

ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

2023, ТОМ 23, НОМЕР 3 (МАЙ–ИЮНЬ)

ISSN 2226-1494 (PRINT), 2500-0373 (ONLINE)

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Оптические свойства нелинейных кристаллов семейства боратов и их применение в источниках интенсивного терагерцового излучения
Модель чувствительного элемента рефрактивного волоконно-оптического сенсора на основе MMF-SMF-MMF структуры с использованием поверхностного плазмонного резонанса

Лубенко Д.М., Ежов Д.М., Светличный В.А.,
Андреев Ю.М., Николаев Н.А. 439
Ивойлов К.А., Гагаринова Д.О., Зыкина А.А.,
Мешиковский И.К., Плясов С.А. 448

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА

Анализ частотно-робастных многомерных динамических систем

Оморов Р.О., Акунова А., Акунов Т.А. 455

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Фрактальные микро- и нанодендриты из серебра, меди и их соединений для фотокаталитического разложения воды
Математическое моделирование трехслойного диэлектрика OTFT на основе пентаценового полупроводника для улучшения электрических характеристик (на англ. яз.)
Исследование гидратов диоксида углерода в тонких пленках методом FTIR-спектроскопии при температурах 11–180 К

Сидоров А.И., Безруков П.А., Нащекин А.В.,
Никонов Н.В. 465
Пангал Д., Ядав Р. 473
Голиков О.Ю., Ережеев Д.Е., Соколов Д.Ю. 483

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Метод повышения информационной ценности видеоданных на основе фильтрации кадров и оценки энтропии
Метод выявления групп атакующих на основании анализа полезной нагрузки сетевого трафика по протоколу HTTP
Детекция ключевых точек лица с помощью капсульных нейронных сетей

Обухов А.Д., Николюкин М.С. 493
Павлов А.В., Волошина Н.В. 500
Бойцов А.А., Волчек Д.Г., Магазенков Е.Н., Неваев М.К.,
Романов А.А. 506
Лившиц И.И. 519

Обзор национальных и международных стандартов для категорирования объектов критической информационной инфраструктуры
Критерий безопасности сетевой инфраструктуры
Новый способ сбора данных для обнаружения аномального поведения в среде Kubernetes и агент для сбора метрик с узлов (на англ. яз.)
Метод линейной аппроксимации временных параметров в эластичных системах

Шилова А.Д. 530
Дарвиш Г., Хаммуд Ж., Воробьева А.А. 538
Мартынюк И.Г., Жмылёв С.А. 547

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И КОГНИТИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Выделение ролей в сетях общественного транспорта с атрибутами узлов: исследование открытых данных Санкт-Петербурга (на англ. яз.)
Исследование тенденций взаимосвязи между профориентационными предпочтениями пользователей и его цифровыми следами в социальной сети
Обнаружение слепоты при диабетической ретинопатии с использованием алгоритма связанных компонентов на основе байесовского варианта в Keras и Tensorflow (на англ. яз.)
Совместное распознавание текста и оформления в исторических документах (на англ. яз.)
Интеллектуальная поддержка клинических решений при небольших выборках числа пациентов

Лыткин Ю.В., Чунаев П.В., Градов Т.А., Бойцов А.А.,
Саитов И.А. 553
Хлобыстова А.О., Абрамов М.В., Столярова В.Ф. 564
Ананта Бабу Ш., Мурали С., Виджаян Э., Ананд М.,
Раманатан Л. 575
Мохаммед С., Тесля Н. 585
Ватьян А.С., Голубев А.А., Гусарова Н.Ф.,
Добренко Н.В., Зубаненко А.А., Кустова Е.С.,
Татаринова А.А., Томилов И.В., Шовкопляс Г.Ф. 595

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов
Анализ устойчивости ортотропной цилиндрической оболочечной конструкции в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL
Обоснование выбора технологии мобильного широкополосного доступа для построения сетей радиосвязи железнодорожного транспорта
Сравнительный анализ производительности DVR и DSTATCOM для распределенной генерации с алгоритмом гравитационного поиска (на англ. яз.)
Оценка моментов квантованной случайной величины
Экспериментальный метод оценки динамической погрешности приборов и датчиков в условиях их эксплуатации
Метод моделирования резервуаров сжиженного природного газа типа С на основе оптимизации объема для будущей эксплуатации в режиме частичного заполнения (на англ. яз.)

Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. 608
Петров Д.С., Семенов А.А. 618
Медведев А.С., Распаев Ю.А. 628
Бхавья К., Рама Рао П.В.В., Рави Шринивас Л. 635
Ломакин М.И., Докукин А.В. 646
Грязин Д.Г., Белова О.О. 652
Иванов Л.В., Баранов А.Ю., Новицкая А.В. 659

Главный редактор — В.О. Никифоров, д.т.н., профессор

Editor-in-Chief — Vladimir O. Nikiforov, D.Sc., Professor

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Беззатеев С.В. — д.ф.-м.н., доцент (Россия)
Беликов А.В. — д.ф.-м.н., профессор (Россия)
Бессмертный И.А. — д.т.н., профессор (Россия)
Бобцов А.А. — д.т.н., профессор (Россия)
Бухановский А.В. — д.т.н. (Россия)
Волков К. Н. — д.ф.-м.н. (Великобритания)
Дукельский К.В. — д.т.н., доцент (Россия)
Ефимов Д.В. — PhD (Франция)
Заколдаев Д.А. — к.т.н., доцент (Россия)
Иорш И.В. — д.ф.-м.н. (Россия)
Кармановский Н.С. (заместитель главного редактора) — к.т.н. доцент (Россия)
Комаров И.И. — к.ф.-м.н., доцент (Россия)
Матвеев Ю.Н. — д.т.н. профессор (Россия)
Никоноров Н.В. — д.т.н., профессор (Россия)
Полищук Г.С. — к.т.н. (Россия)
Романов А.Е. — д.ф.-м.н., профессор (Россия)
Сидоркина И.Г. — д.т.н., профессор (Россия)
Степанов О.А. — д.т.н., профессор (Россия)
Татарникова Т.М. — д.т.н., доцент (Россия)
Тимофеев А. В. — д.т.н. (Казахстан)
Успенская М.В. — д.т.н., профессор (Россия)
Цыпкин А. Н. — д.ф.-м.н. (Россия)

Ответственный секретарь — И.В. Малькова

Учредитель: Университет ИТМО

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ №ФС77-67990 от 6 декабря 2016 г.).

Языки журнала: русский, английский.

ISSN 2226-1494 (print version), ISSN 2500-0373 (online version)

Англоязычное название: «Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics». Транслитерированное название: «Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologii, Mekhaniki i Optiki». Сокращенное название: «Sci.Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.»

Журнал включен в каталог периодических изданий Ulrich's Periodical Directory.

Журнал входит в крупнейшие международные реферативные и наукометрические базы Scopus, EBSCO, ProQuest, EastView, ИВИС и другие.

Журнал входит в утвержденный Высшей аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

Периодичность издания — 6 выпусков в год.

Плата за публикации и редактирование не взимается.

Редакторы: Ю.В. Михайлова, Л.Н. Точилина, Т.В. Точилина
Перевод — Н.А. Корнев
Компьютерная верстка — Е.С. Егорова

Оф. 2136, Университет ИТМО, ул. Ломоносова, д. 9,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, 191002

Телефон (812) 480 02 75
<http://ntv.ifmo.ru>
E-mail: ntvitmo@itmo.ru

Статьи Журнала доступны по лицензии Creative Commons
«Attribution-NonCommercial» 4.0 Всемирная.

EDITORIAL BOARD

Sergey V. Bezzateev — D.Sc., Associate Professor (Russia)
Andrey V. Belikov — D.Sc., Professor (Russia)
Igor A. Bessmertny — D.Sc., Professor (Russia)
Alexey A. Bobtsov — D.Sc., Professor (Russia)
Alexandr V. Boukhanovsky — D.Sc. (Russia)
Konstantin N. Volkov — D.Sc. (Great Britain)
Konstantin V. Dukelskii — D.Sc., Associate Professor (Russia)
Denis V. Efimov — PhD (France)
Danil A. Zakoldaev — PhD, Associate Professor (Russia)
Ivan V. Iorsh — D.Sc. (Russia)
Nikolai S. Karmanovskiy (Deputy Chief Editor) — PhD, Associate Professor (Russia)
Igor I. Komarov — PhD, Associate Professor (Russia)
Iuri N. Matveev — D.Sc., Professor (Russia)
Nikolay V. Nikonorov — D.Sc., Professor (Russia)
Grigori S. Polishchuk — PhD (Russia)
Alexey E. Romanov — D.Sc., Professor (Russia)
Irina G. Sidorkina — D.Sc., Professor (Russia)
Oleg A. Stepanov — D.Sc., Professor (Russia)
Tatiana M. Tatarnikova — D.Sc., Associate Professor (Russia)
Andrey V. Timofeev — Dr. habil. Sc. (Kazakhstan)
Mayya V. Uspenskaya — D.Sc., Professor (Russia)
Anton N. Tsyppkin — D.Sc., Professor (Russia)

Executive secretary — Irina V. Malkova

Founder: ITMO University

Publication is registered by the Federal Inspectorate Service for Communication, Information Technologies and Communication Media, certificate PI FS77-67 990 dated December, 6th, 2016.

Languages of the journal: Russian, English

ISSN 2226-1494 (print version), ISSN 2500-0373 (online version)

The English title is "Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics".

Transliterated title is "Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologii, Mekhaniki i Optiki".

Abbreviated parallel title: "Sci.Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt."

The journal is catalogued in Ulrich's Periodical Directory.

The journal is included in the largest international abstract and scientometric databases Scopus, EBSCO, ProQuest, East View, EVIS and others.

The journal is included in the "List of leading scientific journals and periodicals under review in the Russian Federation, where the main scientific results of theses for the PhD and doctor of sciences degree must be published" approved by the Higher Attestation Commission.

Publication frequency is 6 times a year.

Publication and editing are free of charge.

Editors: Yulia V. Mikhailova, Lyubov N. Tochilina, Tatiana V. Tochilina
English Language Technical Editor — Nikolay A. Kornev
Computer layout — Ekaterina S. Egorova

of. 2136, ITMO University, Lomonosova Street, 9,
St.Petersburg, 191002, Russia

Phone (812) 480 02 75
<http://ntv.ifmo.ru/en>
E-mail: ntvitmo@itmo.ru



Подписано к печати 01.06.2023 Тираж 350 экз. Заказ № 93 (145)

Издание Университета ИТМО

Отпечатано в ООО «Университетские телекоммуникации»
Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 16

© Университет ИТМО

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-439-447

УДК 535-14, 535.583, 535.341.08

Оптические свойства нелинейных кристаллов семейства боратов и их применение в источниках интенсивного терагерцового излучения

Дмитрий Михайлович Лубенко¹, Дмитрий Михайлович Ежов²,
Валерий Анатольевич Светличный³, Юрий Михайлович Андреев⁴,
Назар Александрович Николаев⁵✉

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 634055, Российская Федерация

^{2,3} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Российская Федерация

⁴ Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 630055, Российская Федерация

⁵ Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Российская Федерация

¹ lubenkodm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3009-762X>

² ezhov_dm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3311-5088>

³ v_svetlichnyi@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3935-0871>

⁴ yuandreev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1891-9846>

⁵ nazar@iae.nsk.su ✉, <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>

Аннотация

Введение. Для нелинейных кристаллов семейства боратов характерны высокие значения порога оптического пробоя на длинах волн ближнего инфракрасного диапазона. Как следствие, такие кристаллы являются эффективными генераторами гармоник излучения интенсивных лазерных источников. Последние исследования показали, что нелинейные кристаллы семейства боратов демонстрируют низкое поглощение излучения на субтерагерцовых частотах. Данный факт свидетельствует о возможности их применения в качестве генераторов терагерцового излучения. Выполнено сравнение источников терагерцового излучения на основе преобразования частоты излучения титан-сапфирового лазера в кристаллах бета-бората бария (β - BaB_2O_4), трибората лития (LiB_3O_5) и тетрабората лития ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$). **Метод.** Проведен расчет реализуемых типов коллинеарного трехволнового взаимодействия, обеспечивающих генерацию разностной частоты в субтерагерцовом диапазоне с учетом изученной дисперсии главных компонент терагерцового показателя преломления исследованных кристаллов. Для каждого кристалла получены условия фазового согласования и соответствующие длины когерентности. Учитывая тензоры квадратичной восприимчивости, рассчитаны коэффициенты эффективной нелинейности. Выполнены оценка и сравнение эффективности генерации терагерцового излучения в кристаллах с различным срезом. **Основные результаты.** Результаты расчетов показали, что генерация в кристалле β - BaB_2O_4 происходит эффективнее на три порядка по сравнению с кристаллом LiB_3O_5 и на пять — с $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. На титан-сапфировом усилителе экспериментально изучена генерация терагерцового излучения в образце кристалла β - BaB_2O_4 со срезом $\theta = 5^\circ$ (где θ — угол между вектором распространения излучения и главной оптической осью z кристалла), обеспечивающим фазовое согласование для частоты 0,3 ТГц. Сравнение экспериментально полученных данных с численным расчетом показало, что на генерацию излучения оказывают влияние типы взаимодействия $o - e \rightarrow e$, $e - e \rightarrow o$ и $o - o \rightarrow o$. При этом значение пиковой мощности терагерцового излучения приблизительно составляет 20 кВт. **Обсуждение.** Полученные данные будут полезны для разработки генераторов интенсивного излучения субтерагерцового диапазона, основанных на преобразовании энергии мощных лазерных источников. Полученные результаты показали, что увеличение интенсивности оптических полей до предпороговых значений для кристалла β - BaB_2O_4 позволит достичь десятков гигаватт пиковой мощности терагерцового излучения. Такие источники излучения могут найти применение в системах зондирования атмосферы и ускорителях заряженных частиц.

© Лубенко Д.М., Ежов Д.М., Светличный В.А., Андреев Ю.М., Николаев Н.А., 2023

Ключевые слова

нелинейные кристаллы, генерация терагерцевых частот, фазовый синхронизм, показатель преломления, коэффициент поглощения

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проектов государственного задания Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН), проект № 121032400052-6), Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, проект № 121031300155-8. Авторы благодарят центр коллективного пользования «Спектроскопия и Оптика» и центр коллективного пользования «ВТАН» Новосибирского государственного университета за предоставленное оборудование.

Ссылка для цитирования: Лубенко Д.М., Ежов Д.М., Светличный В.А., Андреев Ю.М., Николаев Н.А. Оптические свойства нелинейных кристаллов семейства боратов и их применение в источниках интенсивного терагерцевого излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 439–447. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-439-447

Optical properties of borate family nonlinear crystals and their application in sources of intense terahertz radiation

Dmitry M. Lubenko¹, Dmitry M. Ezhov², Valery A. Svetlichnyi³, Yury M. Andreev⁴, Nazar A. Nikolaev⁵✉

¹ Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055, Russian Federation

^{2,3} National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russian Federation

⁴ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, 630055, Russian Federation

⁵ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

¹ lubenkodm@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3009-762X>

² ezhov_dm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3311-5088>

³ v_svetlichnyi@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3935-0871>

⁴ yuandreev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1891-9846>

⁵ nazar@iae.nsk.su✉, <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>

Abstract

Nonlinear crystals of the borate family are efficient harmonic generators for intense laser sources because of their high laser-induced damage threshold at near-infrared wavelengths. Recent studies have shown that they exhibit relatively low absorption coefficients at sub-terahertz frequencies, which could enable them to generate terahertz radiation. Based on this assumption, we compare terahertz sources based on the frequency down-conversion of the radiation from a titanium-sapphire amplifier in crystals of barium beta-borate (β -BaB₂O₄), lithium triborate (LiB₃O₅), and lithium tetraborate (Li₂B₄O₇). The calculation of collinear three-wave interactions, which provide the generation of the sub-terahertz difference frequency, is carried out considering the previously studied dispersion of the main components of the terahertz refractive index of these crystals. The phase-matching conditions and the corresponding coherence lengths are determined for each of the crystals. Taking into account the quadratic susceptibility tensors, the coefficients of the effective nonlinearity are calculated, and the terahertz generation efficiency in crystals with different cuts is evaluated and compared. The down-conversion in the β -BaB₂O₄ crystal is numerically shown to be three and five orders of magnitude more efficient than in the LiB₃O₅ and Li₂B₄O₇ crystals, respectively. Thus, terahertz generation in a sample of β -BaB₂O₄ crystal with a cut that provides phase-matching for a frequency of 0.3 THz ($\theta = 5^\circ$) has been studied experimentally using radiation from a titanium-sapphire amplifier. The comparison of the experimental data and the numerical results leads to the conclusion that the main contribution to the generation process is given by the $o-e \rightarrow e$, $e-e \rightarrow o$, and $o-o \rightarrow o$ types of interaction. The peak terahertz power reaches 20 kW. The data obtained in this work will be useful for the development of intense sub-terahertz radiation sources based on the energy conversion of high-power laser sources. It is estimated that tens of GW of peak terahertz power can be achieved by increasing the intensity of the optical fields to pre-threshold values for the β -BaB₂O₄ crystal. A source of this intensity can be used in systems for sounding the atmosphere as well as in charged particle accelerators.

Keywords

nonlinear crystals, terahertz frequency generation, phase matching, refractive index, absorption coefficient

Acknowledgements

The study was carried out within the framework of the State Assignment projects of Institute of Automation and Electrometry of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences (IA&E SB RAS), project No. 121032400052-6, and Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project No. 121031300155-8. The authors express their gratitude to the Shared Equipment Center “Spectroscopy and Optics” of the IA&E SB RAS and the Shared Research Center “VTAN” of the Novosibirsk State University for the provided instrumentation support.

For citation: Lubenko D.M., Ezhov D.M., Svetlichnyi V.A., Andreev Yu.M., Nikolaev N.A. Optical properties of borate family nonlinear crystals and their application in sources of intense terahertz radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 439–447 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-439-447

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитного спектра (0,1–3 ТГц) является привлекательным с точки зрения безопасности излучения для объектов живой природы, наличием разрешенных спектров поглощения газов, жидкостей и многих твердых тел, а также сложных синтетических органических соединений. Прогресс технологий создания мощных лазерных источников видимого и ближнего инфракрасного диапазонов способствует росту интереса к нелинейно-оптическим средам, в частности к кристаллам, пригодным для преобразования энергии лазерного излучения в ТГц диапазон спектра [1]. Условно нелинейные кристаллы можно разделить на три класса: полупроводниковые (GaSe , ZnGeP_2), сегнетоэлектрические (KTiOPO_4 , LiNbO_3) и диэлектрические (LiB_3O_5 , $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$). Полупроводниковые нелинейные кристаллы несмотря на то, что имеют высокие значения нелинейных коэффициентов, обладают малым порогом оптического пробоя на уровне 10–2 ГВт/см². В связи с этим такие кристаллы являются эффективными преобразователями лазерного излучения с энергией менее сотен микроджоулей.

Сегнетоэлектрические кристаллы имеют значения лучевой стойкости до 1 ГВт/см² и являются наиболее эффективными преобразователями лазерного излучения с энергией порядка единиц миллиджоулей. Например, на сегодняшний день наиболее эффективный преобразователь излучения титан-сапфировых усилителей — кристалл LiNbO_3 . Вместе с тем стоит ожидать, что при дальнейшем росте энергии лазерного возбуждения до значений более сотен миллиджоулей сегнетоэлектрические кристаллы должны уступить первенство диэлектрическим кристаллам, порог разрушения которых может превышать десятки ГВт/см². Отметим, что при таких уровнях интенсивности лазерного возбуждения эффективным источником ТГц излучения может оказываться преобразование в газах. За счет эффекта оптического пробоя газа формируется плазменное облако, в котором осуществляется нелинейно-оптическое преобразование. Из-за нестабильности плазмы, а также сложности реализации такого подхода в полевых условиях, исследование кристаллических нелинейно-оптических материалов по-прежнему остается актуальным.

В работе проведено сравнение трех нелинейно-оптических кристаллов семейства боратов: бета-бората бария ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ или $\beta\text{-BBO}$), трибората лития (LiB_3O_5 или LBO) и тетрабората лития ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ или LB4). Преимущества данных кристаллов для нелинейно-оптических преобразований: малый коэффициент поглощения (до 10^{-5} см⁻¹) в основном окне прозрачности, высокая лучевая стойкость (до десятков ГВт/см²) и возможность фазового согласования в широкой области спектра от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов. Отработанные технологии роста боратных кристаллов позволяют изготавливать элементы параметрических генераторов с большой оптической апертурой, а последние исследования показали их относительную прозрачность в суб-ТГц и ТГц диапазонах

спектра [2, 3]. Эти особенности открывают потенциал боратных кристаллов в качестве генераторов ТГц частот, основанных на преобразовании энергии интенсивных лазерных источников.

Основное окно прозрачности для отрицательного одноосного нелинейного кристалла $\beta\text{-BBO}$, принадлежащего точечной группе симметрии $3m$, составляет 185–3500 нм. Коэффициент поглощения в окне максимальной прозрачности для лучших образцов — 10^{-3} – 10^{-4} см⁻¹ [4]. Лучевая стойкость $\beta\text{-BBO}$ достигает 50 ГВт/см² при облучении 14 нс импульсами с длиной волны 1,064 мкм [5]. Дисперсионные свойства в видимом диапазоне описаны в работе [6], а в ТГц спектре — в [7].

Нелинейный кристалл LB4 — отрицательный одноосный и относится к точечной группе симметрии $4mm$. Область максимальной прозрачности составляет 160–3500 нм, с поглощением на уровне 10^{-4} см⁻¹. LB4 обладает лучевой стойкостью до 40 ГВт/см² при воздействии наносекундными импульсами [8]. Дисперсионные свойства кристалла описаны в работе [9] для видимого диапазона, а в [10] для ТГц частот.

LBO — отрицательный двуосный нелинейный кристалл, относящийся к точечной группе симметрии $mm2$. Он обладает минимальным коэффициентом поглощения, среди известных нелинейных кристаллов. При этом коэффициент поглощения, измеренный в диапазоне длин волн 515–1064 нм, уменьшается до значения 10^{-5} см⁻¹ [11, 12]. Дисперсионные свойства в видимом диапазоне описаны в работе [13], а в ТГц — в [14]. Лучевая стойкость кристалла достигает 36 ГВт/см² на длине волны 1064 нм и длительности импульсов порядка 1 нс [15]. Известно, что у кристалла LBO изменяется неравенство значений показателей преломления с $n_x < n_y < n_z$ в оптическом диапазоне на $n_z < n_x < n_y$ в ТГц области. При условии общепринятого соответствия главных оптических и кристаллографических осей $X, Y, Z \rightarrow a, c, b$ [14].

Значения коэффициентов тензора квадратичной восприимчивости рассматриваемых кристаллов лежат в диапазоне 0,03–2,2 пм/В. Вместе с тем экстремально высокие значения лучевой стойкости предположительно позволяют компенсировать этот недостаток при условии, что спектральные области максимальной прозрачности выбранных кристаллов совпадают со спектром генерации мощных лазерных систем. Отметим, что вопрос о возможности генерации ТГц волн в некоторых из рассматриваемых кристаллах уже затрагивался ранее, например в работах [3, 16, 17]. При этом в работах [3, 16] преобразованию в нелинейные кристаллы $\beta\text{-BBO}$ было уделено мало внимания, ввиду того что его эффективность была указана как ничтожно малая.

Методы исследования и образцы

Используемые нелинейные кристаллы LBO, $\beta\text{-BBO}$ и LB4 выращены в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН. Образцы представляют плоскопараллельные пластины нескольких толщин (0,35–2 мм) с апертурой диаметром около 1 см, полированные до высокого оптического

качества. Дисперсия показателя преломления и коэффициент поглощения образцов измерены с помощью поляризационного импульсного ТГц спектрометра [18]. На основе ранее проведенных измерений дисперсия главных компонент показателя преломления кристаллов аппроксимирована в форме уравнений Зельмеера, которые использованы для расчета кривых фазового согласования процесса генерации разностных частот (ГРЧ) в ТГц спектре интенсивных источников лазерного излучения с длинами волн в окрестности 0,8–1 мкм.

Коэффициенты сокращенного тензора квадратичной восприимчивости d_{ij} исследуемых нелинейных кристаллов определим согласно работе [19]. Полученные результаты представлены в табл. 1–3. Для оценки эффективности генерации рассчитаем коэффициент качества (figure of merit, FOM) для каждого из кристаллов:

$$FOM = \frac{d_{\text{эфф}}^2}{n_3 n_2 n_1},$$

где n_i — показатель преломления для соответствующей волны, при этом $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ (λ_1 — результирующая

длина волны, соответствующая ТГц спектральному диапазону); $d_{\text{эфф}}$ — эффективная нелинейность, которая в общем случае зависит от направления распространения волн в среде и участвующих во взаимодействии коэффициентов d_{ij} .

