1 I + \rho_1 (u_1^2 + v_1^2) / 2, \\ \rho_i &= \alpha_i \rho_{i0}, \quad e_i = \rho_i C_{pi} T_i. \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{V}_i = [u_i, v_i]$ – вектор скорости компонент смеси, τ_{ij} – тензор вязких напряжений несущей компоненты:

$$\tau_{11} = \mu \left(2 \frac{\partial u_1}{\partial x} - \frac{2}{3} D \right), \quad \tau_{22} = \mu \left(2 \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{2}{3} D \right),$$

$$\tau_{12} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial v_1}{\partial x} \right), \quad D = \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y}.$$

Уравнение (1) описывает непрерывность плотности несущей среды и средней плотности фракций дисперсной фазы ($i > 1$). Уравнения (2) и (3) описывают законы сохранения компонент вектора импульса несущей среды и фракций дисперсной фазы, соответственно. Уравнения (4) и (5) описывают законы сохранения полной энергии газа и тепловой энергии фракций дисперсной фазы.

Сила межфазного взаимодействия включает в себя силу аэродинамического сопротивления, силу Архимеда и силу присоединенных масс [1]. Здесь p, ρ_1, u_1, v_1 – давление, плотность, декартовы составляющие скорости несущей среды в направлении осей x и y , соответственно; T_1, e_1 – температура и полная энергия газа; $\alpha_i, \rho_i, T_i, C_{pi}, e_i, u_i, v_i$ – объемное содержание фракции дисперсной фазы, средняя плотность, физическая плотность, температура, теплоемкость, внутренняя энергия, декартовы составляющие скорости фракций дисперсной фазы, F_{jk} – составляющие вектора силового взаимодействия фракций дисперсной фазы

и несущей среды, $k = 1, 2$; Q_j – тепловой поток между j -й фракцией дисперсной фазы и несущей средой, $j = 2, \dots, n$ [1, 2]:

$$F_{xi} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_{di} \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_i)^2 + (v_1 - v_i)^2} (u_1 - u_i) + \\ + \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) + \\ + 0.5 \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{\partial u_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} \right),$$

$$F_{yi} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\alpha_i}{(2r_i)} C_{di} \rho_1 \sqrt{(u_1 - u_i)^2 + (v_1 - v_i)^2} (v_1 - v_i) + \\ + \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right) + \\ + 0.5 \alpha_i \rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{\partial v_i}{\partial t} - u_i \frac{\partial v_i}{\partial x} - v_i \frac{\partial v_i}{\partial y} \right),$$

$$C_{di} = \frac{24}{Re_{il}} + \frac{4}{Re_{il}^{0.5}} + 0.4, M_{li} = |\bar{V}_1 - \bar{V}_i|/A,$$

$$Re_{li} = \rho_1 |\bar{V}_1 - \bar{V}_i| 2r_i / \mu, Pr = C_p \mu / \lambda,$$

$$Nu_{li} = 2 \exp(-M_{li}) + 0.459 Re_{li}^{0.55} Pr^{0.33},$$

$$Q_i = 6 Nu_{li} \lambda (T_1 - T_i) / d_i, i = 2, \dots, n.$$

Одним из важных параметров динамики многофазных сред является объемное содержание дисперсной фазы, отношение объема компоненты смеси к общему объему смеси $\alpha_i = V_i/V$, при этом физическая плотность материала дисперсной фазы представляется неизменной. Для описания процесса коагуляции частиц использовалась математическая модель столкновительной коагуляции [5, 12]:

$$\frac{dm_i}{dt} = \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} N_j m_j, \frac{dN_i}{dt} = -N_i \sum_{j=i+1}^n k_{ij} N_j, \quad (6)$$

В уравнении (6) m_i и N_i – масса и концентрация частиц i -й фракции,

$$\alpha_i = \frac{4}{3} \pi N_i r_i^3, \theta_j = \arctg(v_j u_j),$$

$$k_{ij} = \frac{\pi}{4} (d_i + d_j)^2 \left[u_i \cos(\theta_j) + v_i \sin(\theta_j) - \sqrt{u_j^2 + v_j^2} \right].$$

Изменение составляющих скорости i -й фракции дисперсной фазы определяется следующими уравнениями:

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} (u_j - u_i) m_j N_j,$$

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} (v_j - v_i) m_j N_j,$$

$$\frac{d}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial}{\partial x} + v_i \frac{\partial}{\partial y}.$$