Значения d_{ij} в видимом и ТГц диапазонах должны отличаться, однако данные для ТГц частот в известных научных работах отсутствуют. В связи с этим для оценочных расчетов используем известные значения коэффициентов для видимого диапазона: β -BBO ($d_{15} = -0,04$ пм/В, $d_{22} = 2,2$ пм/В, $d_{31} = -0,04$ пм/В, $d_{33} = 0,04$ пм/В) [20]; LBO ($d_{15} = -0,67$ пм/В, $d_{24} = 0,85$ пм/В, $d_{31} = -0,67$ пм/В, $d_{32} = 0,85$ пм/В, $d_{33} = 0,04$ пм/В) [21]; LB4 ($d_{15} = 0,12$ пм/В, $d_{31} = 0,12$ пм/В, $d_{33} = 0,47$ пм/В) [22]. В табл. 1, 2 и 3 представлены $d_{\text{эфф}}$ для возможных типов нелинейного взаимодействия трех волн $\lambda_3 - \lambda_2 \rightarrow \lambda_1$, которые в зависимости от типа преобразования обозначаются как обыкновенная o и необыкновенная e в случае одноосных кристаллов, или быстрая f или медленная s в случае двухосных кристаллов, где θ — угол между направлением распространения излучения и главной

Таблица 1. Коэффициент $d_{\text{эфф}}$ для кристалла β -BBO

Table 1. Form of d_{eff} coefficient for β -BBO crystal

Тип взаимодействия	Вид выражения $d_{\text{эфф}}$
$o - e \rightarrow e, e - o \rightarrow e, e - e \rightarrow o$	$d_{22}\cos\theta\cos3\varphi$
$o - e \rightarrow o, e - o \rightarrow o$	$d_{15}\sin\theta - d_{22}\cos\theta\sin3\varphi$
$o - o \rightarrow e$	$d_{31}\sin\theta - d_{22}\cos\theta\sin3\varphi$
$o - o \rightarrow o$	$-d_{22}\cos3\varphi$
$e - e \rightarrow e$	$d_{15}\sin2\theta\cos\theta + d_{22}\cos^3\theta\sin3\varphi + d_{31}\cos^2\theta\sin\theta + d_{33}\sin^3\theta$

Таблица 2. Коэффициент $d_{\text{эфф}}$ для кристалла LBO

Table 2. Form of d_{eff} coefficient for LBO crystal

Тип взаимодействия	Плоскость кристалла			
	XY	YZ	$XZ (\theta < V_Z, \delta = \pi/2)$	$XZ (\theta > V_Z, \delta = 0)$
$s - s \rightarrow s$	0	$d_{33}\cos^3\theta + d_{32}\sin2\theta\cos\theta + d_{24}\sin\theta\sin2\theta$	d_{33}	0
$s - s \rightarrow f,$ $s - f \rightarrow s,$ $f - s \rightarrow s$	$d_{32}\cos\varphi$	0	0	$d_{31}\cos^2\theta + d_{32}\sin^2\theta$
$s - f \rightarrow f,$ $f - s \rightarrow f,$ $f - f \rightarrow s$	0	$d_{31}\cos\theta$	$d_{31}\cos^2\theta + d_{32}\sin^2\theta$	0
$f - f \rightarrow f$	$d_{33}\cos^3\varphi + d_{31}\sin^2\varphi\cos\varphi + d_{15}\sin\varphi\sin2\varphi$	0	0	d_{33}

Таблица 3. Коэффициент $d_{\text{эфф}}$ для кристалла LB4

Table 3. Form of d_{eff} coefficient for LB4 crystal

Тип взаимодействия	Вид выражения $d_{\text{эфф}}$
$o - o \rightarrow o, o - e \rightarrow e, e - o \rightarrow e, e - e \rightarrow o$	0
$o - o \rightarrow e, e - o \rightarrow o$	$d_{31}\sin\theta$
$o - e \rightarrow o$	$d_{15}\sin\theta$
$e - e \rightarrow e$	$(2d_{15} + d_{31})\cos^2\theta\sin\theta + d_{33}\sin^3\theta$

оптической осью Z кристалла, φ — угол между проекцией направления распространения излучения на главную плоскость XY и главной оптической осью X кристалла, V_Z — угол между неглавной оптической осью и осью Z кристалла.

Основные результаты исследования

Измеренные на импульсном ТГц спектрометре коэффициенты поглощения главных оптических осей кристаллов, с наибольшими потерями, представлены на рис. 1, где α_o — коэффициент поглощения для необыкновенной волны, α_x — коэффициент поглощения излучения для случая совпадения поляризации волны с направлением оси X кристалла. Исходя из полученных результатов видно, что наименьшее поглощение ТГц волн при преобразовании следует ожидать в кристалле β -BBO.

Расчеты с использованием уравнений из работ [7, 10, 14] показали наличие фазового согласования для генерации частот в диапазоне 0,1–1,2 ТГц во всех исследуемых кристаллах. В табл. 4 представлены диапазоны углов синхронизма для данного диапазона, и рассчитанные для частоты 0,3 ТГц значения параметра качества (FOM).

Частота 0,3 ТГц выбрана как попадающая в локальное окно прозрачности атмосферы и перспективная, например, для решения задач телекоммуникации на километровых трассах в открытом пространстве или мониторинга малых газовых компонент приземного слоя атмосферы.

Из полученных результатов (табл. 4) видно, что наименьшими углами синхронизма θ обладают одноосные кристаллы β -BBO и LB4. Меньшие углы θ , с одной стороны, обеспечивают малый угол сноса, и, как следствие, позволяют использовать образцы с большей толщиной для достижения значительной эффективности преобразования. С другой стороны, как в случае с кристаллом LB4 — малые углы θ могут приводить к вырождению коэффициента эффективной нелинейной восприимчивости, поскольку он пропорционален $\sin\theta$. Таким образом, исходя из критерия наименьшего поглощения, наименьшего угла синхронизма и максимального значения FOM, кристалл β -BBO является наиболее эффективным генератором ТГц излучения среди исследуемых кристаллов.

Рассчитаем спектры процессов ГРЧ и оптического выпрямления при преобразовании частоты излучения лазера с длиной волны 800 нм (рис. 2). Оценку ин-

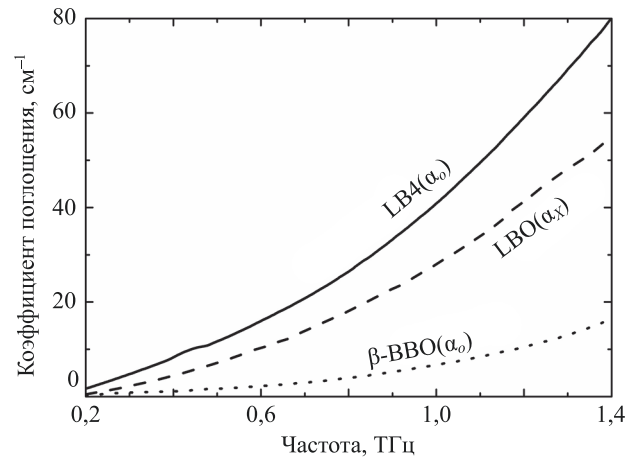


Рис. 1. Измеренный коэффициент поглощения одной из главных оптических осей с наибольшими потерями для исследуемых кристаллов

Fig. 1. Measured absorption coefficient of the principal optical axis with the highest losses for the crystals under study

тенсивности ТГц излучения $I_{\text{ТГц}}$ выполним согласно упрощенному выражению для оценки эффективности генерации с неистощаемой накачкой [23]. Расчеты осуществим для каждого из возможных типов нелинейно-оптического преобразования, обладающих соответствующим значением коэффициента $d_{\text{эфф}}(\theta, \varphi)$, при разных толщинах кристаллов $L_{\text{крист}}$:

$$I_{\text{ТГц}} \propto \frac{8\pi^2 d_{\text{эфф}}^2 L_{\text{эфф}}^2 I_{\text{накачки}}^2}{\epsilon_0 n_3 n_2 n_1 c \lambda_1^2} \exp(-\alpha_1 L_{\text{эфф}}),$$

$$L_{\text{эфф}} = \begin{cases} L_{\text{ког}}, & L_{\text{крист}} > L_{\text{ког}} \\ L_{\text{крист}}, & L_{\text{крист}} < L_{\text{ког}} \end{cases},$$

$$L_{\text{ког}} = \left| \frac{\pi}{k_3(\lambda_3, n_3) - k_2(\lambda_2, n_2) - k_1(\lambda_1, n_1)} \right|,$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная; c — скорость света; $k_i = 2\pi n_i / \lambda_i$ — волновой вектор; α_1 — коэффициент поглощения ТГц волны. Значение нижних индексов: «крист» — параметр, относящийся к кристаллу; «ТГц» — параметр, относящийся к результирующей ТГц волне; «эфф» — эффективный параметр; «накачки» — параметр, относящийся к возбуждающему излучению на длине волны 800 нм; «ког» — параметр когерентности. В данном упрощении эффективная длина нелинейного взаимодействия $L_{\text{эфф}}$ ограничена длиной когерентности $L_{\text{ког}}$ соответствующего типа взаимодействия или длиной кристалла.

Таблица 4. Углы фазового согласования в боратных кристаллах для генерации разностных частот в терагерцовой области при преобразовании частот излучения с длиной волны 800 нм

Table 4. Phase-matching angles of borate crystals for DFG in THz range when converting the frequencies of the radiation with a wavelength of 800 nm

Кристалл	Тип взаимодействия	θ , град.	φ , град.	FOM (0,3 ТГц), $\text{пм}^2/\text{В}^2$
β -BBO	$o - e \rightarrow e$	3–13	0	0,7
β -BBO	$o - e \rightarrow o$	3–13	30	0,7
LBO	$s - f \rightarrow s$ (XZ , $\theta < V_Z$)	30–37	0	0,01
LB4	$o - e \rightarrow o$	4–17	—	0,00005

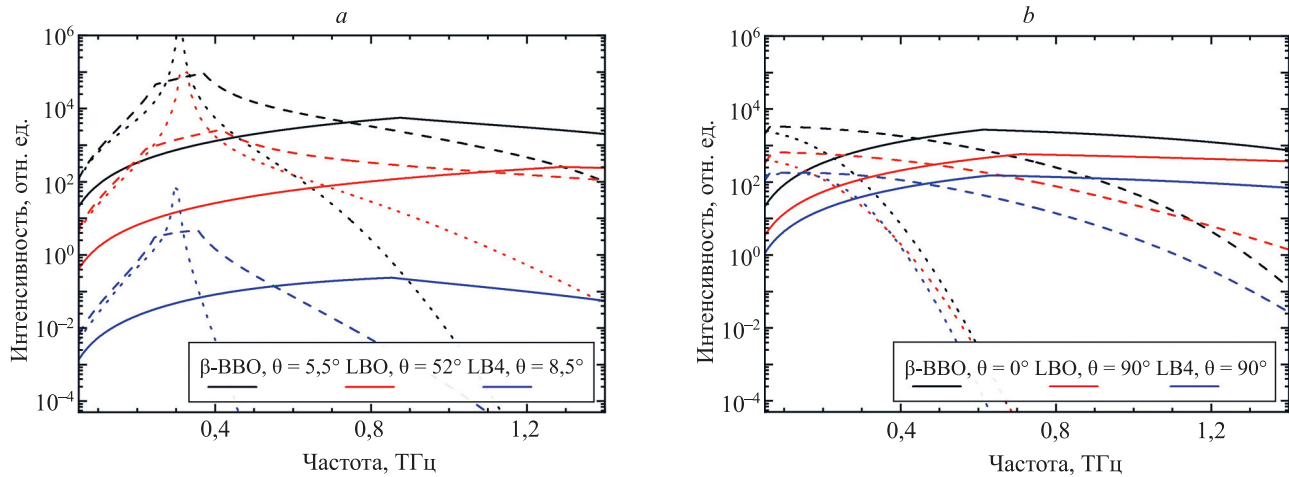


Рис. 2. Эффективность генерации терагерцового излучения в боратных кристаллах разной толщины при преобразовании частот лазерного излучения с длиной волны 800 нм. Спектры генерации при выполнении условий фазового согласования (а) и при оптическом выпрямлении в ортогональных срезах кристаллов (b).

Сплошные кривые — толщина кристалла 0,2 мм; штриховые — 2 мм; пунктирные — 20 мм

Fig. 2. Terahertz radiation generation efficiency in borate crystals of various thicknesses during frequency conversion of 800 nm laser radiation. Spectra generated under phase-matching conditions (a) and optical rectification in orthogonal crystal cuts (b).

Solid curves — crystal thickness 0.2 mm; dashed lines — 2 mm; dotted — 20 mm

Поглощение учтено только для результирующей (ТГц) волны на эффективной длине кристалла. Интенсивность накачки $I_{\text{накачки}}$ принята равной 1 ТВт/см².

На рис. 2, а видно, что с увеличением длины кристалла на модельных спектрах генерации проявляется фазо-согласованное преобразование типа $o-e \rightarrow e$ для кристаллов β -BBO и LBO и $o-e \rightarrow o$ — для LB4 с пиком в окрестности 0,3 ТГц (желаемая частота задается выбором соответствующих углов θ , ϕ). Также заметно, что при увеличении толщины кристалла вырастают потери в коротковолновой части спектра. При этом можно предположить, что интенсивность при оптическом выпрямлении будет выше, чем интенсивность при ГРЧ с выполнением условий фазового согласования. Данное предположение видно при сравнении спектров генерации в кристалле LB4: вырезанном для фазового согласования при $\theta = 8,5^\circ$ (рис. 2, а), и для оптического выпрямления при $\theta = 90^\circ$ (рис. 2, b). Отметим, что при уменьшении длительности импульса от наносекунд к фемтосекундам — возрастает порог лучевой стойкости нелинейных кристаллов вследствие смены теплового механизма пробоя на полевой, это позволяет увеличить интенсивность лазерного излучения, а следовательно, и эффективность преобразования. Кроме того, фемтосекундные импульсы обладают достаточной спектральной шириной, чтобы в результате взаимодействия отдельных частотных ее компонент, происходила генерация широкого разностного спектра.

Результаты, полученные на рис. 2, подтвердили предположение о перспективности применения кристалла β -BBO для разработки генераторов ТГц излучения. На данном кристалле проведем предварительные эксперименты по преобразованию излучения титан-сапфирового усилителя (центральная длина волны — 950 нм, длительность импульса — 60 фс, частота повторения — 10 Гц, энергия в импульсе — 20 мДж).

Выберем срез кристалла $\theta = 5^\circ$, $\phi = 0^\circ$, который должен обеспечить фазовое согласование для генерации разностной частоты в окрестности 0,3 ТГц. Азимутальным вращением образца кристалла получена реализация различных типов взаимодействий, поскольку проекция вектора поляризации лазерного излучения на оси кристалла при вращении воспринималась кристаллом как компоненты обыкновенной или необыкновенной волн. Регистрация ТГц излучения осуществлена с помощью программно-аппаратного комплекса на основе ячейки Голя Tydex GC-1P (Tydex, Россия). Спектр генерации при такой постановке эксперимента определить затруднительно, так как детектируется интегральная мощность излучения. Детектор откалиброван для измерения энергии непрерывного излучения, модулированного со скважностью 50 %. Примем, что излучение представляет собой кратковременные импульсы длительностью около 2 пс и следуют с частотой 10 Гц. Пересчитаем показания детектора в соответствии с калибровочной вольт-ваттной шкалой. При заданных параметрах генерации учтем ослабление светофильтров, отсекающих лазерное излучение, спектры пропускания которых были предварительно измерены на импульсном ТГц спектрометре. Оценки показали, что регистрируемый детектором сигнал соответствует уровню 20 кВт пиковой мощности. Результаты расчетов и их сравнение с экспериментальными данными представлены на рис. 3.

В результате сопоставления диаграмм экспериментально полученной зависимости интенсивности ТГц излучения с численным расчетом (рис. 3, b), сделаем вывод, что основной вклад в оптико-терагерцовое преобразование дают типы взаимодействий $o-e \rightarrow e$, $e-e \rightarrow o$ и $o-o \rightarrow o$. При этом кривые двух последних взаимодействий имеют высокую точность. Значения интенсивностей, соответствующие углам $45^\circ + n \times 90^\circ$ (где n — целое число), соответствуют ГРЧ в условиях

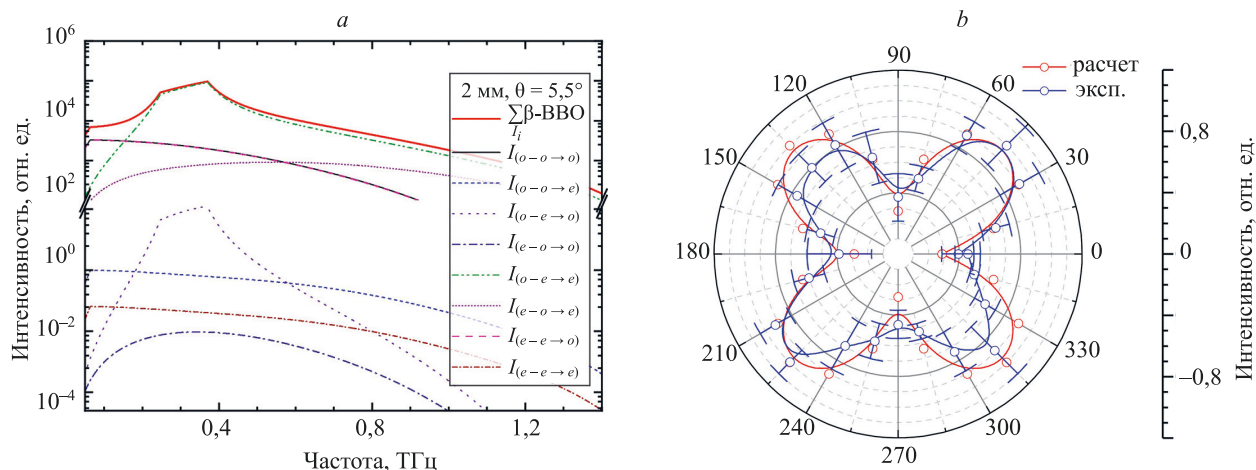


Рис. 3. Генерация терагерцового излучения в образце кристалла $\beta\text{-BBO}$ со срезом $\theta = 5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ при преобразовании частот излучения титан-сапфирового усилителя.

Расчетные спектры генерации для различных типов взаимодействия и их сумма (красная кривая) (a); экспериментально измеренная зависимость интенсивности терагерцового излучения от азимутального угла поворота кристалла (синяя кривая); теоретическая оценка интенсивности, полученная интегрированием площади под кривой суммарного расчетного спектра генерации (b)

Fig. 3. Generation of terahertz radiation in a $\beta\text{-BBO}$ crystal sample with a cut: $\theta = 5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ upon frequency conversion of radiation from a titanium-sapphire amplifier.

Calculated generation spectra for different types of interaction and their sum (red curve) (a); experimentally measured dependence of the terahertz radiation intensity on the azimuth angle of the crystal rotation (blue curve); theoretical intensity estimate obtained by integrating the area under the curve of the total calculated generation spectrum (b)

фазового согласования для взаимодействия $o - e \rightarrow e$. При углах $0^\circ + n \times 90^\circ$ — ГРЧ в условиях фазовой расстройки (либо оптическом выпрямлении) для взаимодействий $e - e \rightarrow o$ и $o - o \rightarrow o$ соответственно. Полученные результаты показали, что определяющим эффективностью генерации ТГц излучения является коэффициент тензора квадратичной восприимчивости d_{22} , что противоречит данным, приведенным в работе [16], где полагается, что d_{22} обращается в ноль при оптико-терагерцовых преобразованиях.

Масштабируя полученные данные, можно предположить, что при использовании оптических элементов с большой апертурой, изготовленных из кристалла $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, и тераваттных лазерных систем подобно THL-100 [24], возможно получить пиковую мощность ТГц излучения в десятки гигаватт при увеличении интенсивности оптических полей до предпороговых значений для кристалла.

Заключение

В работе проведено сравнение источников терагерцового излучения на основе преобразования энергии излучения титан-сапфирового усилителя в трех распространенных кристаллах семейства боратов $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, LiB_3O_5 и $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Для каждого кристалла выполнен расчет реализуемых типов коллинеарного трехволнового взаимодействия, обеспечивающих генерацию

разностной частоты в субтерагерцовом диапазоне, и получены условия фазового согласования и соответствующие длины когерентности. Показано, что для генерации в диапазоне 0,1–1,2 ТГц подойдут срезы кристаллов со следующими значениями угла θ : 1–13° для $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$, 30–37° для LiB_3O_5 и 4–17° для $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Учитывая тензоры квадратичной восприимчивости, численно показано, что генерация в кристалле $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ на три и пять порядков эффективнее, чем в кристаллах LiB_3O_5 и $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ соответственно, что определило выбор данного кристалла для дальнейшего экспериментального исследования.

С использованием излучения титан-сапфирового усилителя (с параметрами: 950 нм, 60 фс, 10 Гц, 20 мДж) экспериментально изучена генерация терагерцовых волн в образце кристалла $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ со срезом $\theta = 5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, обеспечивающим фазовое согласование для частоты 0,3 ТГц. Сравнение экспериментально полученных данных с численным расчетом позволило сделать вывод о том, что основной вклад в генерацию дают типы взаимодействия $o - e \rightarrow e$, $e - e \rightarrow o$ и $o - o \rightarrow o$. При этом значение пиковой мощности терагерцового излучения достигает 20 кВт. Предположительно, применение элементов из $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ с апертурой до сотни миллиметров на тераваттных лазерных установках позволит достигнуть значения пиковой мощности ТГц излучения в десятки гигаватт. Такие источники актуальны для развития физики экстремальных полей ультракоротких длительностей.

Литература

References

- Wu X., Carbajo S., Ravi K., Ahr F., Cirmi G., Zhou Y., Mücke O.D., Kärtner F.X. Terahertz generation in lithium niobate driven by Ti:sapphire laser pulses and its limitations // *Optics Letters*. 2014. V. 39. N 18. P. 5403–5406. <https://doi.org/10.1364/ol.39.005403>
- Antsygin V.D., Mamrashev A.A., Nikolaev N.A., Potaturkin O.I., Bekker T.B., Solntsev V.P. Optical properties of borate crystals in terahertz region // *Optics Communications*. 2013. V. 309. P. 333–337. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.08.014>
- Bernernd C., Segonds P., Debray J., Roux J.-F., Hérault E., Coutaz J.-L., Shoji I., Minamide H., Ito H., Lupinski D., Zawilski K., Schunemann P., Zhang X., Wang J., Hu Z., Boulanger B. Evaluation of eight nonlinear crystals for phase-matched Terahertz second-order difference-frequency generation at room temperature // *Optical Materials Express*. 2020. V. 10. N 2. P. 561–576. <https://doi.org/10.1364/ome.383548>
- Chen C., Sasaki T., Li R., Wu Y., Lin Z., Mori Y., Hu Z., Wang J., Aka G., Masashi Y., Kaneda Y. *Nonlinear Optical Borate Crystals: Principles and Applications*. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. 406 p.
- Nakatani H., Bosenberg W.R., Cheng L.K., Tang C.L. Laser-induced damage in beta-barium metaborate // *Applied Physics Letters*. 1988. V. 53. N 26. P. 2587–2589. <https://doi.org/10.1063/1.100535>
- Eimerl D., Davis L., Velsko S., Graham E.K., Zalkin A. Optical, mechanical, and thermal properties of barium borate // *Journal of Applied Physics*. 1987. V. 62. N 5. P. 1968–1983. <https://doi.org/10.1063/1.339536>
- Ezhov D.M., Lubenko D.M., Andreev Y.M. Doubling of THz radiation frequency in nonlinear borate crystals // *Russian Physics Journal*. 2021. V. 64. N 7. P. 1358–1362. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02461-9>
- Komatsu R., Sugawara T., Sassa K., Sarukura N., Liu Z., Izumida S., Segawa Y., Uda S., Fukuda T., Yamanouchi K. Growth and ultraviolet application of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ crystals: Generation of the fourth and fifth harmonics of $\text{Nd}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ lasers // *Applied Physics Letters*. 1997. V. 70. N 26. P. 3492–3494. <https://doi.org/10.1063/1.119210>
- Umemura N., Watanabe J., Matsuda D., Kamimura T. Refined Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2017. V. 56. N 3. P. 032602. <https://doi.org/10.7567/jjap.56.032602>
- Ezhov D., Turgeneva S., Nikolaev N., Mamrashev A., Mikerin S., Minakov F., Simanchuk A., Antsygin V., Svetlichnyi V., Losev V., Andreev Y. Potential of sub-THz-wave generation in $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ nonlinear crystal at room and cryogenic temperatures // *Crystals*. 2021. V. 11. N 11. P. 1321. <https://doi.org/10.3390/cryst11111321>
- Waasem N., Fieberg S., Hauser J., Gomes G., Haertle D., Kühnemann F., Buse K. Photoacoustic absorption spectrometer for highly transparent dielectrics with parts-per-million sensitivity // *Review of Scientific Instruments*. 2013. V. 84. N 2. P. 023109. <https://doi.org/10.1063/1.4792724>
- Röcker C., Weinert P., Villevall P., Lupinski D., Delaigue M., Hönninger C., Weber R., Graf T., Ahmed M.A. Nonlinear absorption in lithium triborate frequency converters for high-power ultrafast lasers // *Optics Express*. 2022. V. 30. N 4. P. 5423–5438. <https://doi.org/10.1364/oe.447255>
- Kato K. Temperature-tuned 90° phase matching properties of LiB_3O_5 // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1994. V. 30. N 12. P. 2950–2952. <https://doi.org/10.1109/3.362711>
- Andreev Y.M., Kokh A.E., Kokh K.A., Lanskii G.V., Litvinenko K., Mamrashev A.A., Molloy J.F., Murdin B., Naftaly M., Nikolaev N.A., Svetlichnyi V.A. Observation of a different birefringence order at optical and THz frequencies in LBO crystal // *Optical Materials*. 2017. V. 66. P. 94–97. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.01.031>
- Yoshida H., Fujita H., Nakatsuka M., Yoshimura M., Sasaki T., Kamimura T., Yoshida K. Dependences of laser-induced bulk damage threshold and crack patterns in several nonlinear crystals on irradiation direction // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2006. V. 45. N 2A. P. 766–769. <https://doi.org/10.1143/jjap.45.766>
- Zhang Y., Zheng Y., Xu S., Liu W. Empirical study of nonlinearity tensor dominating THz generation in barium borate crystal through optical rectification // *Applied Physics B*. 2011. V. 103. N 4. P. 831–835. <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4415-5>
- Andreev Y.M., Naftaly M., Molloy J.F., Kokh A.E., Lanskii G.V., Svetlichnyi V.A., Losev V.F., Kononova N.G., Kokh K.A. LBO: optical properties and potential for THz application // *Laser Physics*
- Wu X., Carbajo S., Ravi K., Ahr F., Cirmi G., Zhou Y., Mücke O.D., Kärtner F.X. Terahertz generation in lithium niobate driven by Ti:sapphire laser pulses and its limitations. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 18, pp. 5403–5406. <https://doi.org/10.1364/ol.39.005403>
- Antsygin V.D., Mamrashev A.A., Nikolaev N.A., Potaturkin O.I., Bekker T.B., Solntsev V.P. Optical properties of borate crystals in terahertz region. *Optics Communications*, 2013, vol. 309, pp. 333–337. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.08.014>
- Bernernd C., Segonds P., Debray J., Roux J.-F., Hérault E., Coutaz J.-L., Shoji I., Minamide H., Ito H., Lupinski D., Zawilski K., Schunemann P., Zhang X., Wang J., Hu Z., Boulanger B. Evaluation of eight nonlinear crystals for phase-matched Terahertz second-order difference-frequency generation at room temperature. *Optical Materials Express*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 561–576. <https://doi.org/10.1364/ome.383548>
- Chen C., Sasaki T., Li R., Wu Y., Lin Z., Mori Y., Hu Z., Wang J., Aka G., Masashi Y., Kaneda Y. *Nonlinear Optical Borate Crystals: Principles and Applications*. Germany, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012, 406 p.
- Nakatani H., Bosenberg W.R., Cheng L.K., Tang C.L. Laser-induced damage in beta-barium metaborate. *Applied Physics Letters*, 1988, vol. 53, no. 26, pp. 2587–2589. <https://doi.org/10.1063/1.100535>
- Eimerl D., Davis L., Velsko S., Graham E.K., Zalkin A. Optical, mechanical, and thermal properties of barium borate. *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 62, no. 5, pp. 1968–1983. <https://doi.org/10.1063/1.339536>
- Ezhov D.M., Lubenko D.M., Andreev Y.M. Doubling of THz radiation frequency in nonlinear borate crystals. *Russian Physics Journal*, 2021, vol. 64, no. 7, pp. 1358–1362. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02461-9>
- Komatsu R., Sugawara T., Sassa K., Sarukura N., Liu Z., Izumida S., Segawa Y., Uda S., Fukuda T., Yamanouchi K. Growth and ultraviolet application of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ crystals: Generation of the fourth and fifth harmonics of $\text{Nd}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ lasers. *Applied Physics Letters*, 1997, vol. 70, no. 26, pp. 3492–3494. <https://doi.org/10.1063/1.119210>
- Umemura N., Watanabe J., Matsuda D., Kamimura T. Refined Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 032602. <https://doi.org/10.7567/jjap.56.032602>
- Ezhov D., Turgeneva S., Nikolaev N., Mamrashev A., Mikerin S., Minakov F., Simanchuk A., Antsygin V., Svetlichnyi V., Losev V., Andreev Y. Potential of sub-THz-wave generation in $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ nonlinear crystal at room and cryogenic temperatures. *Crystals*, 2021, vol. 11, no. 11, pp. 1321. <https://doi.org/10.3390/cryst11111321>
- Waasem N., Fieberg S., Hauser J., Gomes G., Haertle D., Kühnemann F., Buse K. Photoacoustic absorption spectrometer for highly transparent dielectrics with parts-per-million sensitivity. *Review of Scientific Instruments*, 2013, vol. 84, no. 2, pp. 023109. <https://doi.org/10.1063/1.4792724>
- Röcker C., Weinert P., Villevall P., Lupinski D., Delaigue M., Hönninger C., Weber R., Graf T., Ahmed M.A. Nonlinear absorption in lithium triborate frequency converters for high-power ultrafast lasers. *Optics Express*, 2022, vol. 30, no. 4, pp. 5423–5438. <https://doi.org/10.1364/oe.447255>
- Kato K. Temperature-tuned 90° phase matching properties of LiB_3O_5 . *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, vol. 30, no. 12, pp. 2950–2952. <https://doi.org/10.1109/3.362711>
- Andreev Y.M., Kokh A.E., Kokh K.A., Lanskii G.V., Litvinenko K., Mamrashev A.A., Molloy J.F., Murdin B., Naftaly M., Nikolaev N.A., Svetlichnyi V.A. Observation of a different birefringence order at optical and THz frequencies in LBO crystal. *Optical Materials*, 2017, vol. 66, pp. 94–97. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.01.031>
- Yoshida H., Fujita H., Nakatsuka M., Yoshimura M., Sasaki T., Kamimura T., Yoshida K. Dependences of laser-induced bulk damage threshold and crack patterns in several nonlinear crystals on irradiation direction. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 45, no. 2A, pp. 766–769. <https://doi.org/10.1143/jjap.45.766>
- Zhang Y., Zheng Y., Xu S., Liu W. Empirical study of nonlinearity tensor dominating THz generation in barium borate crystal through optical rectification. *Applied Physics B*, 2011, vol. 103, no. 4, pp. 831–835. <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4415-5>
- Andreev Y.M., Naftaly M., Molloy J.F., Kokh A.E., Lanskii G.V., Svetlichnyi V.A., Losev V.F., Kononova N.G., Kokh K.A. LBO: optical properties and potential for THz application. *Laser Physics*

- Letters. 2015. V. 12. N 11. P. 115402. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/12/11/115402>
18. Wang C.-R., Pan Q.-K., Chen F., Lanski G., Nikolaev N., Mamrashev A., Andreev Y., Meshalkin A. Phase-matching in KTP crystal for THz wave generation at room temperature and 81 K // *Infrared Physics & Technology*. 2019. V. 97. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.12.012>
 19. Midwinter J.E., Warner J. The effects of phase matching method and of uniaxial crystal symmetry on the polar distribution of second-order non-linear optical polarization // *British Journal of Applied Physics*. 1965. V. 16. N 8. P. 1135–1142. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/16/8/312>
 20. Shoji I., Nakamura H., Ohdaira K., Kondo T., Ito R., Okamoto T., Tatsuki K., Kubota S. Absolute measurement of second-order nonlinear-optical coefficients of β -BaB₂O₄ for visible to ultraviolet second-harmonic wavelengths // *Journal of the Optical Society of America B*. 1999. V. 16. N 4. P. 620–624. <https://doi.org/10.1364/josab.16.000620>
 21. Roberts D.A. Simplified characterization of uniaxial and biaxial nonlinear optical crystals: a plea for standardization of nomenclature and conventions // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1992. V. 28. N 10. P. 2057–2074. <https://doi.org/10.1109/3.159516>
 22. Petrov V., Rotermund F., Noack F., Komatsu R., Sugawara T., Uda S. Vacuum ultraviolet application of Li₂B₄O₇ crystals: Generation of 100 fs pulses down to 170 nm // *Journal of Applied Physics*. 1998. V. 84. N 11. P. 5887–5892. <https://doi.org/10.1063/1.368904>
 23. Sutherland R.L. Handbook of Nonlinear Optics. CRC Press, 2003. 976 p. <https://doi.org/10.1201/9780203912539>
 24. Alekseev S.V., Ivanov N.G., Losev V.F., Mesyats G.A., Mikheev L.D., Ratakhin N.A., Panchenko Y.N. THL-100 multi-terawatt laser system of visible spectrum range // *Optics Communications*. 2020. V. 455. P. 124386. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124386>

Авторы

Лубенко Дмитрий Михайлович — младший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 634055, Российская Федерация, [sc 55642871000](https://orcid.org/0000-0002-3009-762X), <https://orcid.org/0000-0002-3009-762X>, lubenkodm@gmail.com

Ежов Дмитрий Михайлович — младший научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 57195325727](https://orcid.org/0000-0002-3311-5088), <https://orcid.org/0000-0002-3311-5088>, ezhov_dm@mail.ru

Светличный Валерий Анатольевич — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 35514642000](https://orcid.org/0000-0002-3935-0871), <https://orcid.org/0000-0002-3935-0871>, v_svetlichnyi@bk.ru

Андреев Юрий Михайлович — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 630055, Российская Федерация, [sc 55411777300](https://orcid.org/0000-0002-1891-9846), <https://orcid.org/0000-0002-1891-9846>, yuandreev@yandex.ru

Николаев Назар Александрович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Российская Федерация, [sc 56363884600](https://orcid.org/0000-0002-7106-3100), <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>, nazar@iae.nsk.su

Authors

Dmitry M. Lubenko — Junior Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055, Russian Federation, [sc 55642871000](https://orcid.org/0000-0002-3009-762X), <https://orcid.org/0000-0002-3009-762X>, lubenkodm@gmail.com

Dmitry M. Ezhov — Junior Researcher, National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 57195325727](https://orcid.org/0000-0002-3311-5088), <https://orcid.org/0000-0002-3311-5088>, ezhov_dm@mail.ru

Valery A. Svetlichnyi — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Head of Laboratory, National Research Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 35514642000](https://orcid.org/0000-0002-3935-0871), <https://orcid.org/0000-0002-3935-0871>, v_svetlichnyi@bk.ru

Yury M. Andreev — D.Sc. (Physics & Mathematics), Chief Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, 630055, Russian Federation, [sc 55411777300](https://orcid.org/0000-0002-1891-9846), <https://orcid.org/0000-0002-1891-9846>, yuandreev@yandex.ru

Nazar A. Nikolaev — PhD, Senior Researcher, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, [sc 56363884600](https://orcid.org/0000-0002-7106-3100), <https://orcid.org/0000-0002-7106-3100>, nazar@iae.nsk.su

Статья поступила в редакцию 20.07.2022
Одобрена после рецензирования 11.03.2023
Принята к печати 23.05.2023

Received 20.07.2022
Approved after reviewing 11.03.2023
Accepted 23.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-448-454

УДК 515.321.9

Модель чувствительного элемента рефрактивного волоконно-оптического сенсора на основе MMF-SMF-MMF структуры с использованием поверхностного плазмонного резонанса

Кирилл Антонович Ивойлов^{1✉}, Диана Олеговна Гагаринова², Аделия Алексеевна Зыкина³,
Игорь Касьянович Мешковский⁴, Семён Алексеевич Плясцов⁵

^{1,2,3,4,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ kirivoilov@yandex.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-8251-7625>

² dogagarinova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1320-6553>

³ adeliya.zykina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>

⁴ igorkm@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

⁵ plyastsov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>

Аннотация

Введение. Представлена математическая модель чувствительного элемента рефрактометрического волоконно-оптического датчика, принцип действия которого основан на явлении поверхностного плазмонного резонанса. Конструкция чувствительного элемента представляет собой последовательное соединение многомодового (MMF), одномодового (SMF) и многомодового волокон, образующих MMF-SMF-MMF структуру. SMF-участок покрыт тонкой пленкой золота. **Метод.** Для моделирования элемента применен подход, используемый при расчете классической конфигурации Кречмана для объемных оптических структур. Показатель преломления волокна рассчитан на основе уравнения Селлмейера, а показатель преломления золота определен с использованием модели Друдэ. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментально полученными спектрами пропускания изготовленных образцов чувствительных элементов. **Основные результаты.** Для апробации модели изготовлены чувствительные элементы волоконно-оптических датчиков со следующими параметрами: диаметры сердцевин многомодового волокна 62,5 мкм, одномодового волокна — 9 мкм, покрытие SMF-участка пленкой из золота толщиной 50 нм. Получены спектры пропускания чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков в водных растворах глюкозы различной концентрации. Продemonстрировано, что предложенная модель хорошо описывает полученные в результате экспериментов спектры пропускания чувствительных элементов на основе MMF-SMF-MMF структур в области поверхностного плазмонного резонанса. **Обсуждение.** Разработанная модель может найти применение при оптимизации конструкции чувствительного элемента рефрактометрических волоконно-оптических датчиков с целью повышения чувствительности. Модель может быть использована при разработке алгоритма опроса чувствительных элементов на основе волоконных MMF-SMF-MMF структур.

Ключевые слова

поверхностный плазмонный резонанс, гетеросердцевинная структура, оптоволоконный датчик, измерение показателя преломления

Ссылка для цитирования: Ивойлов К.А., Гагаринова Д.О., Зыкина А.А., Мешковский И.К., Плясцов С.А. Модель чувствительного элемента рефрактивного волоконно-оптического сенсора на основе MMF-SMF-MMF структуры с использованием поверхностного плазмонного резонанса // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 448–454. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-448-454

A model of a refractive fiber optic sensor sensing element based on MMF-SMF-MMF structure using surface plasmon resonance

Kirill A. Ivoilov¹, Diana O. Gagarinova², Adeliia A. Zykina³, Igor K. Meshkovskiy⁴, Semyon A. Plyastsov⁵

^{1,2,3,4,5} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ kirivoilov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8251-7625>

² dogagarinova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1320-6553>

³ adeliya.zykina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>

⁴ igorkm@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>

⁵ plyastsov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>

Abstract

This paper presents a mathematical model of the sensitive element of a refractometric fiber-optic sensor the principle of operation of which is based on the phenomenon of surface plasmon resonance. The sensing element design is a sequential connection of a multimode fiber (MMF), a single-mode fiber (SMF), and a multimode fiber forming an MMF-SMF-MMF structure. The SMF site is coated with a thin film of gold. To model the element, the approach used in calculating the classical Kretschmann configuration for volumetric optical structures was applied. The refractive index of the fiber is calculated based on the Sellmeyer equation, and the refractive index of the gold is determined using the Drude model. The simulation results are compared with experimentally obtained transmission spectra of fabricated samples of sensing elements. For approbation of the model, the sensing elements of fiber-optic sensors with the following parameters are made: core diameter of multimode fiber 62.5 μm , core diameter of singlemode fiber 9 μm , coating SMF-segment with 50 nm gold film. Transmission spectra of fiber-optic sensor sensing elements in aqueous glucose solutions of various concentrations were obtained. It is demonstrated that the proposed model describes well the experimentally obtained transmission spectra of sensitive elements based on MMF-SMF-MMF structures in the region of surface plasmon resonance. The proposed model can be used to optimize the design of the sensitive element of refractometric fiber-optic sensors in order to increase the sensitivity. The proposed model implies its use in the development of an algorithm for interrogation of sensing elements based on fiber MMF-SMF-MMF structures.

Keywords

surface plasmon resonance, heterocore structure, fiber optic sensor, refractive index measurement

For citation: Ivoilov K.A., Gagarinova D.O., Zykina A.A., Meshkovskiy I.K., Plyastsov S.A. A model of a refractive fiber optic sensor sensing element based on MMF-SMF-MMF structure using surface plasmon resonance. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 448–454 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-448-454

Введение

На сегодняшний день существуют различные варианты конструкции датчиков, основывающихся на применении явления поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [1–4]. Одним из таких вариантов является устройство чувствительного элемента на основе гетеросердцевинной структуры, реализуемой путем сращивания нескольких оптических волокон различных типов. Данный вид датчика обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогами, такими как простота изготовления и механическая прочность.

Одна из наиболее часто встречаемых структур — последовательная сварка MMF-SMF-MMF (Multi-Mode fiber, MMF, Single-Mode fiber, SMF) [5]. При изменении показателя преломления изменяется резонансная длина волны, что может отразиться на спектре пропускания ППР-датчика [6–8].

При проектировании конструкции промышленного датчика необходимо разработать алгоритм опроса датчика и теоретическую модель, позволяющую предварительно рассчитывать отклик датчика для заданной конфигурации чувствительного элемента. В настоящей работе представлена математическая модель чувствительного элемента рефрактометрического волоконно-оптического датчика, принцип действия которого основан на явлении поверхностного плазмонного резонанса. Результаты моделирования сопоставлены с

экспериментальными данными, полученными на опытном образце.

Описание модели чувствительного элемента MMF-SMF-MMF конструкции

Схема MMF-SMF-MMF структуры показана на рис. 1. Свет, передаваемый по многомодовому волокну 1, проходит через одномодовое волокно 2, разделяясь на моды сердцевин и оболочки. Пройдя через одномодовое волокно 2, свет направляется в многомодовое оптическое волокно 3. Для обеспечения условий существования плазмонного резонанса поверхность SMF-участка покрыта металлом, обычно золотом или серебром.

Спектральные характеристики структуры на рис. 1 в первую очередь зависят от длин участков MMF и SMF. В работе [9] сделан вывод, что показания датчика главным образом зависят от длины одномодового участка.

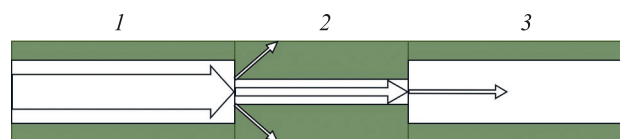


Рис. 1. Схема MMF-SMF-MMF структуры
Fig. 1. Schematic of the MMF-SMF-MMF structure

В зависимости от типа волоконного датчика длина SMF в среднем варьируется от 10 до 50 мм [10, 11]. В работе [12] представлена модель структуры MMF-SMF-MMF чувствительного элемента, основанная на электромагнитной модели распространения света. Авторами сделан вывод, что длина участка SMF не является решающей, и что его можно максимально сократить. В настоящей работе показано, что длина участка SMF влияет на ширину резонансного пика и его интенсивность, поэтому при разработке высокочувствительных датчиков следует подбирать данный параметр под условия конкретной задачи. В результате исследования не было обнаружено научных работ с описанием простых моделей, которые можно применить для разработки алгоритмов опроса волоконно-оптических датчиков, использующих поверхностный плазмонный резонанс.

Выполним расчет оптических процессов, происходящих в чувствительном элементе датчика, с помощью программного обеспечения Mathcad и формул поверхностного плазмонного резонанса для классической схемы Кречмана, выведенных в работе [13]. Определим показатель преломления волокна n_0 , изготовленного из плавленого кварца оптического качества (SiO_2), выраженный из уравнения Селлмейера [14, 15].

$$n_0(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{0,8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9,896161)^2} + \frac{0,4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0,1162414)^2} + \frac{0,6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0,0684043)^2}},$$

где λ — длина волны; числа — значения коэффициентов Селлмейера для SiO_2 .

Вычислим комплексный показатель преломления золотой пленки. Для этого рассчитаем комплексную диэлектрическую проницаемость золота ε_1 в приближении Друдэ [16].

$$\varepsilon_1(\lambda) = 1 - \frac{(\sqrt{f_0}\omega_p)^2}{\omega(\lambda)(\omega(\lambda) + i\Gamma_0)} + \frac{f_1\omega_p^2}{(\omega_1^2 - \omega(\lambda)^2) - i\omega(\lambda)\Gamma_1} + \dots + \frac{f_5\omega_p^2}{(\omega_5^2 - \omega(\lambda)^2) - i\omega(\lambda)\Gamma_5}, \quad (1)$$

где ω_p — плазменная частота; ω — угловая частота волны; f_0, f_1, \dots, f_5 — сила осциллятора; $\Gamma_0, \Gamma_1, \dots, \Gamma_5$ — коэффициенты демпфирования. Величины для

подстановки в формулу (1) были получены из работы [17] и представлены в таблице.

Показатель преломления золота n_1 вычислен как действительная часть квадратного корня из диэлектрической проницаемости ε_1 , а коэффициент экстинкции k_1 — как мнимая часть квадратного корня из диэлектрической проницаемости ε_1 .

Для простоты рассмотрения возьмем приближение геометрической оптики.

Рассчитаем коэффициент отражения волокна, покрытого золотой пленкой на основе уравнений Френеля [13]. Для этого используем модель Кречмана, в которой слой с номером 0 обозначает подложку или призму, 1 — слой металла, 2 — среду, например воздух. Таким образом, преломление на границе подложка-металл и границе металл-воздух опишем в виде:

$$r_{01}(\lambda, \theta) = \frac{\frac{\cos\theta}{n_0(\lambda)} - \frac{\sqrt{\varepsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\varepsilon_1(\lambda)}}{\frac{\cos\theta}{n_0(\lambda)} + \frac{\sqrt{\varepsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\varepsilon_1(\lambda)}},$$

$$r_{12}(\lambda, \theta, n) = \frac{\frac{\sqrt{\varepsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\varepsilon_1(\lambda)} - \frac{\sqrt{\varepsilon_2(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\varepsilon_2(\lambda)}}{\frac{\sqrt{\varepsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\varepsilon_1(\lambda)} + \frac{\sqrt{\varepsilon_2(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2}}{\varepsilon_2(\lambda)}},$$

где $\varepsilon_2(\lambda)$ — диэлектрическая проницаемость среды как квадрат показателя преломления; n_0 — показатель преломления волокна; θ — угол падения.

Вычислим поляризуемость и коэффициент отражения всей трехслойной структуры [13].

$$\alpha(\lambda, \theta) = \frac{2i\omega(\lambda)}{c} d\sqrt{\varepsilon_1(\lambda) - n_0(\lambda)^2(\sin\theta)^2};$$

$$r_{012}(\lambda, \theta, n) = \frac{r_{01}(\lambda, \theta) + r_{12}(\lambda, \theta, n)\exp(\alpha(\lambda, \theta))}{1 + r_{01}(\lambda, \theta)r_{12}(\lambda, \theta, n)\exp(\alpha(\lambda, \theta))}, \quad (2)$$

где α — поляризуемость; c — скорость света; d — толщина пленки; ε_1 — диэлектрическая проницаемость золота.

Вследствие того, что в выражении (2) получены комплексные результаты, возьмем модуль рассчитанного коэффициента отражения:

Таблица. Коэффициенты для подстановки в формулу (1)

Table. Coefficients for substitution in formula (1)

Сила осциллятора	Плазменная частота, рад/с	Угловая частота волны, рад/с	Коэффициенты демпфирования, рад/с
$f_0 = 0,760$	$\omega_p = 1,369 \cdot 10^{16}$	—	$\Gamma_0 = 8,052 \cdot 10^{13}$
$f_1 = 0,024$		$\omega_1 = 6,305 \cdot 10^{14}$	$\Gamma_1 = 3,661 \cdot 10^{14}$
$f_2 = 0,010$		$\omega_2 = 1,261 \cdot 10^{15}$	$\Gamma_2 = 5,241 \cdot 10^{14}$
$f_3 = 0,071$		$\omega_3 = 4,511 \cdot 10^{15}$	$\Gamma_3 = 1,322 \cdot 10^{15}$
$f_4 = 0,601$		$\omega_4 = 6,539 \cdot 10^{15}$	$\Gamma_4 = 3,789 \cdot 10^{15}$
$f_5 = 4,384$		$\omega_5 = 2,024 \cdot 10^{16}$	$\Gamma_5 = 3,364 \cdot 10^{15}$

$$r(\lambda, \theta, n) = r_{012}(\lambda, \theta, n)r_{012}(\lambda, \theta, n)^*,$$

где знак «*» — комплексно-сопряженное выражение.

Чтобы получить резонансные кривые, рассчитаем интенсивность отраженного излучения [18]. Значение нижнего предела основано на величине числовой апертуры волокна.

$$R(\lambda, n) = \frac{\int_{82}^{88} r(\lambda, \theta, n) d\theta}{\int_{82}^{88} 1 d\theta}. \quad (3)$$

Пределы интегрирования в выражении (3) выберем во время расчета модели из критерия максимального соответствия спектров прохождения, рассчитанных при помощи рассматриваемой модели и экспериментальными данными. Распространение света внутри волокна возможно только при выполнении закона полного внутреннего отражения, что приводит к ограничению максимального входного и выходного угла падения света (на рис. 2 обозначен как θ_m). Данный фактор задает нижний предел интеграла. Часть излучения, движущаяся вдоль оси волокна, попадает из сердцевины MMF в SMF, не участвуя в ППР (на рис. 2 представлен стрелкой вдоль сердцевин волокон). Данный фактор задает верхний предел интеграла.

Сравнение разработанной модели с экспериментальными данными

Для апробации разработанной модели проведен ряд экспериментов. Создано четыре конструкции MMF-SMF-MMF с различными длинами SMF-участка: 3, 7, 10 и 15 мм. Изготовление образцов выполнено в несколько этапов: соединены в помощью сварки участки MMF и SMF; выполнено скалывание одномодового волокна до необходимой длины при помощи скалывателя Fujikura CT-30; осуществлена сварка второго отрезка многомодового волокна при помощи сварочного аппарата Fujikura FSM 100P. Выполнено нанесение золотой пленки толщиной 50 нм на участок одномодового волокна методом термического напыления в установке Kurt J. Lesker PVD 75. Для наблюдения поверхностного плазмонного резонанса применена экспериментальная установка (рис. 3).

Эксперимент проведен следующим образом: чувствительный элемент вместе с закрепленным зеркалом

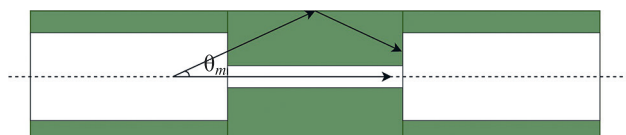


Рис. 2. Схема распространения лучей в MMF-SMF-MMF структуре

Fig. 2. Scheme of light ray propagation in the MMF-SMF-MMF structure

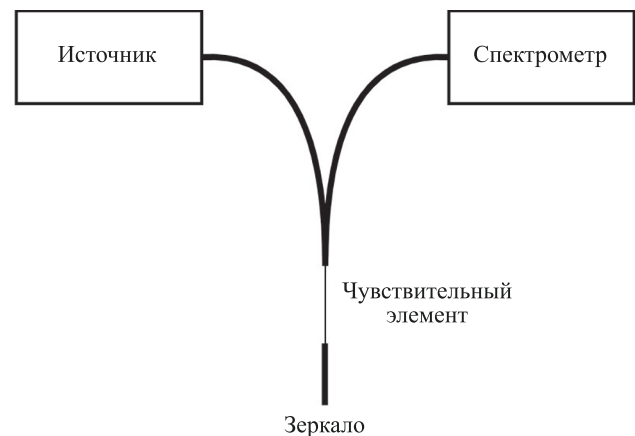


Рис. 3. Оптическая схема экспериментальной установки

Fig. 3. Optical scheme of the experimental setup

на конце многомодового участка волокна помещался в емкости с водными растворами глюкозы различной концентрации: 0, 4, 10, 20, 30, 40 и 50 %. Контроль процентного содержания глюкозы проводился при помощи весов Госметр ВЛТЭ-310. Излучение от широкополосного источника (галогеновая лампа AlphaBright с оптоволоконным выходом и со спектром 400–2100 нм) попадало в длинный участок многомодового волокна, затем проходило через конструкцию чувствительного элемента, отражалось от зеркала и детектировалось на спектрометре ABECTA ASP-150. Экспериментальные измерения и расчет моделей проведен в диапазоне длин волн 500–900 нм.

Для проверки результатов спектры пропускания, полученные из модели, объединим на одном графике с экспериментальными. На рис. 4 видно, что рассчитанный спектр вблизи резонансной длины волны близок к экспериментальным данным, однако при отдалении от нее спектры разработанной модели все сильнее отличаются от экспериментальных данных. По этой причине спектры были ограничены до диапазона 610–825 нм. При этом в диапазоне частот $\lambda_{\text{рез.}} \pm 25$ нм относительная погрешность не превышает 5,6 % для участка SMF длиной 15 мм. При уменьшении длины одномодового волокна относительная погрешность снижается. Так при длине SMF равной 3 мм относительная погрешность для того же диапазона частот не превышает 1,7 %. Изменение длины SMF-участка приводит к изменению формы резонансного пика и его интенсивности. При удлинении SMF с 3 мм до 15 мм резонансный пик уширяется, а интенсивность пропускаемого излучения уменьшается в среднем в 1,597 раз на резонансной длине волны.

Различия теоретических результатов и эксперимента можно объяснить тем, что в областях вне 450–850 нм интенсивность спектра источника излучения очень мала, что повышает погрешность измерений спектров. Данная модель может стать основой для разработки алгоритма опроса волоконно-оптического чувствительного на основе поверхностного плазмонного резонанса.