Температура частиц i -й фракции после поглощения более мелких частиц находится из уравнения:

$$T_i^* = \frac{1}{C_i m_i^*} \left(\sum_{j=1}^{i-1} k_{ij} N_j C_j m_j T_j + C_i m_i T_i \right).$$

Наличие в газокapelном потоке процессов коагуляции характеризуется безразмерным параметром – числом Вебера; рассматривается число Вебера $We_i = 2\rho_1 r_i |\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_i|^2 / \sigma$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости из которой сформированы капли аэрозоля, ρ_1 – плотность несущей среды. В моделируемых процессах относительные числа Вебера для фракций дисперсной фазы имеют значение меньше критического $We_{кр} \approx 10$.

Для составляющих скорости компонент смеси задавались однородные граничные условия Дирихле. Для остальных функций динамики многофазной смеси задавались однородные граничные условия Неймана.

Система уравнений динамики многофазной среды (1)–(5) решалась двухэтапным явным конечно-разностным методом Мак-Кормака, позволяющим получать решения второго порядка точности [17].

Рассмотрим применение численного алгоритма на примере скалярного нелинейного уравнения в частных производных (7):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial a(f)}{\partial x} + \frac{\partial b(f)}{\partial y} = c(f). \quad (7)$$

Алгоритм явного конечно-разностного метода Мак-Кормака для нелинейного уравнения (7) имеет вид:

$$f_{j,k}^* = f_{j,k}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{j+1,k}^n - a_{j,k}^n) - \\ - \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{j,k+1}^n - b_{j,k}^n) + \Delta t c_{j,k}^n, \quad (8)$$

$$f_{j,k}^{n+1} = 0.5 (f_{j,k}^n + f_{j,k}^*) - \\ - 0.5 \frac{\Delta t}{\Delta x} (a_{j,k}^* - a_{j-1,k}^*) - \\ - 0.5 \frac{\Delta t}{\Delta y} (b_{j,k}^* - b_{j,k-1}^*) + 0.5 \Delta t c_{j,k}^*. \quad (9)$$

Здесь Δx , Δy – шаги по пространственным направлениям, Δt – шаг по времени.

После каждого временного шага для получения монотонного численного решения применялась схема нелинейной коррекции численного решения [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В расчетах задавались следующие параметры моделируемого процесса. Дисперсная фаза газозвеси состояла из двух фракций с диаметрами частиц $d = 2$ мкм и 200 мкм, объемными содержаниями каждой фракции $\alpha_2 = \alpha_3 = 0.005$ с дисперсными включениями, равномерно распределенными по всей емкости, для начального момента времени, с физической плотностью материала частиц $\rho_{20} = \rho_{30} = 1000$ кг/м³. При $t = 0$ поршень начинал движение по гармоническому закону $x(t) = A \sin(\omega t)$, где $\omega = \pi c/L$ – циклическая частота первого линейного резонанса колебаний в закрытой трубе [17], здесь и далее c – скорость звука. На рис. 1 схематически изображен акустический резонатор. Высота акустического резонатора $L = 0.938$ м, диаметр трубы $h = 0.1$ м. Расчетные параметры сетки: 200 узлов в направлении y и 40 узлов в направлении x .

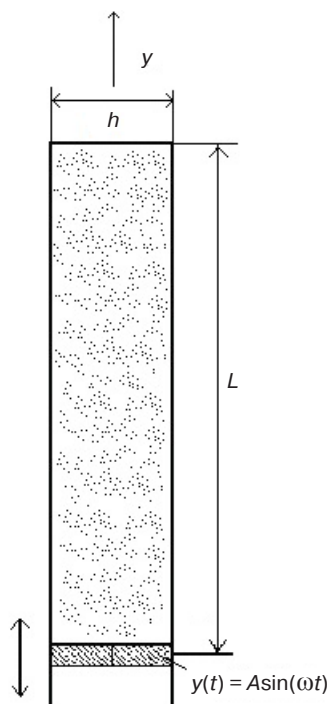


Рис. 1. Схематическое изображение акустического резонатора

Схема данного резонатора использована в физическом эксперименте [11]. Вертикальное расположение канала, в котором происходят колебания аэрозоля, объясняется тем, что при таком расположении акустического резонатора процесс гравитационного осаждения более длительный.