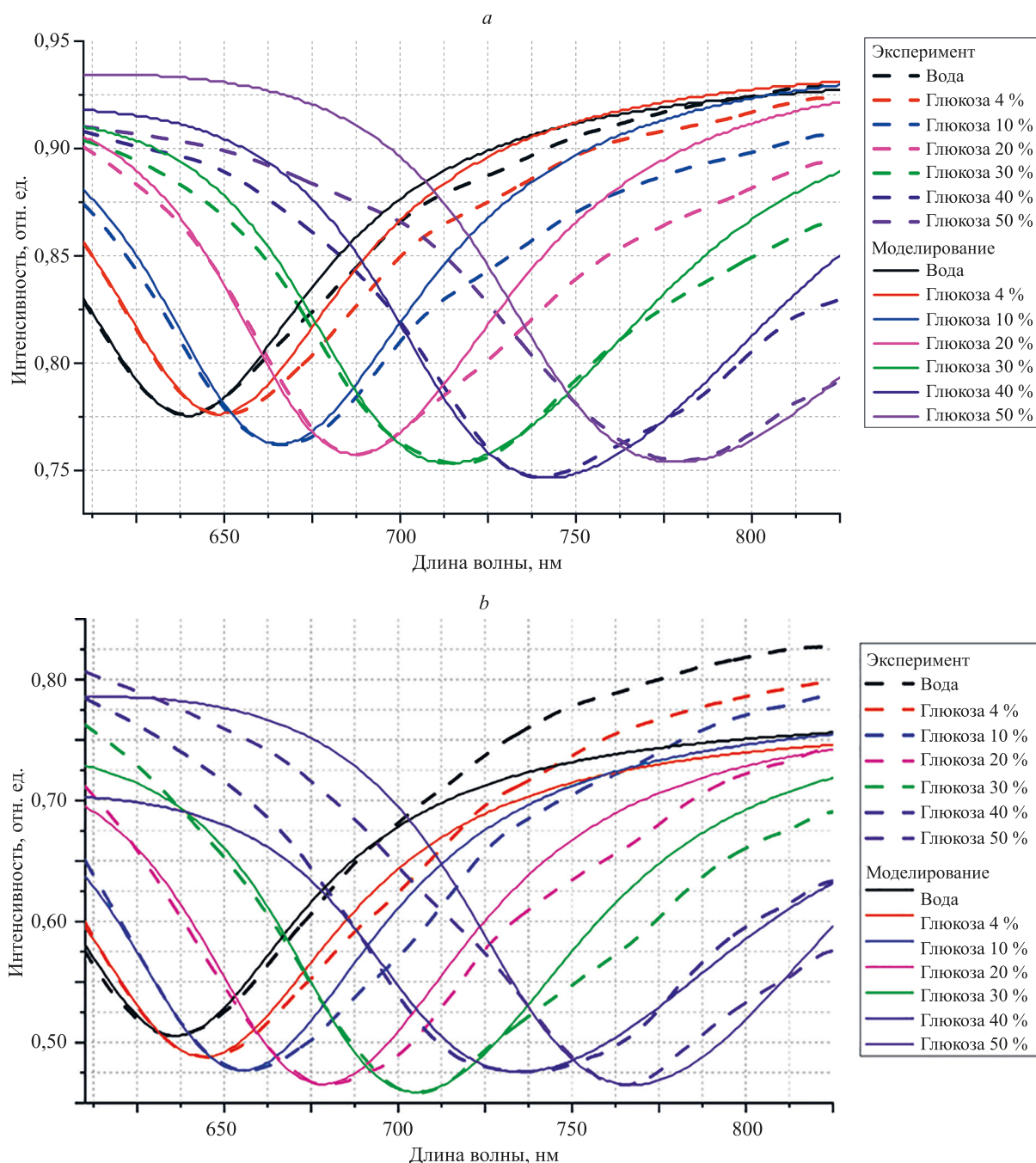


Рис. 4. Полученные спектры пропускания при помощи разработанной модели и экспериментальных данных для волокон с длинами SMF-участка: 3 мм (a) и 15 мм (b)

Fig. 4. Model-derived and experimental transmittance spectra for a structure with an SMF member length of 3 mm (a) and 15 mm (b)

Заключение

В работе представлена модель для расчетов спектров пропускания чувствительных элементов волоконно-оптических рефрактометрических датчиков на основе MMF-SMF-MMF структур. Экспериментально продемонстрировано, что предложенный подход на основе схемы Кречмана может быть успешно применен

для аппроксимации спектров пропускания волоконно-оптических чувствительных элементов.

Разработанную модель предполагается применить для расчета спектров пропускания в волоконно-оптических датчиках, оптимизации конструкции датчика, длины одномодового участка, количества слоев и толщин покрытий.

Литература

1. Homola J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species // *Chemical Reviews*. 2008. V. 108. N 2. P. 462–493. <https://doi.org/10.1021/cr068107d>
2. Miyazaki C.M., Shimizu F.M., Ferreira M. Surface plasmon resonance (SPR) for sensors and biosensors // *Nanocharacterization Techniques*. 2017. P. 183–200. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00006-0>
3. Wang X., Ma M., Wang X., Wang S. Surface plasmon resonance sensors for concentration and reaction kinetic detections // *Analytical Chemistry — Advancement, Perspectives and Applications*, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92549>
4. Mrksich M., Sigal G.B., Whitesides G.M. Surface plasmon resonance permits in situ measurement of protein adsorption on self-assembled monolayers of alkanethiolates on gold // *Langmuir*. 1995. V. 11. N 11. P. 4383–4385. <https://doi.org/10.1021/la00011a034>
5. Nguyen L.V., Hwang D., Moon S., Moon D.S., Chung Y. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch // *Optics Express*. 2008. V. 16. N 15. P. 11369–11375. <https://doi.org/10.1364/OE.16.011369>
6. Xu F., Chen D., Peng B., Xu J., Wu G. All-fiber refractometer based on core mismatch structure // *Laser Physics*. 2012. V. 22. N 10. P. 1577–1580. <https://doi.org/10.1134/S1054660X12100271>
7. Zhang Y., Zhou A., Qin B., Deng H., Liu Z., Yang J., Yuan L. Refractive index sensing characteristics of single-mode fiber-based modal interferometers // *Journal of Lightwave Technology*. 2014. V. 32. N 9. P. 1734–1740. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2311579>
8. Marfu'ah, Amalia N.R., Hatta A.M., Pratama D.Y. Multimode-singlemode-multimode optical fiber sensor coated with novolac resin for detecting liquid phase alcohol // *AIP Conference Proceedings*. 2018. V. 1945. P. 020031. <https://doi.org/10.1063/1.5030253>
9. Yin B., Li Y., Liu Z., Feng S., Bai Y., Xu Y., Jian S. Investigation on a compact in-line multimode-single-mode-multimode fiber structure // *Optics & Laser Technology*. 2016. V. 80. P. 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.12.018>
10. Sun A., Wu Z., Wan C., Yang C. All-fiber optic acoustic sensor based on multimode-single mode-multimode structure // *Optik*. 2012. V. 123. N 13. P. 1138–1139. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.07.040>
11. Sun T., Liu Z., Liu Y., Zhang Y., Jing Z., Peng W. All-fiber liquid-level sensor based on in-line MSM fiber structure // *Photonic Sensors*. 2021. V. 11. N 3. P. 291–297. <https://doi.org/10.1007/s13320-020-0586-1>
12. Roy P., Chaudhuri P.R. Characteristics of cladding mode-based refractive index sensor using MMF-SMF-MMF configuration // *Journal of Optics*. 2023. V. 52. N 1. P. 296–306. <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00885-1>
13. Yamamoto M. Surface plasmon resonance (SPR) theory: Tutorial // *Review of Polarography*. 2002. V. 48. N 3. P. 209–237. <https://doi.org/10.5189/revpolarography.48.209>
14. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of the noble metals // *Physical Review B*. 1972. V. 6. N 12. P. 4370–4379. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>
15. Tan C.Z. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1998. V. 223. N 1-2. P. 158–163. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(97\)00438-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00438-9)
16. Rakić A.D., Djurišić A.B., Elazar J.M., Majewski M.L. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices // *Applied Optics*. 1998. V. 37. N 22. P. 5271–5283. <https://doi.org/10.1364/AO.37.005271>
17. Hashemi M., Xiao S., Farzad M.H. Phase study of the generated surface plasmon waves in light transmission through a subwavelength aperture // *Journal of Nanophotonics*. 2014. V. 8. N 1. P. 083094. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.8.083094>
18. Poljak D., Cvetković M. Theoretical background: an outline of Computational Electromagnetics (CEM) // *Human Interaction with Electromagnetic Fields*. 2019. P. 21–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816443-3.00010-8>

References

1. Homola J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. *Chemical Reviews*, 2008, vol. 108, no. 2, pp. 462–493. <https://doi.org/10.1021/cr068107d>
2. Miyazaki C.M., Shimizu F.M., Ferreira M. Surface plasmon resonance (SPR) for sensors and biosensors. *Nanocharacterization Techniques*, 2017, pp. 183–200. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7.00006-0>
3. Wang X., Ma M., Wang X., Wang S. Surface plasmon resonance sensors for concentration and reaction kinetic detections. *Analytical Chemistry — Advancement, Perspectives and Applications*, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92549>
4. Mrksich M., Sigal G.B., Whitesides G.M. Surface plasmon resonance permits in situ measurement of protein adsorption on self-assembled monolayers of alkanethiolates on gold. *Langmuir*, 1995, vol. 11, no. 11, pp. 4383–4385. <https://doi.org/10.1021/la00011a034>
5. Nguyen L.V., Hwang D., Moon S., Moon D.S., Chung Y. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 15, pp. 11369–11375. <https://doi.org/10.1364/OE.16.011369>
6. Xu F., Chen D., Peng B., Xu J., Wu G. All-fiber refractometer based on core mismatch structure. *Laser Physics*, 2012, vol. 22, no. 10, pp. 1577–1580. <https://doi.org/10.1134/S1054660X12100271>
7. Zhang Y., Zhou A., Qin B., Deng H., Liu Z., Yang J., Yuan L. Refractive index sensing characteristics of single-mode fiber-based modal interferometers. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, vol. 32, no. 9, pp. 1734–1740. <https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2311579>
8. Marfu'ah, Amalia N.R., Hatta A.M., Pratama D.Y. Multimode-singlemode-multimode optical fiber sensor coated with novolac resin for detecting liquid phase alcohol. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1945, pp. 020031. <https://doi.org/10.1063/1.5030253>
9. Yin B., Li Y., Liu Z., Feng S., Bai Y., Xu Y., Jian S. Investigation on a compact in-line multimode-single-mode-multimode fiber structure. *Optics & Laser Technology*, 2016, vol. 80, pp. 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.12.018>
10. Sun A., Wu Z., Wan C., Yang C. All-fiber optic acoustic sensor based on multimode-single mode-multimode structure. *Optik*, 2012, vol. 123, no. 13, pp. 1138–1139. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.07.040>
11. Sun T., Liu Z., Liu Y., Zhang Y., Jing Z., Peng W. All-fiber liquid-level sensor based on in-line MSM fiber structure. *Photonic Sensors*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 291–297. <https://doi.org/10.1007/s13320-020-0586-1>
12. Roy P., Chaudhuri P.R. Characteristics of cladding mode-based refractive index sensor using MMF-SMF-MMF configuration. *Journal of Optics*, 2023, vol. 52, no. 1, pp. 296–306. <https://doi.org/10.1007/s12596-022-00885-1>
13. Yamamoto M. Surface plasmon resonance (SPR) theory: Tutorial. *Review of Polarography*, 2002, vol. 48, no. 3, pp. 209–237. <https://doi.org/10.5189/revpolarography.48.209>
14. Johnson P.B., Christy R.W. Optical constants of the noble metals. *Physical Review B*, 1972, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.6.4370>
15. Tan C.Z. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, vol. 223, no. 1-2, pp. 158–163. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(97\)00438-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00438-9)
16. Rakić A.D., Djurišić A.B., Elazar J.M., Majewski M.L. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Applied Optics*, 1998, vol. 37, no. 22, pp. 5271–5283. <https://doi.org/10.1364/AO.37.005271>
17. Hashemi M., Xiao S., Farzad M.H. Phase study of the generated surface plasmon waves in light transmission through a subwavelength aperture. *Journal of Nanophotonics*, 2014, vol. 8, no. 1, pp. 083094. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.8.083094>
18. Poljak D., Cvetković M. Theoretical background: an outline of Computational Electromagnetics (CEM). *Human Interaction with Electromagnetic Fields*, 2019, pp. 21–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816443-3.00010-8>

Авторы

Ивойлов Кирилл Антонович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8251-7625>, kirivoilov@yandex.ru

Гагаринова Диана Олеговна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1320-6553>, dogagarinova@itmo.ru

Зыкина Аделия Алексеевна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>, adelia.zykina@gmail.com

Мешковский Игорь Касьянович — доктор технических наук, профессор, профессор, главный научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603640937](https://orcid.org/0000-0003-3470-1000), <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>, igorkm@itmo.ru

Плясов Семён Алексеевич — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195587476](https://orcid.org/0000-0002-5764-0960), <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>, plyastsov@itmo.ru

Authors

Kirill A. Ivoilov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8251-7625>, kirivoilov@yandex.ru

Diana O. Gagarinova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1320-6553>, dogagarinova@itmo.ru

Adeliia A. Zykina — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8021-0678>, adelia.zykina@gmail.com

Igor K. Meshkovskiy — D.Sc., Full Professor, Chief Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603640937](https://orcid.org/0000-0003-3470-1000), <https://orcid.org/0000-0003-3470-1000>, igorkm@itmo.ru

Semyon A. Plyastsov — PhD, Head of Laboratory, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195587476](https://orcid.org/0000-0002-5764-0960), <https://orcid.org/0000-0002-5764-0960>, plyastsov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 13.01.2023

Одобрена после рецензирования 26.04.2023

Принята к печати 29.05.2023

Received 13.01.2023

Approved after reviewing 26.04.2023

Accepted 29.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ И РОБОТОТЕХНИКА AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-455-464

УДК 62-50

Анализ частотно-робастных многомерных динамических систем

Роман Оморович Оморов¹, Акылай Акунова², Таалайбек Абакирович Акунов³✉

^{1,2,3} Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, 720071, Кыргызская Республика

¹ romano_ip@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3555-1323>

² aakunova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0684-4063>

³ takunov@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0923-9777>

Аннотация

Введение. Рассмотрена задача исследования чувствительности эллипсоидных частотных показателей качества многомерных динамических систем к вариациям параметров. **Метод.** Для решения задачи использован аппарат функций чувствительности экстремальных элементов сингулярного разложения вещественнозначных передаточных матриц. **Основные результаты.** Совместное использование аппарата частотной чувствительности с методом пространства состояний позволило построить модели чувствительности. На основе полученных моделей определены эллипсоидные оценки функций частотной чувствительности по состоянию, выходу и ошибке линейных многомерных непрерывных систем в форме мажорант и минорант этих функций. Для вычислений применено сингулярное разложение матриц, составленных из функций частотной параметрической чувствительности. Полученные эллипсоидные оценки благодаря содержательным возможностям сингулярного разложения матриц обладают свойством минимальной достаточности. Такой подход позволяет использовать элементы левого сингулярного базиса, соответствующих экстремальным сингулярным числам, для выделения в пространствах состояния, выхода и ошибки подпространства, характеризующиеся для каждого значения частоты наибольшей и наименьшей по норме вариацией амплитудно-частотной характеристики. Использование правого сингулярного базиса дало возможность в пространстве параметров выделить подпространства, порождающие наибольшую и наименьшую по норме вариацию амплитудно-частотной характеристики. **Обсуждение.** Предложенный подход решил проблему «оптимального номинала — выбора номинального значения вектора первичных физических параметров агрегатов объекта управления, доставляющих многомерному управляемому процессу наименьшее значение эллипсоидных оценок функций частотной чувствительности. К таким параметрам относятся: размеры различных деталей и характеристики точности их изготовления, физические свойства материалов, а также различные величины, определяющие их конструктивное исполнение. Подход позволил осуществить сравнение протекания многомерных управляемых процессов по эллипсоидным оценкам частотной параметрической чувствительности.

Ключевые слова

линейная многомерная система, эллипсоидная оценка, частотная параметрическая чувствительность, модель чувствительности, сингулярное разложение

Ссылка для цитирования: Оморов Р.О., Акунова А., Акунов Т.А. Анализ частотно-робастных многомерных динамических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 455–464. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-455-464

Analysis of frequency-robust multivariable dynamical systems

Roman O. Omorov¹, Akylai Akunova², Taalaibek A. Akunov³✉

^{1,2,3} Machinery Researching and Automatics Institute of Kyrgyz Republic National Academy of Sciences, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic

¹ romano_ip@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3555-1323>

² aakunova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0684-4063>

³ takunov@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0923-9777>

© Оморов Р.О., Акунова А., Акунов Т.А., 2023

Abstract

We consider the problem of studying the sensitivity of ellipsoidal frequency estimates of quality of multivariable dynamic systems to parameter variations. To solve the problem, we use the apparatus of sensitivity functions of extreme elements of singular value decomposition of real-valued transfer matrices. The joint usage of the apparatus of frequency sensitivity with the method of state space allowed us to construct the models of sensitivity. On the basis of the obtained models, the ellipsoidal estimates of the frequency sensitivity functions for the state, output and error of linear multivariable continuous systems in the form of the majorant and minorant of these functions have been determined. The singular value decomposition of matrices composed of frequency parametric sensitivity functions has been applied to the calculations. The obtained ellipsoidal estimates have the property of minimum sufficiency due to the substantial possibilities of the singular value decomposition of matrices. This approach made it possible to use the elements of the left singular basis corresponding to the extreme singular values, to select in the state, output, and error spaces the subspaces characterized for each frequency value by the largest and smallest normal variation of the amplitude-frequency response. Using the right singular basis made it possible to identify the subspaces in the parameter space which produce the largest and the smallest normal variation of the amplitude-frequency response. The proposed approach has solved the problem of the “optimal nominal” — the choice of the nominal value of the vector of primary physical parameters of the control object aggregates that deliver the smallest value of ellipsoidal estimates of the frequency sensitivity functions to the multivariable controlled process. Such parameters include: dimensions of various parts and characteristics of their manufacturing accuracy, physical properties of materials as well as various values determining their design. The approach made it possible to compare the course of multidimensional controlled processes by ellipsoidal estimates of the frequency parameter sensitivity.

Keywords

linear multivariable system, ellipsoidal estimate, frequency parametric sensitivity, sensitivity model, singular value decomposition

For citation: Omorov R.O., Akunova A., Akunov T.A. Analysis of frequency-robust multivariable dynamical systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 455–464 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-455-464

Введение. Постановка задачи

В развитии современной теории управления наблюдается повышенный интерес [1–4] к проблемам робастности и грубости (малочувствительности) систем. Вопросам робастности, с которыми тесно связана проблема грубости, посвящены работы ученых и исследователей многих стран мира. Традиционное понимание грубости и робастности в современных научных работах определяет робастность [4, 5] как способность систем сохранять те или иные свойства не единственной системы, а множества систем, определенных тем или иным способом, а грубость как свойство систем сохранять качественную картину разбиения фазового пространства на траектории при малом возмущении топологии, при рассмотрении близких по виду уравнений систем.

Концепция подобия, используемая при конструировании частотных передаточных матриц [6–12], сводит исследование вынужденных составляющих переменных многомерной системы к анализу линейной алгебраической задачи, связывающей вектор данной переменной с вектором начального состояния источника экзогенного гармонического воздействия с помощью критериальной матрицы, параметризованной частотой воздействия. Последнее обстоятельство позволяет задачу оценки и обеспечения робастности многомерных систем при гармоническом экзогенном воздействии, под которой понимается малая чувствительность частотных показателей качества к вариациям параметров структурных компонентов систем, свести к проблеме робастности линейной алгебраической задачи. Использование сингулярного разложения частотных передаточных матриц многомерных систем позволяет на экстремальных элементах алгебраического спектра сингулярных

чисел и базисов построить мажорантные и минорантные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) исследуемых систем по состоянию, выходу и ошибке.

Выделим постановку задачи оценки параметрической чувствительности континуума АЧХ многомерных систем управления по состоянию, выходу и ошибке. Оценка подпространств состоит из анализа максимальной и минимальной чувствительностей, для чего введены эллипсоидные оценки частотных функций чувствительности по состоянию, выходу и ошибке в виде скалярных мажорант и минорант этих функций. Конструирование оценок осуществим с использованием сингулярного разложения [13] матриц частотной чувствительности.

Предложенный подход позволит решить проблему выбора номинального значения вектора параметров (к числу которых относятся размеры деталей и характеристики точности их изготовления, физические свойства материалов, а также величины, определяющие их конструктивное исполнение) агрегатов объекта управления, доставляющих многомерному управляемому процессу наименьшее значение эллипсоидных оценок частотных функций чувствительности, а также осуществить сравнение протекания многомерных управляемых процессов по эллипсоидным оценкам частотной параметрической чувствительности. За базовый показатель частотной робастности принято частотное число обусловленности критериальной матрицы линейной алгебраической задачи, в качестве которой использована частотная передаточная матрица вход–выход многомерной системы.

Появление тенденции «робастизации» в развитии теории управления неслучайно, она продиктована необходимостью рассмотрения современных сложных систем управления (не только традиционных систем

автоматического управления, а более широкого класса синергетических систем управления различной природы) в динамике, со всеми возможными изменениями и возмущениями в реальных условиях функционирования и развития (эволюции). В настоящее время наиболее рассмотрены и решены вопросы робастной устойчивости.

Первые работы по анализу и синтезу грубых (малочувствительных) систем были связаны с развитием теории чувствительности [1]. К настоящему времени недостаточно рассмотрены вопросы построения робастных и грубых нелинейных систем управления.

При этом для инженерных применений необходимо рассмотреть и большие (конечные) возмущения, т. е. вопросы робастности и грубости в большом. Отметим, что на практике модели и параметры возмущений могут быть не только известны, но и неопределенны.

Методы частотного направления робастной устойчивости

Исследуем новый взгляд на традиционные методы и средства исследования многомерных систем управления, в особенности в частотном направлении теории робастности для многомерных систем. К их числу относятся частотные передаточные матрицы и конструируемые на их основе частотные характеристики. Задача конструирования частотных передаточных матриц решена с помощью использования концепции подобия вынужденной составляющей состояния многомерной системы и состояния источника конечномерного экзогенного воздействия. При этом матрица преобразования подобия найдена как решение матричного уравнения Сильвестра.

Рассмотрим линейную многомерную непрерывную систему

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{g}(t); \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0; \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t)$ и $\mathbf{y}(t)$ — вектора состояния и выхода; $\mathbf{\varepsilon}(t) = \mathbf{g}(t) - \mathbf{y}(t)$ — ошибка по выходу; $\mathbf{g}(t)$ — экзогенное конечномерное воздействие; $\mathbf{x} \in R^n$; $\mathbf{g}, \mathbf{y} \in R^m$; $\mathbf{C}^T \in R^{n \times m}$; $\mathbf{G}, \mathbf{C} \in R^{n \times m}$; $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{C}$ — матрицы состояния, входа и выхода системы (1) соответственно.

Как известно, пользователей проектируемых систем интересуют такие частотные показатели, как полоса пропускания отношения вход–выход на уровне заданного значения АЧХ, показатель колебательности, полоса пропускания отношения вход–ошибка на уровне требуемого значения относительной частотной ошибки и др.

Для конструирования частотных передаточных матриц воспользуемся положениями следующего утверждения.

Утверждение 1. Пусть $\mathbf{g}(t)$ — конечномерное задающее воздействие, которое генерируется с помощью автономной конечномерной системы минимальной размерности

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}}(t) &= \mathbf{E}\mathbf{z}(t); \mathbf{z}(0); \mathbf{g}(t) = \mathbf{P}\mathbf{z}(t); \mathbf{P}\mathbf{P}^T = \mathbf{I}; \\ \mathbf{z}(t) &= \exp(\mathbf{E}t)\mathbf{z}(0) \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{z} \in R^l$, $\mathbf{E} \in R^{l \times l}$, $\mathbf{P} \in R^{m \times l}$, $\mathbf{g} \in R^m$. Тогда справедливы выражения:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= \exp(\mathbf{F}t)\mathbf{x}(0) + (\mathbf{T}\exp(\mathbf{E}t) - \exp(\mathbf{F}t)\mathbf{T})\mathbf{z}(0), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) = \mathbf{C}\exp(\mathbf{F}t)\mathbf{x}(0) + \mathbf{C}(\mathbf{T}\exp(\mathbf{E}t) - \exp(\mathbf{F}t)\mathbf{T})\mathbf{z}(0), \\ \mathbf{\varepsilon}(t) &= \mathbf{g}(t) - \mathbf{y}(t) = \\ &= (\mathbf{P} - \mathbf{C}\mathbf{T})\exp(\mathbf{E}t)\mathbf{z}(0) - \mathbf{C}\exp(\mathbf{F}t)(\mathbf{x}(0) - \mathbf{T}\mathbf{z}(0)), \end{aligned}$$

где матрица \mathbf{T} удовлетворяет матричному уравнению Сильвестра

$$\mathbf{T}\mathbf{E} = \mathbf{F}\mathbf{T} = \mathbf{G}\mathbf{P}. \quad \square \quad (3)$$

Доказательство Утверждения приведено в работах [6–8, 11, 12].

Для построения мажоранты и миноранты АЧХ по выходу $\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}(t, \omega)$ и ошибке $\mathbf{\varepsilon}(t) = \mathbf{\varepsilon}(t, \omega)$ многомерной непрерывной системы (1) используем модельное представление (2) источника внешнего векторного гармонического воздействия с матричными компонентами

$$\mathbf{E} = \text{diag} \left\{ \mathbf{E}_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}; i = \overline{1, m} \right\}, \mathbf{P} = \mathbf{I}_{m \times m} \otimes [1 \quad 0],$$

где $\mathbf{I}_{m \times m}$ — единичная $(m \times m)$ -матрица; ω — частота внешнего гармонического воздействия, приложенного ко всем входам системы (1); \otimes — символ кронекеровского произведения матриц. Применим данные положения для следующего утверждения.

Утверждение 2. Мажоранты $M_{yM}(\omega)$, $\delta_M(\omega)$ и миноранты $M_{ym}(\omega)$, $\delta_m(\omega)$ АЧХ по выходу $\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}(t, \omega)$ и ошибке $\mathbf{\varepsilon}(t) = \mathbf{\varepsilon}(t, \omega)$ многомерной непрерывной системы удовлетворяют оценочным неравенствам, принимающим для внешнего векторного гармонического воздействия вид

$$\begin{aligned} M_{ym}(\omega) &\leq \frac{\|\mathbf{y}(t, \omega)\|}{\|\mathbf{z}(0)\|} = \frac{\|\mathbf{y}(\omega)\|}{\|\mathbf{z}(0)\|} \leq M_{yM}(\omega), \forall \omega, M_{ym}(\omega), \\ &M_{yM}(\omega) \in \sigma_\alpha\{\mathbf{C}\mathbf{T}(\omega)\}, \\ \delta_m(\omega) &\leq \frac{\|\mathbf{\varepsilon}(t, \omega)\|}{\|\mathbf{z}(0)\|} = \frac{\|\mathbf{\varepsilon}(\omega)\|}{\|\mathbf{z}(0)\|} \leq \delta_M(\omega), \forall \omega, \delta_m(\omega), \\ &\delta_M(\omega) \in \sigma_\alpha\{\mathbf{P} - \mathbf{C}\mathbf{T}(\omega)\}, \end{aligned}$$

где $\sigma_\alpha\{*\}$ — алгебраический спектр сингулярных чисел матриц $(*)$; $(\circ)_M$ и $(\circ)_m$ — максимальное и минимальное значения сингулярных чисел; $\mathbf{T}(\omega)$ — частотная передаточная матрица, которая путем решения уравнения Сильвестра (3) принимает вид

$$\mathbf{T}(\omega) = -(\omega^2\mathbf{I} + \mathbf{F}^2)^{-1} \text{row}\{\mathbf{F}\mathbf{G}_i \quad \omega\mathbf{G}_i\}; i = \overline{1, m};$$

где $\text{row}\{(\circ)_i, i = \overline{1, m}\}$ — строчная матричная структура с элементами $(\circ)_i$ в строке; ω — частота задающего внешнего векторного гармонического воздействия. \square

Доказательство Утверждения приведено в [6–9].