Пространственное распределение y -составляющей скорости газа при колебаниях двухфракционной газозвеси представлено на рис. 2, на поверхности поршня и на закрытом конце канала наблюдаются минимальные значения скорости, наибольшее значение y -составляющей скорости газа достигает вблизи середины канала. Колебания столба газа в однородном газе и в аэрозоле отличаются интенсивностью (рис. 3), что вызвано межфазным взаимодействием несущей

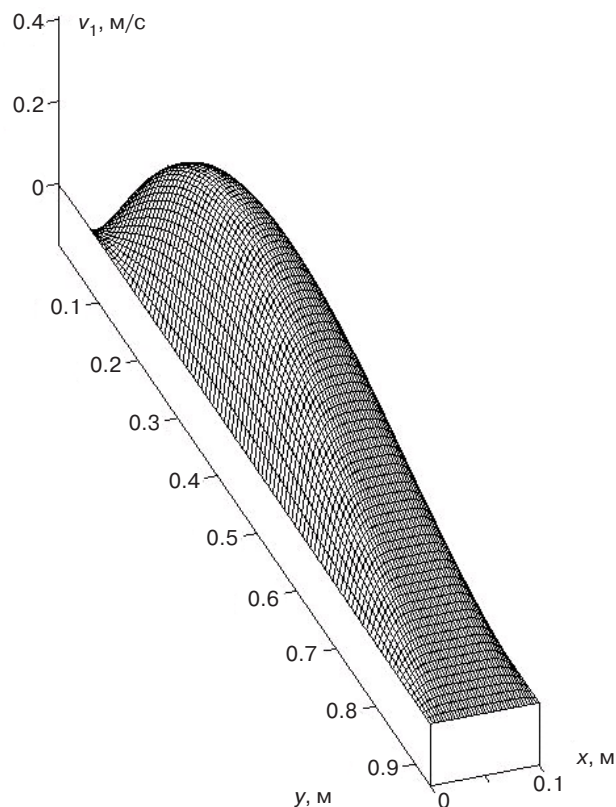


Рис. 2. Пространственное распределение y -составляющей скорости газа в момент времени $t = 0.62$ с

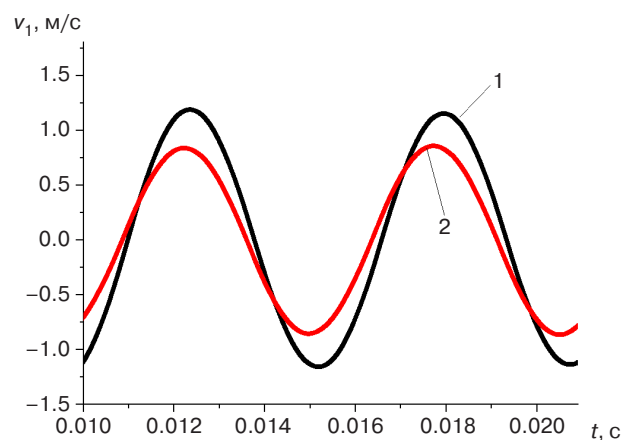


Рис. 3. Временные зависимости скорости газа: 1 – расчеты, полученные по модели однородного вязкого газа; 2 – расчеты, полученные по модели двухфракционной газозвеси

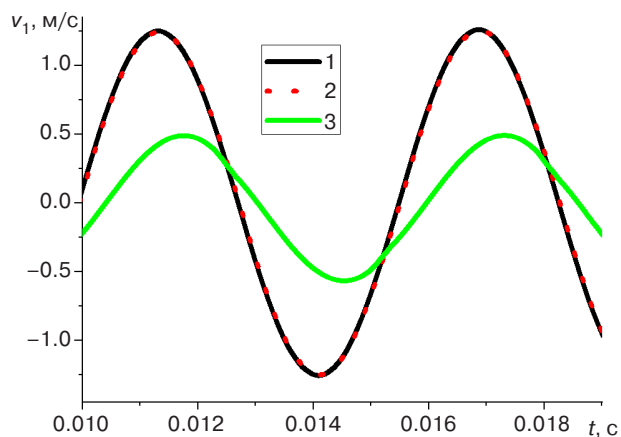


Рис. 4. Временная зависимость y -составляющей скорости компонент смеси:

1 – несущая среда; 2 – фракция дисперсной фазы с размером частиц $d = 2$ мкм; 3 – фракция дисперсной фазы $d = 200$ мкм в точке $x = h/2$, $y = L/20$