Мажоранты и миноранты АЧХ по выходу $\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}(t, \omega)$ и ошибке $\mathbf{\varepsilon}(t) = \mathbf{\varepsilon}(t, \omega)$ в Утверждении 2 получим [6] с помощью сведения исследования многомерных систем управления к векторно-матрично-

му представлению, параметризованному скалярами t и ω .

$$\mathbf{k}(\tau) = \mathbf{P}(\tau)\chi(\tau), \forall \tau, \tau = t, \omega, \quad (4)$$

где $\mathbf{k} \in R^p$, $\chi \in R^v$, $\mathbf{P} \in R^{p \times v}$ — некоторая критериальная матрица; τ — принимает смысл непрерывного времени t ; ω — частоты источника внешнего гармонического воздействия.

Пусть матрица $\mathbf{P}(\tau)$ имеет в силу сингулярного разложения представление

$$\mathbf{P}(\tau) = \mathbf{U}(\tau)\mathbf{\Sigma}(\tau)\mathbf{V}^T(\tau), \quad (5)$$

где $\mathbf{\Sigma}(\tau)$ — $(p \times v)$ — диагональная матрица, имеющая на главной диагонали сингулярные числа матрицы $\mathbf{P}(\tau)$; $\mathbf{U}(\tau)$ и $\mathbf{V}(\tau)$ — ортогональные матрицы $(p \times p)$ и $(v \times v)$, столбцы которых образуют левый и правый сингулярные базисы матрицы $\mathbf{P}(\tau)$. Если в (5) перейти к евклидовым векторным нормам, то становятся справедливыми оценочные неравенства

$$\alpha_m(\tau) \leq \|\mathbf{k}(\tau)\|/\|\chi(\tau)\| \leq \alpha_M(\tau), \forall \tau, \quad (6)$$

где $\alpha_m(\tau)$, $\alpha_M(\tau)$ — экстремальные элементы алгебраического спектра $\sigma_\alpha\{\mathbf{P}(\tau)\}$ сингулярных чисел матрицы $\mathbf{P}(\tau)$. Наибольшее и наименьшее сингулярные числа $\alpha_M(\tau)$, $\alpha_m(\tau)$ матрицы $\mathbf{P}(\tau)$ в (6) однозначно определяют на матрице правых сингулярных векторов $\mathbf{V}(\tau)$ те из них, которые на сфере $\|\chi(\tau)\| = \text{fix}$ отображаются в наибольшую и наименьшую полуоси эллипсоида, получаемого с помощью (4), причем длины этих полуосей $\alpha_M(\tau)\|\chi(\tau)\|$ и $\alpha_m(\tau)\|\chi(\tau)\|$ соответственно.

Таким образом, знание алгебраических спектров сингулярных чисел $M_{ym}(\omega)$, $M_{yM} \in \sigma_\alpha\{\mathbf{CT}(\omega)\}$ позволило охватить практически весь круг проблем исследования многомерных систем при гармоническом внешнем воздействии в установившемся режиме в скалярной постановке. Использование правого и левого сингулярного базисов в сингулярном разложении матриц $\mathbf{CT}(\omega)$ и $\mathbf{P-CT}(\omega)$ дало возможность получить прозрачную геометрическую интерпретацию.

Конструирование частотных передаточных матриц непрерывных многомерных систем для случая многочастотного экзогенного воздействия

Источник непрерывного многочастотного векторного гармонического воздействия (2) будет иметь в качестве матрицы состояния матрицу определенного вида для случая вещественнозначного воздействия.

Утверждение 3. Для непрерывного многочастотного вещественнозначного векторного гармонического воздействия матрица $\mathbf{T}(\Omega)$ как решение уравнения Сильвестра

$$\mathbf{T}(\Omega)\mathbf{E}(\Omega) - \mathbf{F}\mathbf{T}(\Omega) = \mathbf{G}\mathbf{P}$$

может быть записана в форме

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(\Omega) &= \text{row}\{\mathbf{T}_{2i-1} \quad \mathbf{T}_{2i}\} = \text{row}\{-(\omega_i^2\mathbf{I} + \mathbf{F}^2)^{-1}[\mathbf{F}\mathbf{G}_i \quad \omega_i\mathbf{G}_i], i = \overline{1, m}\}. \quad (7) \end{aligned}$$

Доказательство Утверждения приведено в работах [6–8, 11, 12].

Утверждения 1–3 служат для построения мажоранты и миноранты АЧХ по выходу $y(t)$ и ошибке $\varepsilon(t)$ многомерной непрерывной системы, а также для случая многочастотного векторного гармонического воздействия. При этом исходным условием для их вычислений является сведение исследуемой проблемы к линейной алгебраической задаче вида (4), связывающей вектор начального состояния $\mathbf{z}(0)$ источника внешнего гармонического воздействия с выходом и ошибкой, а матрица, подлежащая сингулярному разложению, как указано в Утверждении 2, принимает вид СТ и Р–СТ.

Оценка робастности непрерывных многомерных систем. Частотные критерии робастности

В проблемно ориентированном виде робастность в настоящей работе понимается как малая чувствительность качества процессов в многомерных непрерывных системах к вариациям параметров их структурных элементов при векторном гармоническом внешнем воздействии.

В связи с этим исследуем параметрическую чувствительность частотных показателей качества многомерных непрерывных систем при условии, что диапазон вариаций параметров системы допускает применение аппарата теории чувствительности в пределах возможностей функций чувствительности первого порядка.

Робастность как малая чувствительность линейной алгебраической задачи

Оценки частотных характеристик многомерных непрерывных систем в форме мажорант и минорант получим с помощью сведения проблемы к линейной алгебраической задаче. Учитывая данное обстоятельство становится естественным рассмотрение робастности многомерных систем при внешнем векторном гармоническом воздействии как малой чувствительности линейной алгебраической задачи

$$\mathbf{k}(\tau, \mathbf{q}) = \mathbf{P}(\tau, \mathbf{q})\chi(0), \chi(0) = \chi(t=0), \quad (8)$$

\mathbf{q} — p -мерный вектор изменяющихся квазистационарных параметров с номинальным значением \mathbf{q}_0 , для которого

$$\mathbf{k}(t, \omega, \mathbf{q} = \mathbf{q}_0) = \mathbf{k}(t, \omega); \mathbf{P}(t, \omega, \mathbf{q} = \mathbf{q}_0) = \mathbf{P}(t, \omega). \quad (9)$$

При гармоническом экзогенном воздействии исследование линейной алгебраической задачи (8) может быть сведено к исследованию стационарной по t задаче

$$\mathbf{k}(\omega, \mathbf{q}) = \mathbf{P}(\omega)\chi(0). \quad (10)$$

Таким образом, опираясь на описывающие линейную алгебраическую задачу соотношения (8)–(10), осуществим анализ чувствительности линейной алгебраической задачи (10) к вариации ее векторных и матричных компонентов, порожденных вариацией $\Delta\mathbf{q}$

вектора первичных физических параметров \mathbf{q} относительно номинального значения \mathbf{q}_0 в двух постановках.

В первой постановке векторные элементы (10) представим в левом и правом сингулярных базисах матрицы $\mathbf{\Pi}(\omega)$. При этом задача исследования чувствительности (10) заключается в анализе чувствительности сингулярных чисел [14], а также элементов левого и правого сингулярных базисов $\mathbf{\Pi}(\omega)$.

Во второй постановке оценим норму приращения $\Delta \mathbf{k}(\omega)$ вектора $\mathbf{k}(\omega)$, порожденного приращениями $\Delta \mathbf{\Pi}(\omega)$ матрицы $\mathbf{\Pi}(\omega)$ и $\Delta \mathbf{\chi}(0)$ вектора $\mathbf{\chi}(0)$ относительно их номинальных реализаций, порожденных вариациями совокупности первичных параметров. В такой постановке переход от норм приращений к их относительным значениям имеет вид

$$\delta(\circ) \triangleq \|\Delta(\circ)\|/\|\circ\|,$$

который позволит оценить относительную ошибку решения линейной задачи (10) в прямой или инверсной формах с помощью числа обусловленности $C\{\mathbf{\Pi}(\omega)\}$ матрицы $\mathbf{\Pi}(\omega)$ [15, 16].

Конструирование функций чувствительности мажорантных и минорантных частотных характеристик непрерывных многомерных систем

При конструировании функций параметрической чувствительности мажорантных и минорантных частотных характеристик непрерывной многомерной системы предположим, что зависящее от вектора параметров \mathbf{q} векторно-матричное представление последней имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{q})\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(\mathbf{q})\mathbf{g}(t); \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(\mathbf{q})\mathbf{x}(t), \quad (11)$$

где $\mathbf{F}(\mathbf{q})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0} = \mathbf{F}$; $\mathbf{G}(\mathbf{q})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0} = \mathbf{G}$; $\mathbf{C}(\mathbf{q})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0} = \mathbf{C}$.

Очевидно, зависимость от вектора параметров \mathbf{q} матричных элементов непрерывной многомерной системы (11) порождает зависимость от этого вектора мажорантных и минорантных АЧХ системы.

Ограничимся в дальнейшем АЧХ отношения вход–выход и относительной частотной ошибкой. Тогда для мажорантных и минорантных АЧХ системы (11) запишем

$$M_{yM}(\omega, \mathbf{q}) = \alpha_M \{\mathbf{\Pi}_y(\omega, \mathbf{q}) = \mathbf{C}(\mathbf{q})\mathbf{T}(\omega, \mathbf{q})\}, \quad (12)$$

$$M_{ym}(\omega, \mathbf{q}) = \alpha_m \{\mathbf{\Pi}_y(\omega, \mathbf{q}) = \mathbf{C}(\mathbf{q})\mathbf{T}(\omega, \mathbf{q})\}, \quad (13)$$

$$\delta_M(\omega, \mathbf{q}) = \alpha_M \{\mathbf{\Pi}_\varepsilon(\omega, \mathbf{q}) = \mathbf{P} - \mathbf{C}(\mathbf{q})\mathbf{T}(\omega, \mathbf{q})\}, \quad (14)$$

$$\delta_m(\omega, \mathbf{q}) = \alpha_m \{\mathbf{\Pi}_\varepsilon(\omega, \mathbf{q}) = \mathbf{P} - \mathbf{C}(\mathbf{q})\mathbf{T}(\omega, \mathbf{q})\}. \quad (15)$$

В выражениях (12)–(15) матрица $\mathbf{T}(\omega, \mathbf{q})$ является решением матричного уравнения Сильвестра

$$\mathbf{T}(\omega, \mathbf{q})\mathbf{E}(\mathbf{q}) - \mathbf{F}(\mathbf{q})\mathbf{T}(\omega, \mathbf{q}) = \mathbf{G}\mathbf{P}(\mathbf{q}). \quad (16)$$

Функции чувствительности мажорантных и минорантных частотных характеристик (12)–(15) к вариации j -го элемента \mathbf{q}_j вектора параметров \mathbf{q} в силу определения получают представления:

$$M_{yMq_j}(\omega) \triangleq \frac{\partial}{\partial q_j} M_{yM}(\omega, \mathbf{q})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0} = \frac{\partial}{\partial q_j} \alpha_M \{\mathbf{\Pi}_y(\omega, \mathbf{q})\}|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0}, \quad (17)$$

$$M_{ymq_j}(\omega) \triangleq \frac{\partial}{\partial q_j} M_{ym}(\omega, \mathbf{q})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0} = \frac{\partial}{\partial q_j} \alpha_m \{\mathbf{\Pi}_y(\omega, \mathbf{q})\}|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0}, \quad (18)$$

$$\delta_{Mq_j}(\omega) \triangleq \frac{\partial}{\partial q_j} \delta_M(\omega, \mathbf{q})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0} = \frac{\partial}{\partial q_j} \alpha_M \{\mathbf{\Pi}_\varepsilon(\omega, \mathbf{q})\}|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0}, \quad (19)$$

$$\delta_{mq_j}(\omega) \triangleq \frac{\partial}{\partial q_j} \delta_m(\omega, \mathbf{q})|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0} = \frac{\partial}{\partial q_j} \alpha_m \{\mathbf{\Pi}_\varepsilon(\omega, \mathbf{q})\}|_{\mathbf{q}=\mathbf{q}_0}. \quad (20)$$

Видно, что функции чувствительности (17)–(20) оказываются заданными на функциях чувствительности [14] элементов сингулярного разложения соответствующих критериальных матриц. Все функции (17)–(20) зависят от частоты ω внешнего гармонического воздействия $\mathbf{g}(t)$ многомерной непрерывной системы (1), а потому они справедливо могут быть названы частотными функциями чувствительности.

Алгоритм 1 оценки чувствительности мажорантных и минорантных частотных характеристик состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Решим уравнение Сильвестра при номинальном значении $\mathbf{q} = \mathbf{q}_0$ вектора параметров относительно матрицы $\mathbf{T}(\omega)$. Выполним конструирование критериальных матриц

$$\mathbf{\Pi}_y(\omega) = \mathbf{C}\mathbf{T}(\omega); \mathbf{\Pi}_\varepsilon(\omega) = \mathbf{P} - \mathbf{C}\mathbf{T}(\omega). \quad (21)$$

Шаг 2. Осуществим конструирование сингулярных разложений матриц (21)

$$\mathbf{\Pi}_y(\omega) = \mathbf{U}(\omega)\mathbf{\Sigma}(\omega)\mathbf{V}^T(\omega); \mathbf{\Pi}_\varepsilon(\omega) = \mathbf{U}_\varepsilon(\omega)\mathbf{\Sigma}_\varepsilon(\omega)\mathbf{V}_\varepsilon^T(\omega). \quad (22)$$

Шаг 3. Вычислим матрицы чувствительности $\mathbf{\Pi}_{yq_j}(\omega)$ и $\mathbf{\Pi}_{\varepsilon q_j}(\omega)$ с помощью соотношений

$$\mathbf{\Pi}_{yq_j}(\omega) = \mathbf{C}_{q_j}\mathbf{T}(\omega) + \mathbf{C}\mathbf{T}_{q_j}(\omega); \mathbf{\Pi}_{\varepsilon q_j}(\omega) = -\mathbf{\Pi}_{yq_j}(\omega), \quad (23)$$

где $\mathbf{T}_{q_j}(\omega)$ — матрица сепаратной чувствительности вычисляется с помощью матричного уравнения Сильвестра

$$\mathbf{T}_{q_j}(\omega)\mathbf{E}(\omega) + \mathbf{F}\mathbf{T}_{q_j}(\omega) = \mathbf{G}_{q_j}\mathbf{P} + \mathbf{F}_{q_j}\mathbf{T}(\omega). \quad (24)$$

Шаг 4. Сконструируем матрицы $\mathbf{S}_{y_j}(\omega)$ и $\mathbf{S}_{\varepsilon_j}(\omega)$ исходя из соотношений

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{y_j}(\omega) &= \mathbf{U}^T(\omega)\mathbf{\Pi}_{yq_j}(\omega)\mathbf{V}(\omega); \\ \mathbf{S}_{\varepsilon_j}(\omega) &= \mathbf{U}_{\varepsilon_j}^T(\omega)\mathbf{\Pi}_{\varepsilon q_j}(\omega)\mathbf{V}_{\varepsilon}(\omega). \end{aligned} \quad (25)$$

Шаг 5. Выполним конструирование функций чувствительности мажорантных и минорантных АЧХ вход–выход и относительной частотной ошибки с помощью (17)–(20)

$$M_{yMq_j}(\omega) = (\mathbf{S}_{y_j}(\omega))_{MM}; M_{ymq_j}(\omega) = (\mathbf{S}_{y_j}(\omega))_{mm}. \quad (26)$$

$$\delta_{Mq_j}(\omega) = (\mathbf{S}_{\varepsilon_j}(\omega))_{MM}; \delta_{mq_j}(\omega) = (\mathbf{S}_{\varepsilon_j}(\omega))_{mm}. \quad (27)$$

Шаг 6. Вычислим конечные вариации мажорантных и минорантных частотных характеристик многомерной

непрерывной системы (1), порожденных конечной вариацией $\Delta \mathbf{q}_j$ j -го компонента \mathbf{q}_j вектора параметров \mathbf{q}

$$\Delta M_{yM_j}(\omega) = M_{yM_j}(\omega) \Delta \mathbf{q}_j; \Delta M_{ym_j}(\omega) = M_{ym_j}(\omega) \Delta \mathbf{q}_j, \quad (28)$$

$$\Delta \delta_{M_j}(\omega) = \delta_{M_j}(\omega) \Delta \mathbf{q}_j; \Delta \delta_{m_j}(\omega) = \delta_{m_j}(\omega) \Delta \mathbf{q}_j. \quad (29)$$

Замечание. В связи с тем, что существует аналогичное (7) явное вещественнозначное решение матричного уравнения Сильвестра (16)

$$\mathbf{T}(\omega, \mathbf{q}) = -(\omega^2 \mathbf{I} + \mathbf{F}^2(\mathbf{q}))^{-1} \text{row}\{[\mathbf{F}(\mathbf{q}) \mathbf{G}_i(\mathbf{q}) \times \omega \mathbf{G}_i(\mathbf{q}), i = \overline{1, m}], \quad (30)$$

то альтернативой вычислению матрицы сепаратной чувствительности \mathbf{T}_{q_j} в шаге 3 алгоритма с помощью решения матричного уравнения (24) является непосредственное дифференцирование (30) по \mathbf{q}_j , что дает для \mathbf{T}_{q_j} представление

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{q_j}(\omega) = & -(\omega^2 \mathbf{I} + \mathbf{F}^2)^{-1} (\mathbf{F} \mathbf{F}_j + \mathbf{F} \mathbf{F}_{q_j}) \times \\ & \times (\omega^2 \mathbf{I} + \mathbf{F}^2)^{-1} \text{row}\{[\mathbf{F} \mathbf{G}_i \quad \omega \mathbf{G}_i], i = \overline{1, m}\} - \\ & - (\omega^2 \mathbf{I} + \mathbf{F}^2)^{-1} \text{row}\{[\mathbf{F}_{q_j} \mathbf{G}_i + \mathbf{F} \mathbf{G}_{q_j} \quad \omega \mathbf{G}_{q_j}], i = \overline{1, m}\}. \end{aligned} \quad (31)$$

Заметим, что полученные частотные функции чувствительности непрерывных многомерных систем (31) содержательно подобны функциям траекторной чувствительности во временной области [17].

Чувствительность линейной алгебраической задачи к вариациям совокупности параметров. Частотные числа обусловленности

Рассмотрим возмущение линейной алгебраической задачи, порожденное приращением $\Delta \mathbf{q}$ совокупности первичных физических параметров, приводящих к вариации $\Delta \mathbf{\Pi}(t, \omega, \mathbf{q}_0, \Delta \mathbf{q})$ матрицы $\mathbf{\Pi}(t, \omega, \mathbf{q}_0) \triangleq \mathbf{\Pi}(t, \omega)$, а также приращением $\Delta \chi(0)$ вектора $\chi(0)$ начального состояния источника экзогенного гармонического воздействия. Вариации $\Delta \mathbf{\Pi}(t, \omega, \mathbf{q}_0, \Delta \mathbf{q})$ и $\Delta \chi(0)$ порождают вариацию $\Delta \mathbf{\kappa}(t, \omega)$, определяемую векторно-матричным соотношением

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{\kappa}(t, \omega) = & \Delta \mathbf{\Pi}(t, \omega, \mathbf{q}_0, \Delta \mathbf{q}) \chi(0) + \\ & + \mathbf{\Pi}(t, \omega) \Delta \chi(0) + \Delta \mathbf{\Pi}(t, \omega, \mathbf{q}_0, \Delta \mathbf{q}) \Delta \chi(0). \end{aligned} \quad (32)$$

Переход в (32) к соотношению по согласованным матричным и векторным нормам приводит к неравенству

$$\begin{aligned} \|\Delta \mathbf{\kappa}(t, \omega)\| \leq & \|\Delta \mathbf{\Pi}(t, \omega, \mathbf{q}_0, \Delta \mathbf{q})\| \cdot \|\chi(0)\| + \\ & + \|\mathbf{\Pi}(t, \omega)\| \cdot \|\Delta \chi(0)\| + \|\Delta \mathbf{\Pi}(t, \omega, \mathbf{q}_0, \Delta \mathbf{q})\| \cdot \|\Delta \chi(0)\|. \end{aligned} \quad (33)$$

Введем в рассмотрение относительные значения вариаций векторных и матричных компонентов линейной задачи (33), определив их соотношениями

$$\begin{aligned} \delta_{\kappa}(t, \omega) \triangleq & \frac{\|\Delta \mathbf{\kappa}(t, \omega)\|}{\|\mathbf{\kappa}(t, \omega)\|}, \delta_{\chi}(0) \triangleq \frac{\|\Delta \chi(0)\|}{\|\chi(0)\|}, \\ \delta_{\Pi}(t, \omega) \triangleq & \frac{\|\Delta \mathbf{\Pi}(t, \omega, \mathbf{q}_0, \Delta \mathbf{q})\|}{\|\mathbf{\Pi}(t, \omega)\|}. \end{aligned} \quad (34)$$

Сформулируем на основе рассмотрения номинальной версии линейной алгебраической задачи оценку

$$\|\Delta \mathbf{\kappa}(t, \omega)\| \geq \frac{\|\chi(0)\|}{\|\mathbf{\Pi}^+(t, \omega)\|}, \quad (35)$$

где $(\circ)^+$ — матрица псевдообратная исходной (\circ) .

Видно, что выражения (33)–(35) позволяют сконструировать оценку

$$\begin{aligned} \delta_{\kappa}(t, \omega) \leq & \|\mathbf{\Pi}(t, \omega)\| \cdot \|\mathbf{\Pi}^+(t, \omega)\| \{\delta_{\chi}(0) + \\ & + \delta_{\Pi}(t, \omega) + \delta_{\chi}(0) \delta_{\Pi}(t, \omega)\}. \end{aligned} \quad (36)$$

Мультипликативная конструкция из матричных норм $\|\mathbf{\Pi}(t, \omega)\| \cdot \|\mathbf{\Pi}^+(t, \omega)\|$ представляет собой число обусловленности $C\{\mathbf{\Pi}(t, \omega)\}$ матрицы $\mathbf{\Pi}(t, \omega)$. В связи с этим, используя обозначения

$$C\{\mathbf{\Pi}(t, \omega)\} \triangleq \|\mathbf{\Pi}(t, \omega)\| \cdot \|\mathbf{\Pi}^+(t, \omega)\|, \quad (37)$$

неравенство (36) запишем в виде

$$\begin{aligned} \delta_{\kappa}(t, \omega) \leq & C\{\mathbf{\Pi}(t, \omega)\} \times \\ & \times \{\delta_{\chi}(0) + \delta_{\Pi}(t, \omega) + \delta_{\chi}(0) \delta_{\Pi}(t, \omega)\}. \end{aligned} \quad (38)$$

Неравенство (38) определяет число обусловленности критериальной матрицы $\mathbf{\Pi}(t, \omega)$ линейной алгебраической задачи, как один из скалярных неинвариантов представляет собой коэффициент усиления относительных погрешностей при возмущении векторных и матричных компонентов линейной задачи. Величина числа обусловленности учитывает его определение (37) и зависит от используемых матричных норм. Причем выбор этих норм и степень их согласованности с векторными нормами определяет уровень достаточности оценки, задаваемой в форме (38). Наименьшую степень достаточности доставляет композиция спектральных матричных и евклидовых векторных норм. В работе использована данная композиция согласованных норм.

Если в дальнейшем ограничиваться входными–выходными отношениями непрерывной многомерной системы (1), то $\mathbf{\Pi}(\omega)$ оказывается частотной передаточной матрицей этого отношения. Экстремальные элементы ее алгебраического спектра сингулярных чисел являются мажорантной $M_{yM}(\omega)$ и минорантной $M_{ym}(\omega)$ АЧХ этого отношения. В связи со сказанным введем в рассмотрение число обусловленности $C_y(\omega)$ отношения вход–выход (частотной передаточной матрицы вход–выход), определенное соотношением

$$C_y(\omega) \triangleq \frac{M_{yM}(\omega)}{M_{ym}(\omega)}.$$

Отметим, что частотное число обусловленности $C_y(\omega)$ отношения вход–выход многомерных систем как функция частоты ω — элемент функционального пространства $L_{\Delta\Omega}^p$, где $p \rightarrow \infty$, $\Delta\Omega = [\omega: 0 \leq \omega \leq \infty]$ для непрерывных систем. Норму $\|C_y(\omega)\|_{p \rightarrow \infty}$ частотного числа обусловленности как элемента функционального пространства определим соотношением

$$\|C_y(\omega)\|_{\infty} = \sup_{\omega \in \Delta\Omega} C_y(\omega).$$

Дадим геометрическую интерпретацию, опираясь на линейную алгебраическую задачу (8), числу обусловленности отношения вход–выход. Матрица $\Pi(\tau, \omega)$ отображает сферу $\|\chi(0)\| = \text{const}$ в пространстве R^v в эллипсоид с полуосями длины $M_{yM}(\omega)\|\chi(0)\|$ и $M_{ym}(\omega)\|\chi(0)\|$ в пространстве R^m . Если норма числа обусловленности $\|C_y(\omega)\|_\infty$ близка к единице, что имеет место при $M_{yM}(\omega) \cong M_{ym}(\omega)$, то сфера в пространстве R^v отображается в сферу в пространстве R^m . Если норма числа обусловленности $\|C_y(\omega)\|_\infty$ значительно превышает единицу, то получаемый при отображении сферы $\|\chi(0)\| = \text{const}$ эллипсоид в R^m характеризуется в $\|C_y(\omega)\|_\infty$ — раз отличающимися по длине наибольшей и наименьшей полуосями. Стремление $\|C_y(\omega)\|_\infty$ к бесконечности свидетельствует о вырождении эллипсоида в прямую, а следовательно, о вырождении сложной системы (1), и система обнаруживает не полную управляемость по выходу. Таким образом, число обусловленности $C_y(\omega)$ формально являясь в (38) коэффициентом усиления относительной вариации передаточной частотной матрицы вход–выход, порожденной совокупностью исходных физических параметров, может быть хорошей характеристикой структурных свойств этого отношения [12].

Задача синтеза многомерных частотно-робастных непрерывных систем в классе хорошо обусловленных отношений вход–выход может быть решена методами обобщенного модального управления [8, 9], доставляющего матрице состояния системы модально-робастное представление. При этом в силу асимптотических свойств оценка частотного числа обусловленности отношения вход–выход во всем диапазоне частот экзогенного гармонического воздействия примет минимальное значение, степень отклонения которого от единицы определяется степенью отклонения от единицы числа обусловленности матрицы собственных векторов.