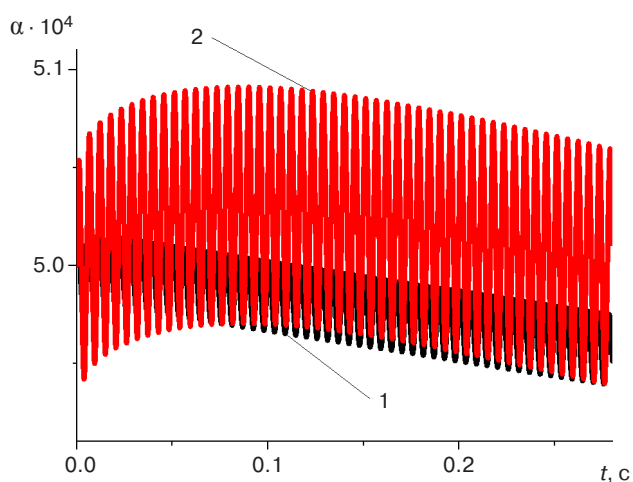


Рис. 5. Временные зависимости величины объемных содержаний мелкодисперсной фракции $d = 2$ мкм (кривая 1) и крупнодисперсной фракции $d = 200$ мкм (кривая 2) в точке $x = h/2$, $y = L/20$

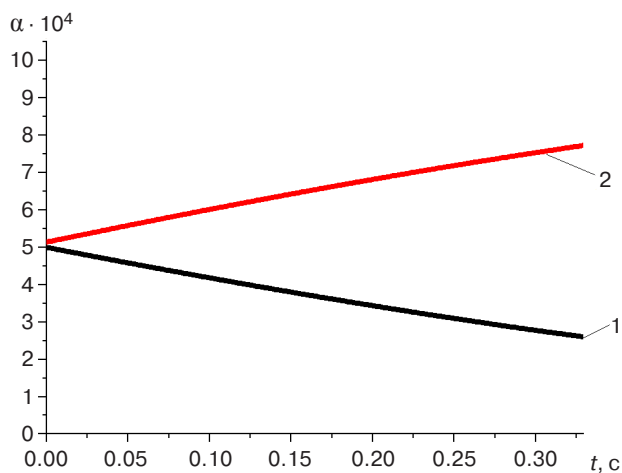


Рис. 6. Временные зависимости объемного содержания фракций дисперсной фазы в точке $x = h/2$, $y = L/20$. Объемные содержания фракций частиц дисперсной фазы: 1 – частицы с размером $d = 2$ мкм; 2 – частицы с размером $d = 200$ мкм

среды и дисперсной фазы. При амплитуде хождения поршня $A = 1$ см величина изменения y -составляющей скорости газа в двухфракционной газозвеси составляет 0.715 от величин изменения y -составляющей скорости однородного газа. Для фракций крупных частиц скорости колебаний имеют существенное отличие от скорости колебаний мелкодисперсных частиц, при этом мелкодисперсные частицы имеют несущественные скоростные отличия в сравнении с несущей средой (рис. 4). На рис. 5 изображены временные зависимости объемных содержаний фракций дисперсной фазы. Из рисунка следует, что массоперенос частиц крупной фракции происходит с большей интенсивностью. Так как для более крупных капель за счет их большей инерционности, возникают условия несимметрии передачи импульса капле на фазах сжатия и разрежения при волновых колебаниях газа [6, 18], возникает дрейф крупнодисперсных включений. На рис. 6 представлены временные зависимости объемного содержания фракций дисперсной фазы, полученные расчетами в математической модели, учитывающей коагуляцию частиц. За счет поглощения мелких частиц крупными наблюдается монотонный рост объемного содержания фракции крупных частиц и монотонное убывание объемного содержания мелких частиц. На рис. 7 представлены пространственные распределения объемных содержаний фракций дисперсной фазы газозвеси,

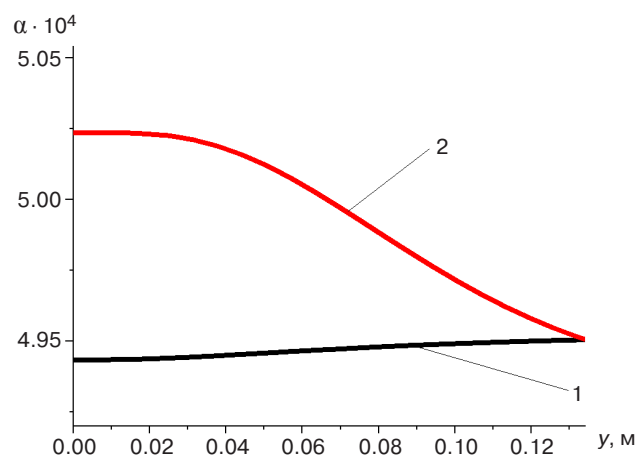


Рис. 7. Пространственное распределение объемных содержаний фракций газозвеси вдоль оси y ($x = h/2$), без учета влияния коагуляции, в момент времени $t = 0.62$ с. Объемные содержания фракций частиц дисперсной фазы при возбуждении колебаний с амплитудой хождения поршня $A = 1$ см:

1 – частицы с размером $d = 2$ мкм;
2 – частицы с размером $d = 200$ мкм

полученные при моделировании колебаний для математической модели, не учитывающей коагуляции капель. Область повышенной концентрации крупнодисперсных частиц формируется вблизи поршня. Расчеты объемных содержаний фракций дисперсной фазы с учетом влияния коагуляции представлены на рис. 8. Учет влияния коагуляции приводит к увеличению объемного содержания крупнодисперсной фракции и уменьшению объемного содержания мелкодисперсной фракции.

Наличие дисперсной компоненты приводит к уменьшению амплитуды изменения давления: $\Delta p_1 = 1053$ Па, $\Delta p_2 = 1358$ Па для двухфракционной газозвеси и однородного газа (рис. 9). Учет коагуляции приводит к возрастанию амплитуды изменения давления $\Delta p_1 = 980$ Па и $\Delta p_2 = 990$ Па. Данная закономерность вызвана тем, что уменьшение объемного содержания мелкодисперсных частиц приводит к уменьшению влияния дисперсной фазы, т.к. в динамике газозвесей наиболее существенное влияние на течение газа оказывают мелкодисперсные частицы. Связано это с тем, что фракция мелкодисперсных частиц имеет большую площадь взаимодействия с газом, чем фракция крупнодисперсных частиц. Кратное уменьшение размера частиц приводит к трехкратному уменьшению количества частиц и двукратному уменьшению площади одной частиц, то есть происходит кратное увеличение площади ча-

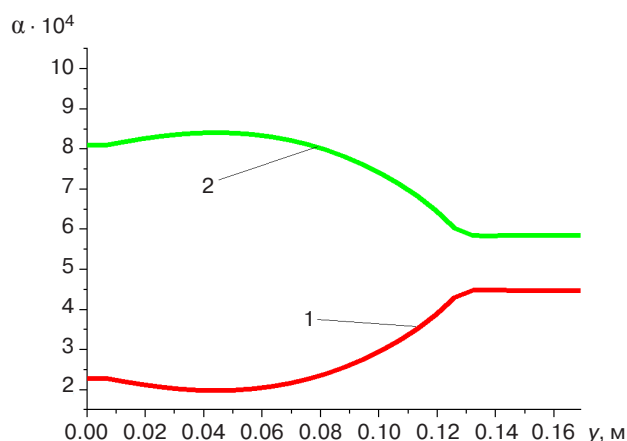


Рис. 8. Пространственное распределение объемного содержания фракций газозвеси вдоль оси y ($x = h/2$), с учетом влияния коагуляции, в момент времени $t = 0.62$ с. Объемные содержания фракций частиц дисперсной фазы при возбуждении колебаний с амплитудой хождения поршня $A = 1$ см:
1 – частицы с размером $d = 2$ мкм;
2 – частицы с размером $d = 200$ мкм

ВЫВОДЫ

В результате численного моделирования было выявлено, что в процессе колебаний полидисперсной газозвеси вблизи узла стоячей волны поля скорости газа формируется область с повышенным содержанием крупнодисперсных частиц. Учет коагуляции капель аэрозоля демонстрирует, что за счет поглощения мелких капель крупными каплями происходит монотонное увеличение объемного содержания крупнодисперсных частиц и монотонное уменьшение объемного содержания мелкодисперсных частиц. В области повышенной концентрации частиц крупнодисперсной фракции за счет коагуляции объемное содержание мелкодисперсных частиц существенно уменьшается. Учет влияния коагуляции частиц приводит к увеличению амплитуды изменения давления.