Пример. Рассмотрим использование частотных функций чувствительности мажорантных и минорантных частотных характеристик непрерывной многомерной системы для исследования чувствительности к параметрическим вариациям на примере непрерывной двухканальной фотоэлектрической следящей системы (ФЭСС) с прямыми антисимметричными связями между каналами. Модель вход–состояние–выход состоит из матриц

$$F(q) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -20 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4(1+q) & 1 \\ -20(1+q) & 0 & -100 & 2 \end{bmatrix},$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 20 & -4(1+q) \\ 0 & 0 \\ 20 & 100 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

с номинальным значением $\bar{q} = 0$. Матрицы E и P источника внешнего гармонического воздействия для режима одночастотного гармонического возбуждения каждого входа системы имеют вид

$$E = \text{diag}\{E_{ii}; i = \overline{1, 2}\}, E_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Поставим задачу оценки чувствительности мажорантных и минорантных частотных характеристик к вариациям перекрестных связей между каналами ФЭСС.

На основании предложенного алгоритма 1 при номинальном значении параметра $\bar{q} = 0$ вычислим матрицы F, G, C

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -20 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 1 \\ -20 & 0 & -100 & 2 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 20 & -4 \\ 0 & 0 \\ 20 & 100 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрицы F_q, G_q получим прямым дифференцированием матриц $F(q)$ и $G(q)$ по параметру q

$$F_q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ -20 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, G_q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Приведем шаги оценки чувствительности мажорантных и минорантных частотных характеристик на основании алгоритма 1.

Шаг 1. Для заданного текущего значения частоты ω сконструируем вещественнозначное решение уравнение Сильвестра для $q = 0$ с помощью соотношения (30), которое примет вид:

$$T(\omega) = -(\omega^2 I + F^2)^{-1} \text{row}\{[FG_i \quad \omega G_i], i = \overline{1, m}\}.$$

Выполним конструирование критериальных матриц $\Pi_y(\omega)$ и $\Pi_e(\omega)$ с помощью (21).

Шаг 2. Вычислим сингулярные разложения критериальных матриц в форме (22).

Шаг 3. Вычислим матрицу сепаратной чувствительности $T_{qj}(\omega)$, используя представление (31) и матрицы чувствительности $\Pi_{yqj}(\omega)$ и $\Pi_{eqj}(\omega)$ с помощью (23).

Шаг 4. Сконструируем матрицы $S_{y_j}(\omega)$ и $S_{e_j}(\omega)$ с помощью соотношений (25).

Шаг 5. Вычислим функции чувствительности мажорантных и минорантных АЧХ вход–выход и относительной частотной ошибки с помощью (26) и (27).

Шаг 6. Рассчитаем конечные вариации мажорантных и минорантных частотных характеристик вход–выход и относительной частотной ошибки (28) и (29).

На рис. 1 показаны кривые функций чувствительности $M_q(\omega)$ мажорантной (1) и минорантной (2) АЧХ вход–выход. Вычисление функций чувствительности выполнено в диапазоне частот ω , характеризующихся наиболее существенными изменениями, которые позволили обнаружить два резонансных пика.

На рис. 2 приведены кривые $M_{yM}(\omega)$ мажорантной (1) и $M_{ym}(\omega)$ минорантной (2) АЧХ ФЭСС при номинальном значении параметра $\bar{q} = 0$, а также соответствующие им кривые $M_{yM}(\omega, q)$ мажорантной (3) и

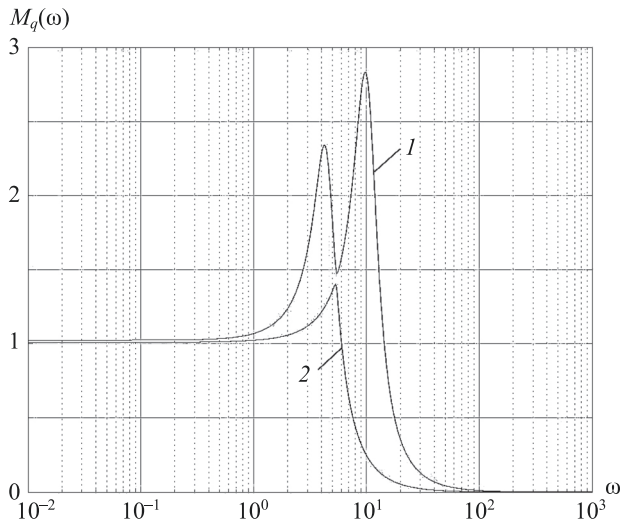


Рис. 1. Кривые функций чувствительности амплитудно-частотных характеристик: 1 — мажорантной $M_{yMq}(\omega)$ и 2 — минорантной $M_{ymq}(\omega)$

Fig. 1. Sensitivity function curves: 1 — majorant $M_{yMq}(\omega)$ and 2 — minorant $M_{ymq}(\omega)$ amplitude-frequency characteristics

$M_{ym}(\omega, \mathbf{q})$ минорантной (4) АЧХ с учетом их конечных вариаций, порожденных конечной вариацией Δq параметра q .

На рис. 2 знаками «*» и «°» отмечены мажоранта и миноранта частотного показателя колебательности.

На рис. 3 приведены кривые: $\delta_M(\omega)$ мажорантной (1) и $\delta_m(\omega)$ минорантной (2) относительной частотной ошибки ФЭСС при номинальном значении параметра $\bar{q} = 0$, а также соответствующие им кривые $\delta_M(\omega, \mathbf{q})$ мажорантной (3) и $\delta_m(\omega, \mathbf{q})$ минорантной (4) относи-

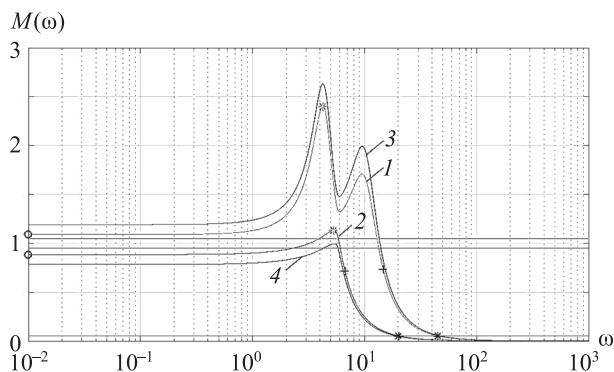


Рис. 2. Кривые амплитудно-частотных характеристик фотоэлектрической следящей системы: мажорантной (1) $M_{yM}(\omega)$ и минорантной (2) $M_{ym}(\omega)$ при номинальном значении параметра $\bar{q} = 0$; мажорантной (3), минорантной (4) при параметрических вариациях

Fig. 2. Amplitude-frequency response curves for: majorant (1) $M_{yM}(\omega)$ and minorant (2) $M_{ym}(\omega)$ photoelectric tracking system at nominal value of parameter $\bar{q} = 0$; majorant (3), minorant (4) at parametric variations

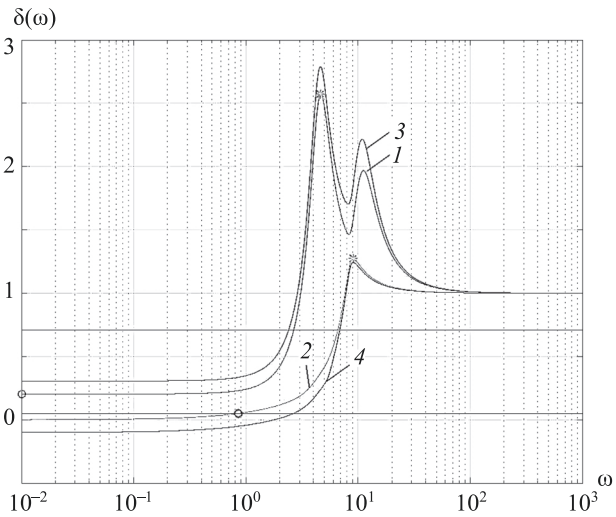


Рис. 3. Кривые $\delta_M(\omega)$ мажорантной (1) и $\delta_m(\omega)$ минорантной (2) относительной частотной ошибки при номинальном значении параметра $\bar{q} = 0$, мажорантной $\delta_M(\omega, \mathbf{q})$ (3) и минорантной $\delta_m(\omega, \mathbf{q})$ (4) относительной частотной ошибки, порожденных конечной вариацией Δq параметра q

Fig. 3. Curves of the majorant $\delta_M(\omega)$ (1) and minorant $\delta_m(\omega)$ (2) relative frequency error at the nominal value of the parameter $\bar{q} = 0$, majorant $\delta_M(\omega, \mathbf{q})$ (3) and minorant $\delta_m(\omega, \mathbf{q})$ (4) relative frequency error generated by the finite variation Δq of the parameter q

тельной частотной ошибки, порожденных конечной вариацией Δq параметра q .

На рис. 3 знаком «*» отмечены максимальное и минимальное значение относительной частотной ошибки, знаком «°» — мажоранта и миноранта полос пропускания многомерной системы на заданном уровне.

Функции чувствительности мажорант и минорант частотных характеристик позволяют оценить чувствительность таких частотных показателей качества как, например, мажоранты и миноранты показателя колебательности и полос пропускания.

Заключение

Решена задача исследования чувствительности эллипсоидных амплитудно-частотных характеристик многомерных динамических систем к вариациям параметров с помощью построения эллипсоидных оценок частотных функций чувствительности по состоянию, выходу и ошибке линейных многомерных непрерывных систем с использованием сингулярного разложения матриц, составленных из функций частотной параметрической чувствительности. Концепция подобия позволяет с единых алгоритмических позиций построить частотные передаточные матрицы многомерных систем для одночастотного и многочастотного случаев возбуждения входов систем гармоническим экзогенным воздействием для решения задачи синтеза частотно-робастных систем.

Литература

1. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981. 464 с.
2. Оморов Р.О. Робастность интервальных динамических систем. I. Робастность непрерывных линейных интервальных динамических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 1995. № 1. С. 22–27.
3. Оморов Р.О. Робастность интервальных динамических систем. II. Робастность дискретных линейных интервальных динамических систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 1995. № 3. С. 3–7.
4. Оморов Р.О. Максимальная грубость динамических систем // Автоматика и телемеханика. 1991. № 8. С. 36–45.
5. Оморов Р.О. Алгебраический метод исследования робастности интервальных динамических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 364–370. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-3-364-370>
6. Ушаков А.В. Модальные оценки качества процессов управления многомерными системами при гармоническом внешнем воздействии // Автоматика и телемеханика. 1989. № 11. С. 76–85.
7. Акунов Т.А., Алишеров С., Оморов Р.О., Ушаков А.В. Модальные оценки качества процессов в линейных многомерных системах. Бишкек: Илим, 1991. 59 с.
8. Ушаков А.В. Обобщенное модальное управление // Известия вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43. № 3. С. 8–16.
9. Акунов Т.А., Сударчиков С.А., Ушаков А.В. Обеспечение стабильности показателей качества в задачах управления динамическим объектом с интервальными параметрами при конечно-мерном экзогенном воздействии // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2005. № 19. С. 60–66.
10. Бобцов А.А., Никитов В.О., Пыркин А.А., Слита О.В., Ушаков А.В. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 277 с.
11. Никитов В.О., Ушаков А.В. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 232 с.
12. Дударенко Н.А., Нуйя О.С., Сержантова М.В., Слита О.В., Ушаков А.В. Математические основы теории систем: лекционный курс и практикум. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 292 с.
13. Хорн Р., Джонсон Дж. Матричный анализ. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 655 с.
14. Акунов Т.А., Ушаков А.В. Анализ чувствительности эллипсоидных оценок многомерных процессов управления // Известия вузов. Приборостроение. 1991. № 8.
15. Дударенко Н.А., Ушаков А.В. Анализ вырождения сложной динамической системы с антропокомпонентами // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 33. С. 62–68.
16. Akunova A., Akunov T.A., Ushakov A.V. Degeneration of complex systems under multifrequent input signal // Proc. of the 2nd International Conference. Control of Oscillations and Chaos. Proceedings (Cat. No.00TH8521). V. 1, 2000. P. 101–104. <https://doi.org/10.1109/coc.2000.873521>
17. Оморов Р.О., Акунов Т.А., Айдралиев А.О. Эллипсоидные оценки траекторной чувствительности многомерных процессов на основе обобщенной проблемы сингулярных чисел // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 2. С. 239–245. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-239-245>

Авторы

Оморов Роман Оморович — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Кыргызской Республики, Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, 720071, Кыргызская Республика, [sc 6602708366](https://orcid.org/0000-0003-3555-1323), <https://orcid.org/0000-0003-3555-1323>, romano_ip@list.ru

Акунова Акылай — кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Институт машиноведения и автоматизации Национальной

References

1. Rozenvasser E.N., Iusupov R.M. *Sensitivity of Automatic Control Systems*. Moscow, Jenergiya Publ., 1981, 464 p. (in Russian)
2. Omorov R.O. Robustness of interval dynamic systems. I. Robustness in continuous linear interval dynamic systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1996, vol. 34, no. 3, pp. 69–74.
3. Omorov R.O. Robustness of interval dynamical systems. II. Robustness of discrete linear interval dynamical systems. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1996, vol. 34, no. 4, pp. 1–5.
4. Omorov R.O. Maximal robustness of dynamical systems. *Automation and Remote Control*, 1991, vol. 52, no. 8, pp. 1061–1068.
5. Omorov R.O. Robustness research of interval dynamic systems by algebraic method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 364–370. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-3-364-370>
6. Ushakov A.V. Model performance estimates of control processes in multidimensional systems with a harmonic exogenous signal. *Automation and Remote Control*, 1989, vol. 50 no. 11, pp. 1521–1528.
7. Akunov T.A., Alisherov S., Omorov R.O., Ushakov A.V. *Modal Estimations of Quality of Processes in Linear Multivariable Systems*. Bishkek, Ilim Publ., 1991, 59 p. (in Russian)
8. Ushakov A.V. Generalized modal control. *Journal of Instrument Engineering*, 2000, vol. 43, no. 3, pp. 8–16. (in Russian)
9. Akunov T.A., Sudarchikov S., Ushakov A.V. Ensuring the stability of quality indicators in the problems of controlling a dynamic object with interval parameters under a finite-dimensional exogenous action. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2005, no. 19, pp. 60–66. (in Russian)
10. Bobtsov A.A., Nikiforov V.O., Pyrkina A.A., Slita O.V., Ushakov A.V. *Methods of Adaptive and Robust Control of Non-Linear Objects in Instrument Engineering*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013, 277 p. (in Russian)
11. Nikiforov V.O., Ushakov A.V. *Control Under Uncertainty: Sensitivity, Adaptation, Robustness*. St. Petersburg, ITMO, 2002, 232 p. (in Russian)
12. Dudarenko N.A., Nuiia O.S., Serzhantova M.V., Slita O.V., Ushakov A.V. *Mathematical Foundations of Systems Theory: Lecture Course and Practical Training*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2014, 292 p. (in Russian)
13. Horn R.A., Johnson Ch.R. *Matrix Analysis*. Cambridge University Press, 1985, 561 p.
14. Akunov T.A., Ushakov A.V. Sensitivity analysis of ellipsoid estimates of multivariate control processes. *Journal of Instrument Engineering*, 1991, no. 8. (in Russian)
15. Dudarenko N.A., Ushakov A.V. Analysis of the degeneration of a complex dynamic system with anthropocomponents. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, no. 33, pp. 62–68. (in Russian)
16. Akunova A., Akunov T.A., Ushakov A.V. Degeneration of complex systems under multifrequent input signal. *Proc. of the 2nd International Conference. Control of Oscillations and Chaos. Proceedings (Cat. No.00TH8521)*. V. 1, 2000, pp. 101–104. <https://doi.org/10.1109/coc.2000.873521>
17. Omorov R.O., Akunov T.A., Aidraliev A.O. Ellipsoidal estimates of trajectory sensitivity of multi-dimensional processes based on generalized singular values problems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 22, no. 2, pp. 239–245. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-239-245>

Authors

Roman O. Omorov — D.Sc., Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Machinery Researching and Automatics Institute of Kyrgyz Republic National Academy of Sciences, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, [sc 6602708366](https://orcid.org/0000-0003-3555-1323), <https://orcid.org/0000-0003-3555-1323>, romano_ip@list.ru

Akylai Akunova — PhD, Chief Researcher, Machinery Researching and Automatics Institute of Kyrgyz Republic National Academy of

академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, 720071, Кыргызская Республика, [sc 7801308323](https://orcid.org/0000-0003-0684-4063), <https://orcid.org/0000-0003-0684-4063>, aakunova@mail.ru

Акунов Таалайбек Абакирович — кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, 720071, Кыргызская Республика, [sc 6508211498](https://orcid.org/0000-0002-0923-9777), <https://orcid.org/0000-0002-0923-9777>, takunov@mail.ru

Sciences, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, [sc 7801308323](https://orcid.org/0000-0003-0684-4063), <https://orcid.org/0000-0003-0684-4063>, aakunova@mail.ru

Taalaibek A. Akunov — PhD, Chief Researcher, Machinery Researching and Automatics Institute of Kyrgyz Republic National Academy of Sciences, Bishkek, 720071, Kyrgyz Republic, [sc 6508211498](https://orcid.org/0000-0002-0923-9777), <https://orcid.org/0000-0002-0923-9777>, takunov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.01.2023
Одобрена после рецензирования 28.03.2023
Принята к печати 27.05.2023

Received 26.01.2023
Approved after reviewing 28.03.2023
Accepted 27.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-465-472

УДК 539.234

Фрактальные микро- и нанодендриты из серебра, меди и их соединений для фотокаталитического разложения воды

Александр Иванович Сидоров^{1✉}, Павел Андреевич Безруков²,
Алексей Викторович Нашекин³, Николай Валентинович Никоноров⁴

^{1,2,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

¹ sidorov@oi.ifmo.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8730-4389>

² pawqa1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5415-8749>

³ nashchekin@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2542-7364>

⁴ Nikonorov@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

Аннотация

Введение. Представлены результаты исследования морфологии и фотокаталитического разложения воды тонких нанопористых пленок в виде фрактальных дендритов из серебра и меди, а также их соединений — йодида и оксида. **Метод.** Нанопористые слои из серебра и меди синтезированы методом химической реакции замещения на металлических подложках. Йодирование проведено в парах йода. Оксидирование выполнено путем нагрева на воздухе. Изучение морфологии и состава синтезированных слоев осуществлено с помощью сканирующего электронного микроскопа. **Основные результаты.** Показано, что уже через 2–3 с после начала реакции на подложках формируются металлические нанопористые слои толщиной до 1 мкм. Слои серебра состоят из кристаллических гексагональных пластин и микро- и нанодендритов. В случае реакции замещения с солью меди сразу происходит формирование слоя, состоящего из медных микродендритов. Внутренний квантовый выход фотокатализа воды для слоев с серебром и медью, а также слоев металл-полупроводник составил 0,4–0,45 %. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы для создания фотокатодов с большой поверхностью для фотокаталитического разложения воды с целью получения водородного топлива.

Ключевые слова

нанопористый слой, серебро, медь, морфология, фотокатализ

Благодарности

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-19-00559.

Электронно-микроскопические исследования выполнены с использованием оборудования Федерального центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Ссылка для цитирования: Сидоров А.И., Безруков П.А., Нашекин А.В., Никоноров Н.В. Фрактальные микро- и нанодендриты из серебра, меди и их соединений для фотокаталитического разложения воды // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 465–472. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-465-472

Fractal micro- and nanodendrites of silver, copper and their compounds for photocatalytic water splitting

Alexander I. Sidorov^{1✉}, Pavel A. Bezrukov², Alexey V. Nashchekin³, Nikolay V. Nikonorov⁴

^{1,2,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

³ Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

¹ sidorov@oi.ifmo.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-8730-4389>

² pawqa1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5415-8749>

³ nashchekin@mail.ioffe.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2542-7364>

⁴ Nikonorov@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

© Сидоров А.И., Безруков П.А., Нашекин А.В., Никоноров Н.В., 2023

Abstract

The results of investigation of morphology and photocatalytic properties of thin films in a form of dendrites of silver and copper, and their compounds synthesized by the reaction of substitution, are presented. The morphology and the composition of the synthesized layers were performed by scanning electron microscope. It was shown that already through 2–3 s after the reaction beginning metal nanoporous layers up to 1 μm thick are formed on the substrates. Silver layers consist of micro-crystalline hexagonal plates and micro- and nano-dendrites. As the duration of the reaction increases the layers become more compacted, and the minimum of the pores size becomes 20 nm. In the case of the reaction with the copper salt the formation of copper microdendrites takes place immediately. The internal quantum yield of photocatalysis of water for silver and copper layers as well as for metal-semiconductor layers is 0.4–0.45 %. The obtained results can be used for the creation of photocathodes with large surface for photocatalytic water splitting in order to obtain hydrogen fuel.

Keywords

nanoporous layer, silver, copper, morphology, photocatalysis

Acknowledgements

This work was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 20-19-00559). SEM characterization were performed using equipment owned by the Federal Joint Research Center “Material Science and Characterization in Advanced Technology” with financial support by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

For citation: Sidorov A.I., Bezrukov P.A., Nashchekin A.V., Nikonov N.V. Fractal micro- and nanodendrites of silver, copper and their compounds for photocatalytic water splitting. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 465–472 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-465-472

Введение

Фотоэлектрохимический (ФЭХ) катализ является привлекательным процессом для преобразования и накопления солнечной энергии. В основе одного из методов лежит ФЭХ разложение воды на водород и кислород, что является идеальным для «зеленых» технологий [1]. ФЭХ разложение воды впервые было продемонстрировано в 1972 году при облучении диоксид титана ультрафиолетовым излучением [2]. С тех пор основными задачами являются повышение эффективности фотокаталитического разложения воды, повышение устойчивости и долговечности фотоэлектродов и снижение их стоимости. В последние годы был достигнут ряд успехов при создании полупроводниковых фотоэлектродов [3–5]. Перспективными направлениями являются также металлические фотоэлектроды [6] и фотоэлектроды гибридного типа металл-полупроводник и полупроводник-полупроводник [7–15]. В фотокатализаторах часто используют слои нанокмполитов, сочетающих наночастицы благородных металлов (золото, серебро) или меди с полупроводниковыми наночастицами, обладающими фотокаталитическими свойствами. При плазмонном резонансе в металлических наночастицах [16, 17] происходит локальное усиление амплитуды поля электромагнитной волны вблизи наночастицы и увеличение поглощения. Это позволяет существенно увеличить эффективность фотокатализа полупроводниковых наночастиц. Однако плазмонные резонансы в металлических наночастицах существуют в ограниченном спектральном интервале. Металлические наноструктуры и нанопористые металлы, благодаря существованию в них поверхностных плазмонов, способны локализовать электромагнитное поле в наноразмерных областях и преобразовывать его в другие формы энергии. Во фрактальных металлических наноструктурах могут формироваться «горячие точки», в которых интенсивность поля электромагнитной волны возрастает в тысячи раз [18, 19]. При этом возникают горячие электроны и дырки, которые участвуют в ФЭХ процессе. Такие металлические наноструктуры могут

самостоятельно играть роль фотоэлектродов, либо сочетаться с полупроводниковым фотокатализатором [20]. Достоинство металлических наноструктур — в них поверхностные плазмоны существуют в широком спектральном интервале, выше плазменной длины волны металла. Нанопористые металлы также находят применение в химических и биосенсорах для усиления рамановского рассеяния (SERS) [21–23].

Существует большое количество методов синтеза металлических нанопористых слоев: химическое и вакуумное нанесение, электронно-лучевая литография, лазерная абляция и т. д. [24–28]. Однако большинство этих методов являются многоступенчатыми и требуют сложного и дорогого оборудования. Это снижает практическую значимость данных методов для солнечной энергетики.

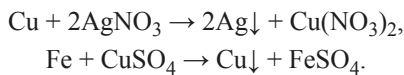
Цель настоящей работы — исследование возможности синтеза микро- и нанопористых слоев серебра, меди и их соединений в виде фрактальных дендритов одноступенчатым методом, использующим реакции замещения, а также изучение их морфологии и фотокаталитических свойств применительно к ФЭХ разложению воды.

Материалы и методы

В качестве подложек для металлических нанопористых слоев использованы полированные пластины из меди марки М1 (ГОСТ 859-2014¹, 99,9 %, возможны примеси Zn, Ni, P, Fe, As, O, Sn, Bi), а также из электролитического железа (возможны примеси C, Si, Mn, S, P). При этом суммарная концентрация примесей не более 0,1 %. Достоинство металлических подложек — они являются естественной проводящей основой для фотоэлектрода. Подложки имеют размеры 10 × 10 мм² и толщину 0,5 мм. Выбор материалов подложек определен рядом химической активности металлов. Для син-

¹ ГОСТ 859-2014 Медь. Введен. 01.07.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 5 с.

теза пористых слоев из серебра и меди использованы следующие реакции замещения:



Перед проведением синтеза подложки были промыты в ацетоне. Для синтеза пористого слоя из серебра подложки из меди были погружены в водный раствор азотнокислого серебра (AgNO_3 , 3,75 вес.%). Для синтеза пористых слоев меди подложки из железа были погружены в водный раствор сульфата меди ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 5 вес.%). Реакции исследованы при комнатной температуре без перемешивания растворов. Продолжительность реакции, которая составила от 1 с до 2 мин, и концентрации растворов были определены на основании предварительных экспериментов. После проведения реакций образцы были промыты дистиллированной водой и высушены.

Оценка увеличения площади поверхности после проведения реакции выполнена с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM 7001 F по СЭМ-изображениям. Для этого на единице площади подсчитывалось количество дендритов, имеющих одинаковые размеры. Затем их площади суммировались.

Для проведения частичного йодирования полученные пористые слои серебра и меди помещались в насыщенные пары йода в воздушной атмосфере при комнатной температуре на 1–10 мин. Для частичного окисления пористых слоев меди подложки с пористыми слоями меди помещались в программируемые печи (Nabertherm), нагретые до температуры 400 °C на 10 мин. Окисление проводилось в воздушной атмосфере. Структура и морфология пористых слоев изучена с помощью СЭМ, оборудованного системой для рентгеновского энергодисперсионного (EDX) анализа INCA PentaFETx (Oxford Instruments, England).

Для проведения ФЭХ разложения воды образцы были помещены в ячейку, заполненную водным раствором нитрата натрия (1 вес.%), и освещены через окно из кварцевого стекла. В качестве источника света использован осветитель Novacure 2100 с ртутной лампой мощностью 3 Вт и спектральным интервалом излучения 250–500 нм. На фотокаталитическую ячейку подавалось постоянное напряжение $U = 0,5\text{--}5$ В через балластный резистор 1 кОм. Средняя погрешность измерений и обработки результатов равна $\pm 0,7\%$.