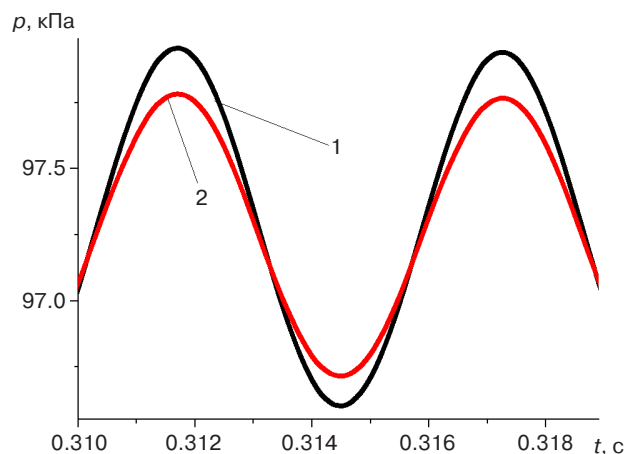


Рис. 9. Временные зависимости давления в точке $x = h/2, y = L/20$:
1 – для чистого газа; 2 – для модели двухфракционной газозвеси

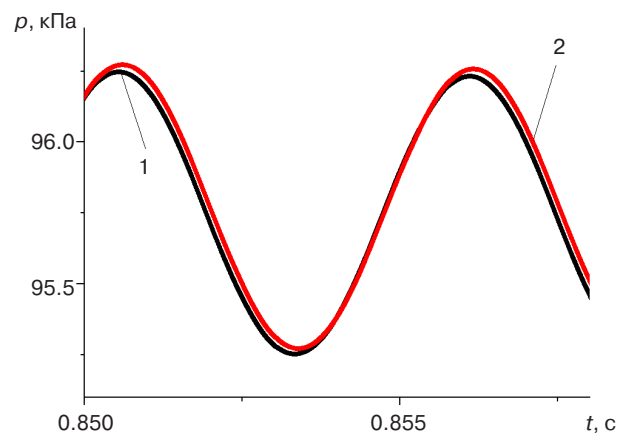


Рис. 10. Временные зависимости давления в точке $x = h/2, y = L/20$:
1 – для модели динамики двухфракционной газозвеси; 2 – для модели двухфракционной газозвеси, учитывающей коагуляцию частиц различных размеров

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках НИР по договору № 15754ГУ/2020.

Работа Тукмакова Д.А. (проведение численных расчетов, обсуждение результатов) выполнялась

в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

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. Нигматулин Р.И. *Динамика многофазных сред*: в 2 ч. М.: Наука; 1987. Ч. 1. 464 с.
2. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. СПб.: Недра; 2003. 284 с.
3. Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. *Волновые процессы в газовзвесах частиц металлов*. Новосибирск: Параллель; 2015. 301 с. ISBN: 978-5-98901-162-9
4. Стернин Л.Е., Маслов Б.Н., Шрайбер А.А., Подвысоцкий А.М. *Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами*. М.: Машиностроение; 1980. 176 с.
5. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П., Худяков В.А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник: в 6 т. М.: ВИНТИ; 1971. Т. 1. Методы расчета. 267 с.
6. Тукмаков А.Л. Зависимость механизма дрейфа твердой частицы в нелинейном волновом поле от ее постоянной времени и длительности прохождения волновых фронтов. *Прикладная механика и техническая физика*. 2011;52(4):106–115.
7. Пахомов М.А., Терехов В.И. Влияние испарения капли на структуру течения и тепломассобмен в ограниченном закрученном газокapelном потоке за его внезапным расширением. *Теплофизика и аэромеханика*. 2018;6:865–875.
8. Федяев В.Л. Математическое моделирование и оптимизация градиент. *Труды Академэнерго*. 2009;3:91–107.
9. Волошин А.М., Салюков В.В., Громов В.С., Зарецкий Я.В., Серазетдинов Ф.Ш., Тонконог В.Г., Явкин В.Б., Голованов А.А. Разработка и создание устройств очистки транспортируемого газа. *Газовая промышленность*. 2010;1(641):73–75.
10. Тонконог В.Г., Баянов И.М., Тонконог М.И., Мубаракшин Б.Р. Технология газификации сжиженного природного газа. *Инженерно-физический журнал*. 2016;89(4):818–825.
11. Губайдуллин Д.А., Зарипов Р.Г., Ткаченко Л.А., Шайдуллин Л.Р. Динамика табачного дыма при резонансных колебаниях в закрытой трубе. *Теплофизика высоких температур*. 2019;57(2):312–315. <https://doi.org/10.1134/S0040364419010125>
12. Тукмаков А.Л., Баянов Р.И., Тукмаков Д.А. Течение полидисперсной газовзвеси в канале, сопровождающееся коагуляцией в нелинейном волновом поле. *Теплофизика и аэромеханика*. 2015;22(3):319–325.
13. Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А., Тукмаков Д.А. Ударно-волновой разлет газовзвесей. *Доклады Академии Наук*. 2016;466(4):418–421. <https://doi.org/10.7868/S0869565216040101>

REFERENCES

1. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred: v 2 ch.: T. 1. (Dynamics of multiphase media: in 2 v. V. 1)*. Moscow: Nauka; 1987. V. 1. 464 p. (in Russ.).
2. Kutushev A.G. *Matematicheskoe modelirovanie volnovykh protsessov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh (Mathematical modeling of wave processes in aerodispersed and powdery media)*. Sankt Peterburg: Nedra; 2003. 284 p. (in Russ.).
3. Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel' T.A. *Volnovye protsessy v gazovzvesyakh chastits metallov (Wave processes in gas suspensions of metal particles)*. Novosibirsk: Parallel'; 2015. 301 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-98901-162-9
4. Sternin L.E., Maslov B.N., Shraiber A.A., Podvysotskii A.M. *Dvukhfaznye mono- i polidispersnye techeniya gaza s chastitsami (Two-phase mono- and polydisperse gas flows with particles)*. Moscow: Mashinostroenie; 1980. 176 p. (in Russ.).
5. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P., Khudyakov V.A. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya: Spravochnik: v 6 t. T. 1 Metody rascheta (Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products: Handbook in 6 v. V. 1 Calculation methods)*. Moscow: VINITI; 1971. 267 p. (in Russ.).
6. Tukmakov A.L. Dependence of the mechanism of solid particle drift in a nonlinear wave field on the time constant and wave front passage time. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2011;52(4):590–598. <https://doi.org/10.1134/S0021894411040122> [Tukmakov A.L. Zavisimost' mekhanizma dreifa tverdoi chastitsy v nelineinom volnovom pole ot ee postoyannoi vremeni i dlitel'nosti prokhozheniya volnovykh frontov. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika = J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2011;52(4):590–598 (in Russ.).]
7. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Effect of droplet evaporation on the flow structure and heat and mass transfer in a confined swirling gas-droplet flow downstream of a tube sudden expansion *Thermophys. Aeromech.* 2018;25(6):833–843. <https://doi.org/10.1134/S0869864318060057> [Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Vliyanie ispareniya kapel' na strukturu techeniya i teplomassobmen v ogranichenom zakruchennom gazokapel'nom potoke za ego vnezapnym rasshirenie. *Teplofizika i aeromekhanika = Thermophys. Aeromech.* 2018;6:865–875 (in Russ.).]
8. Fedyaev V.L. Mathematical modeling and optimization of the water cooling towers. *Trudy Akademenergo = Transactions of Academenergo*. 2009;3:91–107 (in Russ.).
9. Voloshin A.M., Salyukov V.V., Gromov V.S., Zaretskii Ya.V., Serazetdinov F.Sh., Tonkonog V.G., Yavkin V.B.,