Определим внутреннюю квантовую эффективность фотокатализа η [29]:

$$\eta = \frac{N_e}{N_p} = \frac{I_p \hbar \omega}{P_{ab} e},$$

где N_e — количество фотоэлектронов; N_p — количество поглощенных фотонов; I_p — фототок; P_{ab} — поглощенная энергия; ω — частота излучения; e — заряд электрона.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показана морфология микро- и наноструктур из серебра на подложке из меди при различной

продолжительности реакции. При малой продолжительности реакции на подложке сформированы пластины из серебра размером менее 1 мкм, многие из которых имеют неправильную форму (рис. 1, *a*). При увеличении продолжительности реакции размер пластин увеличился до нескольких микрометров, и они приобрели гексагональную форму (рис. 1, *b*). Средняя толщина пластин составила 100–200 нм. При этом на гранях серебряных пластин сформированы микродендриты из серебра, длина которых достигла 3 мкм. При дальнейшем увеличении времени реакции плотность микродендритов увеличилась, а их длина достигла 6 мкм (рис. 1, *c*).

При продолжительности реакции более 1 мин происходит уплотнение слоя, он превращается в однородный нанопористый слой серебра с размером пор 50–100 нм (рис. 1, *d*).

EDX-карта части СЭМ-изображения (рис. 2) подтверждает появление серебряных наноструктур на медной подложке.

Исследование увеличения площади нанопористого слоя относительно площади подложек выполнено на основании обработки СЭМ-изображения. В результате увеличение составило: $5,6 \cdot 10^3$ раз для морфологии на рис. 1, *a*; $12,4 \cdot 10^3$ раз для рис. 1, *b*; $42,4 \cdot 10^3$ раз для рис. 1, *c*. Отметим, что в приведенных оценках увеличения не учтен вклад в площадь «наноигл» длиной менее 50 нм.

На рис. 3 показано СЭМ-изображение медного слоя на подложке из железа. Видно, что медные микродендриты растут непосредственно на поверхности железной подложки. Предположительно, это может быть связано с различием валентного состояния меди и серебра в растворе: ионы меди находятся в двухвалентном состоянии (Cu^{2+}), а ионы серебра в одновалентном (Ag^+). Медные микродендриты заполняют поверхность подложки с высокой плотностью (рис. 3, *a*). Увеличение площади нанопористого слоя относительно площади подложки, полученное на основании обработки СЭМ-изображений (рис. 3), составляет $58,2 \cdot 10^3$ раз.

Рассмотрим структуру и морфологию на примере медного микродендрита. Из рис. 3, *b* видно, что микродендрит состоит из «ствола», длина которого достигает 3 мкм, от которого отделены «ветви» длиной 300–800 нм. На «ветвях» расположены «иглы». Длина «игл» достигает 200 нм, а их толщина лежит в пределах 15–20 нм. На «иглах» расположены «иглы» меньшего размера («наноиглы»): длиной 20–25 нм и толщиной 10–15 нм (рис. 3, *c*).

Механизмы формирования и роста фрактального ансамбля наночастиц в форме дендрита существенно зависят от метода и условий его синтеза. Для описания этих процессов, как правило, используют агрегационные модели наночастица–кластер [30]. Наиболее часто в качестве механизмов ассоциации используют ограниченную диффузией агрегацию и баллистическую агрегацию. В настоящей работе в процессе формирования и роста фрактального микродендрита использованы оба механизма.

В результате йодирования или окисления морфология микродендритов сохранилась. После йодиро-

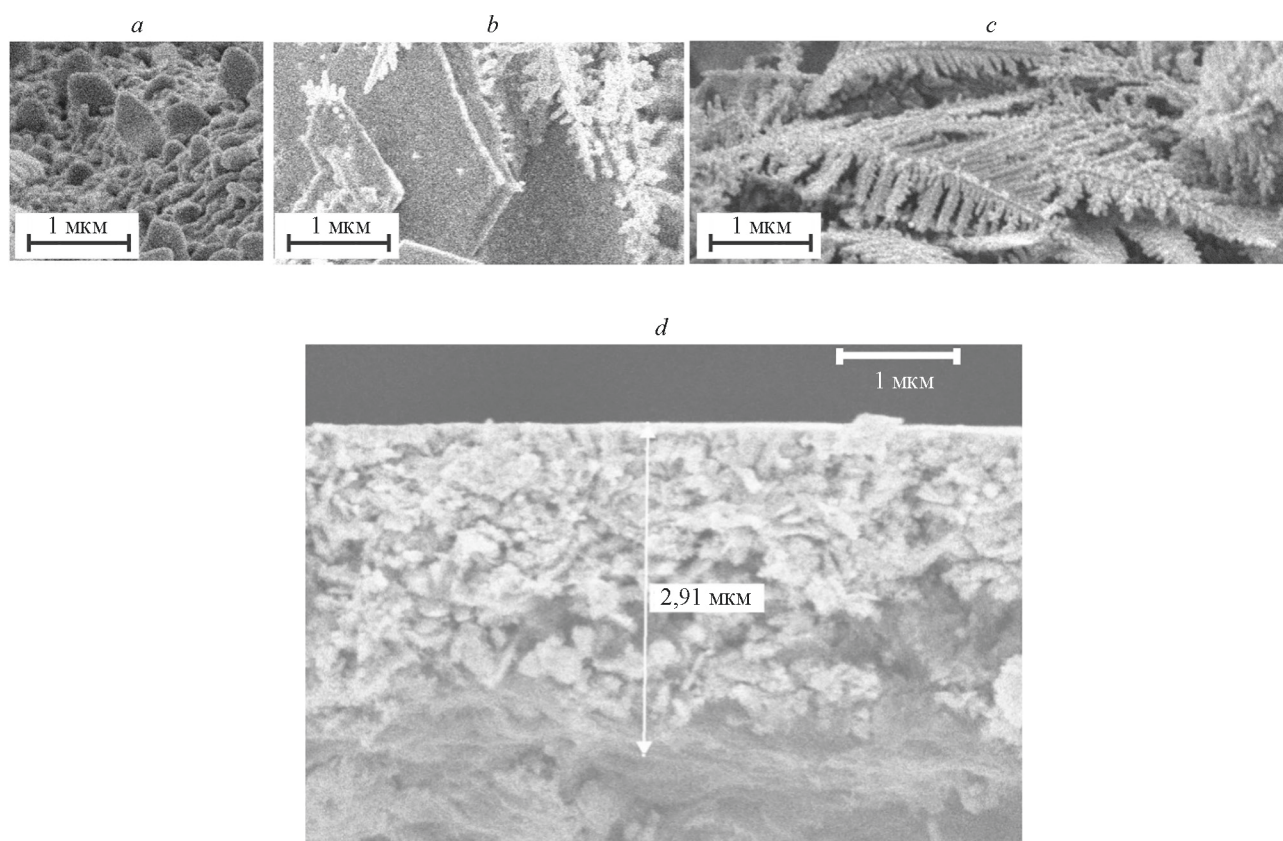


Рис. 1. Морфология пористого слоя из серебра (а–с) и в поперечном сечении (d) на подложке из меди.

Продолжительность реакции: 1 с (а); 4 с (b); 10 с (с); 2 мин (d)

Fig. 1. Morphology of a porous layer of silver (a–c) and in cross section (d) on a copper substrate.

Reaction duration: 1 s (a); 4 s (b); 10 s (c); 2 min (d)

вания слои микродендритов из серебра и меди стали светло-желтыми. После окисления слои микродендритов из меди изменили окраску от красно-коричневой до черной. Это указывает на образования оксида

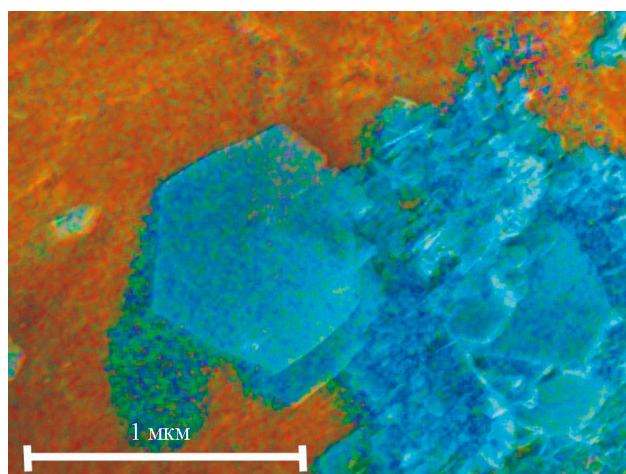


Рис. 2. EDX-карта части СЭМ-изображения. Серебро — голубой цвет, медь — коричневый цвет. Продолжительность реакции 4 с

Fig. 2. EDX map of a part of SEM-image. Silver — blue color, copper — brown color. The duration of reaction is 4 s

меди, близкого по составу к CuO . На рис. 4 показано СЭМ-изображение микродендритов из йодида серебра. Продолжительность йодирования равна 5 мин. Заметно, что в результате йодирования произошло увеличение толщины «ветвей» и «игл» микродендритов. Причиной этого является меньшая плотность йодида серебра, по сравнению с серебром¹.

При помещении фотокатода из нанопористого серебра или меди в фотокаталитическую ячейку и подаче светового потока на фотокатод, в цепи возникает фототок, что указывает на появление ФЭХ реакции.

Зависимости внутренней квантовой эффективности от напряжения на фотокаталитической ячейке для фотокатодов из серебра и меди показаны на рис. 5, а. Видно, что при напряжении менее 1 В квантовая эффективность слабо зависит от материала фотокатода. При увеличении напряжения происходит рост квантовой эффективности, а при $U > 3,8$ В — насыщение. Максимальная квантовая эффективность у фотокатода из серебра составила 0,45 %, которая больше значения для фотокатода из меди. Причиной этого может быть то, что плазменная длина волны серебра равна 390 нм, а меди — 550 нм [16, 17]. И поэтому поверхностные плазмоны в серебре возбуждаются в более широком

¹ Big Chemical Encyclopedia. chempedia. info. 12.06.2022.

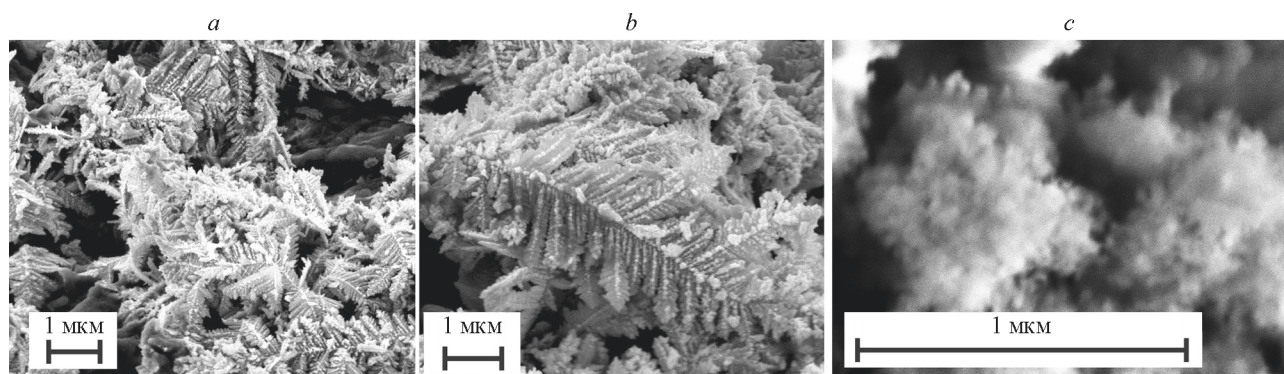


Рис. 3. Морфология пористого слоя меди на подложке из железа. Продолжительность реакции 4 с
Fig. 3. Morphology of copper porous layer on iron substrate. Duration of reaction is 4 s

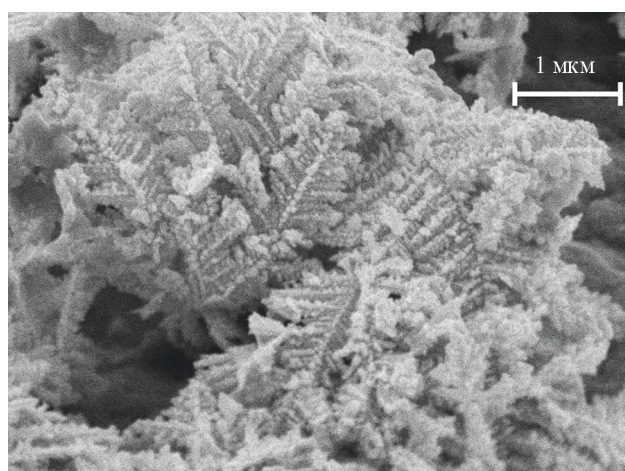


Рис. 4. Морфология пористого слоя из йодида серебра на подложке из меди. Продолжительность реакций: замещения 4 с, йодирования 5 мин

Fig. 4. Morphology of silver iodine porous layer on copper substrate. The duration of reaction is 4 s. The duration of iodizing is 5 min

спектральном интервале, где происходит локальное усиление поля электромагнитной волны и появление «горячих точек».

Зависимости квантовой эффективности от напряжения на фотокаталитической ячейке для микродендритов металл-полупроводник после частичного йодирования или окисления металла показаны на рис. 5, *b*. Видно, что увеличение напряжения приводит к увеличению квантовой эффективности. При $U > 3$ В для йодида серебра и йодида меди происходит насыщение зависимостей. Максимальная квантовая эффективность для йодида серебра составляет 0,42 %. Для оксида меди в рассмотренном диапазоне напряжений насыщения не происходит.

Эффективность фотокатализа материалами, полученными новым методом, сопоставима с другими материалами, описанными в работах [7–15]. В то же время, использованный метод синтеза значительно дешевле других, и позволяет создавать фотокатоды на большой площади.

Известно, что существует два типа фотоэффекта: объемный и поверхностный [31]. Для первого типа электрон поглощает фотон и переходит в «горячее» состояние в объеме металла. Однако, когда он движется

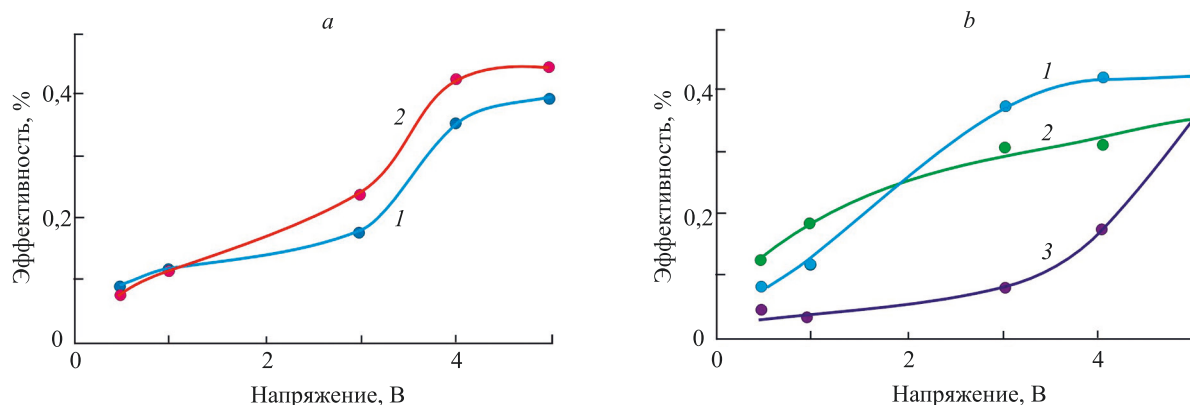


Рис. 5. Зависимости внутренней квантовой эффективности от напряжения на фотокаталитической ячейке для материалов: микродендритов меди (кривая 1) и серебра (кривая 2) (*a*); полупроводников йодида серебра (кривая 1), йодида меди (кривая 2) и оксида меди (кривая 3) (*b*)

Fig. 5. Dependence of internal quantum efficiency vs. voltage in photocatalytic cell. Material of microdendrites: 1 — Cu, 2 — Ag (*a*). Dependence of internal quantum efficiency vs. voltage in photocatalytic cell. Material of semiconductors: 1 — AgI, 2 — CuI, 3 — CuO (*b*)

из объема металла к границе раздела сред, он теряет часть энергии за счет столкновений с термализованными электронами. Для второго типа электрон поглощает энергию фотона на границе раздела сред, и у него есть возможность выйти из металла без потерь энергии. Электрон после выхода из металла в электролит способен восстанавливать ионы водорода. Очевидно, что для фотокатализа представляет интерес именно поверхностный фотоэффект. В случае фрактальных металлических микродендритов с развитой поверхностью поверхностный фотоэффект позволяет увеличить эффективность фотокатализа. Благодаря приложенному к фотокаталитической ячейке напряжению происходит инжекция электронов в металл. Это позволяет восстановить его электронейтральность.

Как видно из рис. 3, на поверхности микродендритов присутствуют «наноиглы», толщина которых составляет 10–15 нм. При приложении электрического поля, согласно электростатической теории, вблизи таких металлических «наноигл» напряженность электрического поля может достигать десятков-сотен кВ/см [32]. В таких условиях из острия «игл» возникает автоэлектронная эмиссия [32]. Эмиссия электронов может возникать как при приложении к фотокаталитической ячейке постоянного напряжения, так и за счет электрической составляющей поля электромагнитной волны. Таким образом, в случае металлических микро- и нанодендритов автоэлектронная эмиссия может вносить вклад в процесс фотокатализа.

Рассмотрим возможный вклад нагрева электролита в процессы фотокатализа. Нанопористые металлические слои поглощают практически всю энергию падающего излучения. Поглощенная энергия, в конечном счете, превращается в тепло. Это приводит к появлению нагретого слоя электролита вблизи нанопористого слоя металла. Кроме того, в «горячих точках» из-за существенного увеличения интенсивности электромагнитной волны происходит локальный нагрев электролита в наномасштабах. В случае автоэлектронной эмиссии через «наноиглу» протекает электрический ток высокой плотности, что сопровождается нагревом острия «иглы». По этой причине автоэмиссионные катоды изготавливают из материалов с высокой температурой плавления, например, из вольфрама. В результате происходит локальный нагрев электролита в наномасштабах, что может приводить к локальному усилению кавитации и образованию микро- и нанопузырьков газа. Удельная электропроводность разбавленных электролитов растет с ростом температуры. Таким образом, нагрев электролита вблизи фотокатода также

может увеличивать эффективность разложения воды. В случае структур металл-полупроводник происходят аналогичные процессы. Известно, что галогениды серебра и меди, а также оксиды меди сами по себе обладают фотокаталитическими свойствами [10–13]. Однако при инжекции электронов из металла фотокаталитическая активность материалов увеличивается и расширяется спектральный диапазон проявления активности.

При проведении йодирования или окисления микродендритов из серебра и меди на границе металл-полупроводник формируется тонкий промежуточный слой с пониженным содержанием йода/кислорода. Характеристики этого слоя существенно отличаются от характеристик соответствующего металла и полупроводника. Наличие этого слоя может оказывать существенное влияние на внутреннюю квантовую эффективность фотокатализа структур металл-полупроводник. Наличие барьера Шоттки и квантовой ямы на границе металл-полупроводник может существенно увеличивать эффективность фотокатализа [8, 9]. Однако для определения характеристик промежуточного слоя в структурах металл-полупроводник в описанных случаях необходимо проведение дополнительного цикла экспериментов.

Заключение

Эксперименты показали, что микро- и нанопористые слои из серебра и меди с высокой плотностью пор могут быть синтезированы с использованием реакций замещения. На начальной стадии синтеза серебряных слоев образуются серебряные кристаллические пластины гексагональной формы. При продолжении реакции на них формируются серебряные микродендриты. В случае медных слоев микродендриты возникают сразу. При увеличении длительности реакции происходит уплотнение нанопористых слоев. Йодирование синтезированных нанопористых металлических слоев позволяет создавать гибридные наноструктуры металл-полупроводник. Металлические слои, а также слои металл-полупроводник обладают фотокаталитическими свойствами. Внутренняя квантовая эффективность фотокатализа составила 0,4–0,45 %. Достоинством описанного метода синтеза нанопористых слоев является то, он происходит с использованием одноступенчатой реакции, относительно недорогих реактивов и не требует сложного оборудования. Получена возможность создания нанопористых слоев на подложках большой площади.

Литература

1. Hoffmann M.R., Martin S.T., Choi W., Bahnemann D.W. Environmental applications of semiconductor photocatalysis // *Chemical Reviews*. 1995. V. 95. N 1. P. 69–96. <https://doi.org/10.1021/cr00033a004>
2. Fujishima A., Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode // *Nature*. 1972. V. 238. N 5358. P. 37–38. <https://doi.org/10.1038/238037a0>
3. Morales-Guio C.G., Stern L.-A., Hu X. Nanostructured hydrotreating catalysts for electrochemical hydrogen evolution // *Chemical Society*

References

1. Hoffmann M.R., Martin S.T., Choi W., Bahnemann D.W. Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical Reviews*, 1995, vol. 95, no. 1, pp. 69–96. <https://doi.org/10.1021/cr00033a004>
2. Fujishima A., Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*, 1972, vol. 238, no. 5358, pp. 37–38. <https://doi.org/10.1038/238037a0>
3. Morales-Guio C.G., Stern L.-A., Hu X. Nanostructured hydrotreating catalysts for electrochemical hydrogen evolution. *Chemical Society*

- Reviews. 2014. V. 43. N 18. P. 6555–6569. <https://doi.org/10.1039/c3cs60468c>
4. Warren S.C., Thimsen E. Plasmonic solar water splitting // *Energy & Environmental Science*. 2012. V. 5. N 1. P. 6446. <https://doi.org/10.1039/c1ee02875h>
5. Gan J., Lu X., Tong Y. Towards highly efficient photoanodes: boosting sunlight-driven semiconductor nanomaterials for water oxidation // *Nanoscale*. 2014. V. 6. N 13. P. 7142–7164. <https://doi.org/10.1039/c4nr01181c>
6. Koya A.N., Zhu X., Ohannesian N., Yanik A.A., Alabastri A., Zaccaria R.P., Krahne R., Shih W.-C., Garoli D. Nanoporous metals: From plasmonic properties to applications in enhanced spectroscopy and photocatalysis // *ACS Nano*. 2021. V. 15. N 4. P. 6038–6060. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10945>
7. Peerakiatkhajohn P., Butburee T., Yun J.-H., Chen H., Richards R.M., Wang L. A hybrid photoelectrode with plasmonic Au@TiO₂ nanoparticles for enhanced photoelectrochemical water splitting // *Journal of Materials Chemistry A*. 2015. V. 3. N 40. P. 20127–20133. <https://doi.org/10.1039/c5ta04137f>
8. Siripala W., Ivanovskaya A., Jaramillo T.F., Baeck S.H., McFarland E.W. A Cu₂O/TiO₂ heterojunction thin film cathode for photoelectrocatalysis // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2003. V. 77. N 3. P. 229–237. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00343-4](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00343-4)
9. Cao J., Luo B., Lin H., Chen S. Synthesis, characterization and photocatalytic activity of AgBr/H₂WO₄ composite photocatalyst // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2011. V. 344. N 1-2. P. 138–144. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2011.05.012>
10. Wang P., Huang B.B., Qin X.Y., Zhang X.Y., Dai Y., Wei J.Y., Whangbo M.H. Ag@AgCl: A Highly efficient and stable photocatalyst active under visible light // *Angewandte Chemie International Edition*. 2008. V. 47. N 41. P. 7931–7933. <https://doi.org/10.1002/anie.200802483>
11. Wang P., Huang B.B., Zhang X.Y., Qin X.Y., Jin H., Dai Y., Wang Z.Y., Wei J.Y., Zhan J., Wang S.Y., Wang J.P., Whangbo M.H. Highly efficient visible-light plasmonic photocatalyst Ag@AgBr // *Chemistry — A European Journal*. 2009. V. 15. N 8. P. 1821–1824. <https://doi.org/10.1002/chem.200802327>
12. Wang P., Huang B.B., Zhang Q.Q., Zhang X., Qin X.Y., Dai Y., Zhan J., Yu J.G., Liu H.X., Lou Z.Z. Highly efficient visible light plasmonic photocatalyst Ag@Ag(Br,I) // *Chemistry — A European Journal*. 2010. V. 16. N 33. P. 10042. <https://doi.org/10.1002/chem.200903361>
13. Jia H., Wong Y.L., Wang B., Xing G., Tsoi C.C., Wang M., Zhang W., Jian A., Sang S., Lei D., Zhang X. Enhanced solar water splitting using plasmon-induced resonance energy transfer and unidirectional charge carrier transport // *Optics Express*. 2021. V. 29. N 21. P. 34810. <https://doi.org/10.1364/OE.440777>
14. Xiang Q.J., Yu J.G., Cheng B., Ong H.C. Microwave-hydrothermal preparation and visible-light photoactivity of plasmonic photocatalyst Ag-TiO₂ nanocomposite hollow spheres // *Chemistry — An Asian Journal*. 2010. V. 5. N 6. P. 1466–1474. <https://doi.org/10.1002/asia.200900695>
15. Zhou H., Sheng X., Xiao J., Ding Zh. Increasing the efficiency of photocatalytic reactions via surface microenvironment engineering // *Journal of the American Chemical Society*. 2020. V. 142. N 6. P. 2738–2743. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b12247>
16. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физмалит, 2010. 480 с.
17. Kreibitz U., Vollmer M. *Optical Properties of Metal Clusters*. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 532 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09109-8>
18. Stockman M.I. Electromagnetic Theory of SERS // *Surface-enhanced Raman scattering*. New York, Springer, 2006. P. 47–65. https://doi.org/10.1007/3-540-33567-6_3
19. Yakimchuk D.V., Kaniukov E.Y., Lepeshov S., Bundyukova V.D., Demyanov S.E., Arzumanyan G.M., Doroshkevich N.V., Mamatkulov K.Z., Bochmann A., Presselt M., Stranik O., Khubezhov S.A., Krasnok A.E., Alù A., Sivakov A. Self-organized spatially separated silver 3D dendrites as efficient plasmonic nanostructures for surface-enhanced Raman spectroscopy applications // *Journal of Applied Physics*. 2019. V. 126. N 23. P. 233105. <https://doi.org/10.1063/1.5129207>
20. Ding Y., Zhang Z. *Nanoporous Metals for Advanced Energy Technologies*. Springer Cham, 2016. 223 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29749-1>
- Reviews, 2014, vol. 43, no. 18, pp. 6555. <https://doi.org/10.1039/c3cs60468c>
4. Warren S.C., Thimsen E. Plasmonic solar water splitting. *Energy & Environmental Science*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 6446. <https://doi.org/10.1039/c1ee02875h>
5. Gan J., Lu X., Tong Y. Towards highly efficient photoanodes: boosting sunlight-driven semiconductor nanomaterials for water oxidation. *Nanoscale*, 2014, vol. 6, no. 13, pp. 7142. <https://doi.org/10.1039/c4nr01181c>
6. Koya A.N., Zhu X., Ohannesian N., Yanik A.A., Alabastri A., Zaccaria R.P., Krahne R., Shih W.-C., Garoli D. Nanoporous metals: From plasmonic properties to applications in enhanced spectroscopy and photocatalysis. *ACS Nano*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 6038. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10945>
7. Peerakiatkhajohn P., Butburee T., Yun J.-H., Chen H., Richards R.M., Wang L. A hybrid photoelectrode with plasmonic Au@TiO₂ nanoparticles for enhanced photoelectrochemical water splitting. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, vol. 3, no. 40, pp. 20127. <https://doi.org/10.1039/c5ta04137f>
8. Siripala W., Ivanovskaya A., Jaramillo T.F., Baeck S.H., McFarland E.W. A Cu₂O/TiO₂ heterojunction thin film cathode for photoelectrocatalysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003, vol. 77, no. 3, pp. 229–237. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(02\)00343-4](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(02)00343-4)
9. Cao J., Luo B., Lin H., Chen S. Synthesis, characterization and photocatalytic activity of AgBr/H₂WO₄ composite photocatalyst. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2011, vol. 344, no. 1-2, pp. 138–144. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2011.05.012>
10. Wang P., Huang B.B., Qin X.Y., Zhang X.Y., Dai Y., Wei J.Y., Whangbo M.H. Ag@AgCl: A Highly efficient and stable photocatalyst active under visible light. *Angewandte Chemie International Edition*, 2008, vol. 47, no. 41, pp. 7931–7933. <https://doi.org/10.1002/anie.200802483>
11. Wang P., Huang B.B., Zhang X.Y., Qin X.Y., Jin H., Dai Y., Wang Z.Y., Wei J.Y., Zhan J., Wang S.Y., Wang J.P., Whangbo M.H. Highly efficient visible-light plasmonic photocatalyst Ag@AgBr. *Chemistry — A European Journal*, 2009, vol. 15, no. 8, pp. 1821–1824. <https://doi.org/10.1002/chem.200802327>
12. Wang P., Huang B.B., Zhang Q.Q., Zhang X., Qin X.Y., Dai Y., Zhan J., Yu J.G., Liu H.X., Lou Z.Z. Highly efficient visible light plasmonic photocatalyst Ag@Ag(Br,I). *Chemistry — A European Journal*, 2010, vol. 16, no. 33, pp. 10042. <https://doi.org/10.1002/chem.200903361>
13. Jia H., Wong Y.L., Wang B., Xing G., Tsoi C.C., Wang M., Zhang W., Jian A., Sang S., Lei D., Zhang X. Enhanced solar water splitting using plasmon-induced resonance energy transfer and unidirectional charge carrier transport. *Optics Express*, 2021, vol. 29, no. 21, pp. 34810. <https://doi.org/10.1364/OE.440777>
14. Xiang Q.J., Yu J.G., Cheng B., Ong H.C. Microwave-hydrothermal preparation and visible-light photoactivity of plasmonic photocatalyst Ag-TiO₂ nanocomposite hollow spheres. *Chemistry — An Asian Journal*, 2010, vol. 5, no. 6, pp. 1466–1474. <https://doi.org/10.1002/asia.200900695>
15. Zhou H., Sheng X., Xiao J., Ding Zh. Increasing the efficiency of photocatalytic reactions via surface microenvironment engineering. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, vol. 142, no. 6, pp. 2738–2743. <https://doi.org/10.1021/jacs.9b12247>
16. Klimov V.V. *Nanoplasmonics*. Pan Stanford Publ., 2014, 460 p.
17. Kreibitz U., Vollmer M. *Optical Properties of Metal Clusters*. Berlin, Springer-Verlag, 1995, 532 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09109-8>
18. Stockman M.I. Electromagnetic Theory of SERS. *Surface-enhanced Raman scattering*. New York, Springer, 2006, pp. 47–65. https://doi.org/10.1007/3-540-33567-6_3
19. Yakimchuk D.V., Kaniukov E.Y., Lepeshov S., Bundyukova V.D., Demyanov S.E., Arzumanyan G.M., Doroshkevich N.V., Mamatkulov K.Z., Bochmann A., Presselt M., Stranik O., Khubezhov S.A., Krasnok A.E., Alù A., Sivakov A. Self-organized spatially separated silver 3D dendrites as efficient plasmonic nanostructures for surface-enhanced Raman spectroscopy applications. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, no. 23, pp. 233105. <https://doi.org/10.1063/1.5129207>
20. Ding Y., Zhang Z. *Nanoporous Metals for Advanced Energy Technologies*. Springer Cham, 2016, 223 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29749-1>