14. Тукмаков А.Л., Кашапов Н.Ф., Тукмаков Д.А., Фазлыяхматов М.Г. Процесс осаждения заряженной полидисперсной газозвеси на поверхность пластины в электрическом поле. *Теплофизика высоких температур*. 2018;56(4):500–504. <https://doi.org/10.31857/S000523100002724-0>
15. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2 т. М.: Мир; 1991. Т. 2. Методы расчета различных течений. 552 с. ISBN 5-03-001881-8
16. Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа. *Матем. моделирование*. 1993;5(3):74–83.
17. Горелик Г.С. *Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику*. М.: ФИЗМАТГИЗ; 1959. 572 с.
18. Красильников В.А., Крылов В.В. *Введение в физическую акустику*. М.: Наука; 1984. 403 с.
- Golovanov A.A. Development and creation of devices for cleaning transported gas. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry*. 2010;1:73–75 (in Russ.).
10. Tonkonog V.G., Bayanov I.M., Tonkonog M.I., Mubarakshin B.R. Technology of gasification of liquefied natural gas. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2016;89(4):821–828. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1442-4> [Tonkonog V.G., Bayanov I.M., Tonkonog M.I., Mubarakshin B.R. Tekhnologiya gazifikatsii szhizhennogo prirodnogo gaza. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal = J. Eng. Phys. Thermophys.* 2016;89(4):818–825 (in Russ.).]
11. Gubaidullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A., Shaidullin L.R. Dynamics of tobacco smoke under resonant oscillations in a closed tube. *High Temp.* 2019;57(2):283–285. <https://doi.org/10.1134/S0018151X19010127> [Gubaidullin D.A., Zaripov R.G., Tkachenko L.A., Shaidullin L.R. Dinamika tabachnogo dyma pri rezonansnykh kolebaniyakh v zakrytoi trube. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temp.* 2019;57(2):312–315 (in Russ.).]
12. Tukmakov A.L., Bayanov R.I., Tukmakov D.A. Flow of polydisperse gas-particle mixture in a duct followed by coagulation in a nonlinear wave field. *Thermophys. Aeromech.* 2015;22(3):305–311. <https://doi.org/10.1134/S086986431503004X> [Tukmakov A.L., Bayanov R.I., Tukmakov D.A. Techenie polidispersnoi gazovzvesi v kanale, soprovozhdayushcheesya koagulyatsiei v nelineinom volnovom pole. *Teplofizika i aeromekhanika = Thermophys. Aeromech.* 2015;22(3):319–325 (in Russ.).]
13. Nigmatulin R.I., Gubaidullin D.A., Tukmakov D.A. Shock wave dispersion of gas-particle mixtures. *Doklady Physics.* 2016;61(2):70–73. <https://doi.org/10.1134/S1028335816020038> [Nigmatulin R.I., Gubaidullin D.A., Tukmakov D.A. Udarno-volnovoi razlet gazovzvesei. *Doklady Akademii Nauk = Doklady Physics.* 2016;466(4):418–421 (in Russ.).]
14. Tukmakov A.L., Tukmakov D.A., Kashapov N.F., Fazlyyakhmatov M.G. Process of the deposition of charged polydisperse gas suspension on the plate surface in an electrical field. *High Temp.* 2018;56(4):481–485. <https://doi.org/10.1134/S0018151X18040193> [Tukmakov A.L., Kashapov N.F., Tukmakov D.A., Fazlyyakhmatov M.G. Protsess osazhdeniya zaryazhennoi polidispersnoi gazovzvesi na poverkhnost' plastiny v elektricheskom pole. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temp.* 2018;56(4):500–504 (in Russ.).]
15. Fletcher K. *Vychislitel'nye metody v dinamike zhidkostei: v 2 t. T. 2. Metody rascheta razlichnykh techenii (Computational methods in fluid dynamics: in 2 v. V. 2. Methods for calculating various flows)*. Moscow: Mir; 1991. 552 p. (in Russ.). ISBN 5-03-001881-8
16. Muzafarov I.F., Utyuzhnikov S.V. Application of compact difference schemes to investigation of unstationary gas flows. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations*. 1993;3:74–83 (in Russ.).
17. Gorelik G.S. *Kolebaniya i volny. Vvedenie v akustiku, radiofiziku i optiku (Oscillations and waves. Introduction to acoustics, radiophysics and optics)*. Moscow: FIZMATGIZ; 1959. 572 p. (in Russ.).
18. Krasil'nikov V.A., Krylov V.V. *Vvedenie v fizicheskuyu akustiku (Introduction to Physical Acoustics)*. Moscow: Nauka; 1984. 403 p. (in Russ.).

Об авторах

Тукмаков Дмитрий Алексеевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (402111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31). E-mail: tukmakovda@imm.knc.ru.

Тукмакова Надежда Алексеевна, к.т.н., преподаватель, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (420111, Казань, ул. К. Маркса, д. 10). E-mail: nadejdatukmakova@yandex.ru.

About the authors

Dmitry A. Tukmakov, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Researcher, FRC KazSC RAS (2/31, Lobachevskogo ul., Kazan, 402111 Russia). E-mail: tukmakovda@imm.knc.ru.

Nadezhda A. Tukmakova, Cand. Sci. (Eng.), Assistant, Kazan National Technical University KNRTU-KAI (10, K. Marksa ul., Kazan, 420111 Russia). E-mail: nadejdatukmakova@yandex.ru.