21. Koya A.N., Cunha J., Guo T.-L., Toma A., Garoli D., Wang T., Juodkakis S., Cojoc D., Zaccaria R.P. Novel plasmonic nanocavities for optical trapping-assisted biosensing applications // *Advanced Optical Materials*. 2020. V. 8. N 7. P. 1901481. <https://doi.org/10.1002/adom.201901481>
22. Fujita T. Hierarchical nanoporous metals as a path toward the ultimate three-dimensional functionality // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2017. V. 18. N 1. P. 724–740. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1377047>
23. Pshenova A.S., Sidorov A.I., Antropova T.V., Nashchekin A.V. Luminescence enhancement and SERS by self-assembled plasmonic silver nanostructures in nanoporous glasses // *Plasmonics*. 2019. V. 14. N 1. P. 125–131. <https://doi.org/10.1007/s11468-018-0784-5>
24. Komissarenko F.E., Mukhin I.S., Golubok A.O., Nikonov N.V., Prosnikov M.A., Sidorov A.I. Effect of electron beam irradiation on thin metal films on glass surfaces in a submicrometer scale // *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*. 2016. V. 15. N 1. P. 013502. <https://doi.org/10.1117/1.JMM.15.1.013502>
25. Choi S., Dickson R.M., Yu J. Developing luminescent silver nanodots for biological applications // *Chemical Society Reviews*. 2012. V. 41. N 5. P. 1867–1891. <https://doi.org/10.1039/c1cs15226b>
26. Arnob M.M.P., Artur C., Misbah I., Mubeen S., Shih W.-C. 10×-enhanced heterogeneous nanocatalysis on a nanoporous gold disk array with high-density hot spots // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019. V. 11. N 4. P. 13499–13506. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19914>
27. Shen Z., O'Carroll D.M. Nanoporous silver thin films: Multifunctional platforms for influencing chain morphology and optical properties of conjugated polymers // *Advanced Functional Materials*. 2015. V. 25. N 22. P. 3302–3313. <https://doi.org/10.1002/adfm.201500456>
28. Ron R., Haleva E., Salomon A. Nanoporous metallic networks: fabrication, optical properties, and applications // *Advanced Materials*. 2018. V. 30. N 41. P. 1706755. <https://doi.org/10.1002/adma.201706755>
29. Jiao Y., Chen M., Ren Y., Mai H. Synthesis of three-dimensional honeycomb-like Au nanoporous films by laser induced modification and its application for surface enhanced Raman spectroscopy // *Optical Materials Express*. 2017. V. 7. N 5. P. 1557. <https://doi.org/10.1364/OME.7.001557>
30. Самсонов В.М., Кузнецова Ю.В., Дьякова Е.В. О фрактальных свойствах агрегатов металлических нанокластеров на твердой поверхности // *Журнал технической физики*. 2016. Т. 86. № 2. С. 71–77.
31. Tamm I., Schubert S. Zur theorie des photoeffektes an metallen // *Zeitschrift für Physik*. 1931. V. 68. N 1-2. P. 97–113. <https://doi.org/10.1007/BF01392730>
32. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. 564 с.
21. Koya A.N., Cunha J., Guo T.-L., Toma A., Garoli D., Wang T., Juodkakis S., Cojoc D., Zaccaria R.P. Novel plasmonic nanocavities for optical trapping-assisted biosensing applications. *Advanced Optical Materials*, 2020, vol. 8, no. 7, pp. 1901481. <https://doi.org/10.1002/adom.201901481>
22. Fujita T. Hierarchical nanoporous metals as a path toward the ultimate three-dimensional functionality. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 724–740. <https://doi.org/10.1080/14686996.2017.1377047>
23. Pshenova A.S., Sidorov A.I., Antropova T.V., Nashchekin A.V. Luminescence enhancement and SERS by self-assembled plasmonic silver nanostructures in nanoporous glasses. *Plasmonics*, 2019, vol. 14, no. 1, pp. 125–131. <https://doi.org/10.1007/s11468-018-0784-5>
24. Komissarenko F.E., Mukhin I.S., Golubok A.O., Nikonov N.V., Prosnikov M.A., Sidorov A.I. Effect of electron beam irradiation on thin metal films on glass surfaces in a submicrometer scale. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 013502. <https://doi.org/10.1117/1.JMM.15.1.013502>
25. Choi S., Dickson R.M., Yu J. Developing luminescent silver nanodots for biological applications. *Chemical Society Reviews*, 2012, vol. 41, no. 5, pp. 1867–1891. <https://doi.org/10.1039/c1cs15226b>
26. Arnob M.M.P., Artur C., Misbah I., Mubeen S., Shih W.-C. 10×-enhanced heterogeneous nanocatalysis on a nanoporous gold disk array with high-density hot spots. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, vol. 11, no. 4, pp. 13499–13506. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19914>
27. Shen Z., O'Carroll D.M. Nanoporous silver thin films: Multifunctional platforms for influencing chain morphology and optical properties of conjugated polymers. *Advanced Functional Materials*, 2015, vol. 25, no. 22, pp. 3302–3313. <https://doi.org/10.1002/adfm.201500456>
28. Ron R., Haleva E., Salomon A. Nanoporous metallic networks: fabrication, optical properties, and applications. *Advanced Materials*, 2018, vol. 30, no. 41, pp. 1706755. <https://doi.org/10.1002/adma.201706755>
29. Jiao Y., Chen M., Ren Y., Mai H. Synthesis of three-dimensional honeycomb-like Au nanoporous films by laser induced modification and its application for surface enhanced Raman spectroscopy. *Optical Materials Express*, 2017, vol. 7, no. 5, pp. 1557. <https://doi.org/10.1364/OME.7.001557>
30. Samsonov V.M., Kuznetsova Yu.V., D'yakova E.V. Fractal properties of aggregates of metal nanoclusters on solid surface. *Technical Physics*, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 227–232. <https://doi.org/10.1134/S1063784216020201>
31. Tamm I., Schubert S. Zur theorie des photoeffektes an metallen. *Zeitschrift für Physik*, 1931, vol. 68, no. 1-2, pp. 97–113. <https://doi.org/10.1007/BF01392730>
32. Dobretsov L.N., Gomoyunova V.V. *Emission Electronics*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 564 p. (in Russian)

Авторы

Сидоров Александр Иванович — доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57193232588](https://orcid.org/0000-0001-8730-4389), <https://orcid.org/0000-0001-8730-4389>, sidorov@oi.ifmo.ru

Безруков Павел Андреевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57219516957](https://orcid.org/0000-0002-5415-8749), <https://orcid.org/0000-0002-5415-8749>, pawqal@yandex.ru

Нашчехин Алексей Викторович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [sc 6603372975](https://orcid.org/0000-0002-2542-7364), <https://orcid.org/0000-0002-2542-7364>, nashchekin@mail.ioffe.ru

Никоноров Николай Валентинович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7003772604](https://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, Nikonov@oi.ifmo.ru

Authors

Alexander I. Sidorov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57193232588](https://orcid.org/0000-0001-8730-4389), <https://orcid.org/0000-0001-8730-4389>, sidorov@oi.ifmo.ru

Pavel A. Bezrukov — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57219516957](https://orcid.org/0000-0002-5415-8749), <https://orcid.org/0000-0002-5415-8749>, pawqal@yandex.ru

Alexey V. Nashchekin — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 6603372975](https://orcid.org/0000-0002-2542-7364), <https://orcid.org/0000-0002-2542-7364>, nashchekin@mail.ioffe.ru

Nikolay V. Nikonov — D.Sc. (Physics & Mathematics), Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7003772604](https://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, Nikonov@oi.ifmo.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2023

Одобрена после рецензирования 25.04.2023

Принята к печати 28.05.2023

Received 20.02.2023

Approved after reviewing 25.04.2023

Accepted 28.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-473-482

Mathematical modelling of tri-layer dielectric OTFT based on pentacene semiconductor for enhancing the electrical characteristics

Deepika Panghal¹, Rekha Yadav²

^{1,2} Deenbandhu Chhotu Ram University of Science and Technology, Sonapat, 131039, India

¹ deepikapanghal5@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6769-0948>

² rekhayadav.ece@dcrustm.org, <https://orcid.org/0000-0001-9580-9766>

Abstract

Organic thin film transistors (OTFTs) are significant for several reasons because their design processes are less complicated than those of conventional silicon technology which requires complex photolithographic patterning techniques and high-temperature and high-vacuum deposition processes. The more complex procedures used in traditional Si technology can be replaced by low-temperature deposition and solution processing. OTFTs based on the single-layer dielectric medium are poor in reducing the leakage current among the source and drain channel due to the incompatible resistance of dielectric medium. The paper presents a model of a tri-layer dielectric medium based on the organic semiconductor pentacene. In this tri-layer OTFT, three different dielectric mediums are used, such as SiO₂, POM-H (PolyOxyMethylene-Homopolymer) and PEI-EP (PolyEthyleneImine-Epoxy resin), for reducing the leakage current and enhancing the mobility among the source and drain channel. The parameter values, such as drain current I_{DS} , threshold voltage V_t and mobility for the designed tri-layer dielectric OTFT, are evaluated and compared with the single layer and bi-layer OTFT models. Thus, the attained mobility, drain current and threshold voltage for the proposed OTFT model are 0.0215 cm²/(V·s), –4.44 mA for –10 V gate and –2.5 V drain voltage (V_{DS}) and threshold value 0.2445 V (V_t) for gate voltage –10 V (V_G). These attained parameter values are greater than the single- and bi-layer dielectric OTFT models. Thus, the mathematical modeling of the designed tri-layer dielectric OTFT model enhances the electrical characteristics of the other OTFT models.

Keywords

OTFT, SiO₂, PEI-EP, POM-H, mobility, threshold voltage

For citation: Panghal D., Yadav R. Mathematical modelling of tri-layer dielectric OTFT based on pentacene semiconductor for enhancing the electrical characteristics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 473–482. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-473-482

УДК 621.382.3

Математическое моделирование трехслойного диэлектрика OTFT на основе пентаценового полупроводника для улучшения электрических характеристик

Дипика Пангал¹, Рекха Ядав²

^{1,2} Университет науки и технологий Динбандху Чхоту Рам, Сонипат, 131039, Индия

¹ deepikapanghal5@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6769-0948>

² rekhayadav.ece@dcrustm.org, <https://orcid.org/0000-0001-9580-9766>

Аннотация

Органические тонкопленочные полевые транзисторы (Organic thin film transistors, OTFTs) широко используются по нескольким причинам. Процессы их проектирования менее сложны, чем при традиционной кремниевой технологии, которая требует особые методы фотолитографического формирования рисунка и процессов высокотемпературного и высоковакуумного осаждений. Наиболее трудоемкие процедуры, используемые в

традиционной кремниевой технологии, могут быть заменены низкотемпературным осаждением и обработкой на твердый раствор. OTFT на основе однослойной диэлектрической среды имеют большой ток утечки между истоком и стоком из-за несовместимости сопротивлений диэлектрической среды. В работе представлена модель трехслойной диэлектрической среды на основе органического полупроводника пентацена. В трехслойном OTFT использованы три диэлектрические среды: SiO₂, POM-H (полиоксиметилен-гомополимер) и PEI-EP (полиэтиленимин-эпоксидная смола) для снижения тока утечки и увеличения подвижности между истоком и стоком. Выполнена оценка и сравнение значений параметров: тока стока I_{DS} , порогового напряжения V_t и подвижности μ для разработанного трехслойного диэлектрического OTFT с одно- и двухслойными моделями. Полученные значения параметров для разработанной модели OTFT при напряжении затвора $V_G = -10$ В составили: $I_{DS} = -4,44$ мА; $\mu = 0,0215$ см²/(В·с) (для напряжения стока $V_{DS} = -2,5$ В) и $V_t = 0,2445$ В. Полученные значения параметров оказались больше, чем в одно- и двухслойных диэлектрических моделях OTFT. Таким образом, математическое моделирование разработанной трехслойной структуры продемонстрировало улучшение электрических характеристик по сравнению с другими типами OTFT.

Ключевые слова

OTFT, SiO₂, PEI-EP, POM-H, подвижность, пороговое напряжение

Ссылка для цитирования: Пангал Д., Ядав Р. Математическое моделирование трехслойного диэлектрика OTFT на основе пентаценового полупроводника для улучшения электрических характеристик // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 473–482 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-473-482

Introduction

Organic thin film transistors (OTFTs) are currently developing an increase in attention due to the low-temperature technique and affordable manufacture. Consequently, their ability for a variety of applications is growing, including large-area flexible electronics and affordable electronic components [1]. Their useful applications include flexible screens, RF identification tags, sensors, electronic paper, etc. Furthermore, the natural flexibility of OTFT with all-polymer architectures enables the development of flexible integrated circuits [2]. Organic and polymer microelectronic device fabrication methods include thermal evaporation, printing, spin coating, and lithography [3]. A number of printing processes, such as Ink-Jet Printing (IJP), screen printing, micro contact printing, are quite interesting. The IJP approach has been receiving more attention among these printing technologies because of the polymer devices produced based on the benefits of straightforward fabrication processes, compatibility with many substrates, low temperature processing and affordability [4]. A Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) and OTFT have similar operating principles.

However, the channel formation is different and operates in a voltage-controlled current source by applying a voltage between the gate and the source (V_G) [5]. At this point, the charge carrier accumulation process begins at the semiconductor and insulator interface helps for the generation of current as well as the flow of current when a voltage between the drain and the source (V_{DS}) is applied [6]. OTFT is combined using the gate dielectric and an organic semiconductor layer with electrodes that consist of source, gate and drain [7]. The arrangement of the gate dielectric can be either upward or downward that determines the structure of the OTFT. Hence, the organic semiconductor layer source and drain contacts are referred to as Top Gate (TG) and Bottom Gate (BG) based on their location and contact structures [8]. Complex integrated circuits based on OTFTs need to be characterized and modeled in advance for efficient design.

Many mathematical models of the OTFTs have been created in recent years. They mostly utilize models of conventional Metal Oxide Semiconductor (MOS) transistors that have been slightly changed by the addition of suitable experimental factors [9]. The created model need to exhibit strong efficiency in circuit simulations and sufficient accuracy in device simulations. In reality, the design must consider the material specifications and the physical foundations of the device structure. However, innovation is still in its early stages and a variety of parameters including materials and structure that can change the established model by upgrading [10]. Therefore, it's crucial to take a hands-on approach to make the model update easier. Implicit equations are included in the model because of the physical treatment with surface potential variables. Model convergence in circuit simulations will rarely be affected by this technique. Hence, The OTFT model should be derived based on the explicit equations to prevent this divergence [11]. In this paper, the parameters of the OTFT, such as capacitor factor, mobility and threshold voltage, are mathematically modeled based on the different combinations of dielectric layer, such as SiO₂, PolyOxyMethylene-Homopolymer (POM-H) and PolyEthyleneImine-Epoxy resin (PEI-EP), to analyze the performance of the OTFT using F₁₆CuPc semiconductor material. The derived parameters of the OTFT device for three different dielectric layers are used for finding the electrical characteristics. These electrical characteristics for each combinations of dielectric layer are derived and compared. As a result, the tri-layer dielectric OTFT will have better electrical properties than the existing OTFT. Major contributions of the designed model are:

- Mathematical modeling of tri-layer OTFT is derived for enhancing the electrical properties of the OTFT.
- Organic semiconductor pentacene, or F₁₆CuPc, is used to examine the effectiveness of the developed tri-layer dielectric OTFT.
- Insulating or dielectric medium including PEI-EP, POM-H and SiO₂ is used for enhancing the electrical conductivity between the source and drain.

- Parameters of the tri-layer OTFT, such as capacitor factor, mobility and threshold voltage, are mathematically determined.

Literature Review

Numerous techniques are introduced for enhancing the electrical conductivity between the source and drain channels which have been developed by using single-, bi- and tri-layer dielectric medium. The majority of current methods are studied and some of them are reviewed below. Borthakur and Sarma [12] had designed OTFT based on top contact pentacene with bi-layer source drain electrode. The dielectric medium used in this model are N, N'-Bis (3-methyl phenyl) — N, N'-diphenyl benzidine with TPD/Au bi-layer source-drain (S-D) electrodes. This bi-layer electrode shows better performance than the single-layer S-D electrode OTFT devices. The field-effect mobility, “on-off” ratio, threshold voltage and the subthreshold voltage, are attained from the designed model with TPD/Au bi-layer source-drain electrode.

Cortes-Ordóñez et al., [11] had developed an analytical and compact model of gate capacitance in OTFT. This modeling aims to validate compact capacitance of OTFTs at the accumulation from the depletion region by considering the frequency response. This OTFT is designed based on the Unified Model parameter Extraction Method (UMEM) to calculate the parameter values of the designed model. The effect associated with the density of localized states is included in the gate capacitance. Furthermore, experimental derivation of the gate capacitance and the presentation of this model forecast with a high accuracy.

Li et al., [13] had performed a mobility model based on temperature and contact resistance in organic thin-film transistors. A mobility model for OTFT is developed by taking into account contact and temperature resistance based on the device physics. The mobility model with hopping mechanism can explain that temperature and gate bias are dependent on the surface potential. It is also taken into account to determine the proper mobility when calculating the contact resistance. A DC compact model is designed for resisting the interface and temperature in the model at the range of $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $22\text{ }^{\circ}\text{C}$. The several comparisons among developed model and experimental data or numerical iteration provide strong evidence for the mobility and current models validity.

Cortes-Ordóñez et al., [14] had performed extraction of parameter from I-V and C-V characteristics by modeling OTFTs with the temperature range of $-123\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $77\text{ }^{\circ}\text{C}$. Analyses of the obtained parameters based on temperature dependency are performed. At various temperatures, an OTFT-adapted unified model and parameter extraction techniques are employed for finding the performance of the model. The experimental I-V characteristics in the linear and saturation regimes as well as the C-V characteristics at various frequencies are compared in order to validate this model.

Leise et al., [15] had developed an approach for the calculation of charges and capacitances in staggered OTFTs. The charges are produced in an analytical and concise manner using an existing DC model. To distribute

charges among the drain and source sides of the channel, a linear charge partitioning system is used. The only factors that affect the final equation are the drain and source end charge densities of the channels with geometrical features. The capacitances are compared with the results of the Centaurus Technology Computer-Aided Design (TCAD) simulation and measurement data using the compact model which is implemented in Verilog A. This model has the advantage of having a singular formulation that accounts for all operational regimes.

Numerous dielectric polymers with single-, bi-, and tri-layers are used from the above-reviewed method to improve electrical performance. In existing techniques, the mathematical modeling of single-layer dielectric medium is used for OTFT to conduct the electric current from the source to drain electrode. In those OTFT, the mobility of the charge carriers of the OTFT is poor. Therefore, the tri-layer OTFT is mathematically created to improve the electrical performance of the OTFT and the mobility of charge carriers.

Proposed Methodology

In OTFT, the flow of current among the source and drain channel is produced by an inorganic dielectric such as silicon dioxide which is employed as a dielectric polymer. Using the inorganic dielectric layers, there are advantages as well as disadvantages in the OTFT. The advantages of the inorganic dielectric are addressing the scaling issues and reducing the leakage current in the short channel OTFTs, and the disadvantages are reduction in mobility with an increase in dielectric constant and high-surface energy that reduces the mobility further. Hence, the addition of organic dielectric layers to the inorganic dielectric will enhance the mobility and reduce the leakage current in the short channels. In this mathematical model, the tri-layer dielectric medium enhances electrical conductivity of the source and drain channel. The interior structure of the tri-layer OTFT is illustrated in Fig. 1.

The variables in the tri-layer OTFT are Thickness of the semiconductor (T_{OX}), Thickness of tri-layer dielectric medium (T_{OSC}), Source capacitance of oxide material ($C_{OV,S}$), Capacitive resistance for source ($R_{C,S}$), Gate Resistance (R_G), Gate to Source capacitance (C_{GS}), Gate to Drain capacitance (C_{GD}), Source to Drain Resistance (R_{SD}), Drain capacitance of oxide material n ($C_{OV,D}$) and

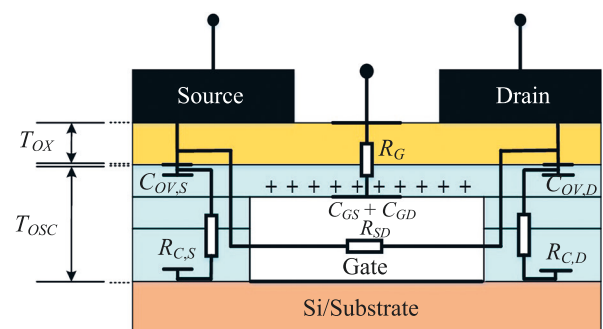


Fig. 1. Interior structure of the tri-layer OTFT (see below for notation definitions)

Capacitive resistance for Drain ($R_{C,D}$). In this model, the n -type heavily doped silicon wafer is used as a substrate. The gate dielectric, such as SiO_2 , POM-H and PEI-EP, are used for controlling the flow of current at the source to drain channel. For evaluating the electric characteristics of the OTFT, an organic semiconductor such as F_{16}CuPc and pentacene is used. Finally, the copper is used as the source and drain metal electrode. The parameters extracted from the mathematical modeling are Device threshold voltage (V_t), capacitive insulation ($C_{\text{ins}1}$, $C_{\text{ins}2}$ and $C_{\text{ins}3}$) and Mobility (μ) for three dielectric medium are evaluated.

Mathematical modeling of OTFT for extracting the parameters

In this model, the work done is based on deriving the mathematical equations for single-, bi- and tri-layer dielectric medium based OTFT model to extract the electrical parameters of the OTFT. Bottom gate-top contact is the fundamental architecture of a transistor where the length is situated among the drain and source contacts. OTFT is simply a drift mechanism like the existing Complementary Metal Oxide Semiconductor technology where the linear and subthreshold regimes are controlled by using a single equation. The derived equation for the OTFT is based on the Variable Range Hopping (VRH) model. For unipolar charge carrier (electrons) the channel conductivity from equation is defined as

$$\sigma = e\mu n(y), \quad (1)$$

where $n(y)$ is the electron concentration in the channel, μ is the electron mobility defined as the charge velocity divided by the electric field. In the following equation, the mobility of electron is determined as

$$\mu = V/E.$$

Two powerful experiments are used to define the material charge mobility. The first is Time of Flight (TOF) where mobile charges are generated by photonic excitation. The charges are accelerated by external electric field (E). The mobility can be measured by the time (Δt), it takes the charges to move through a path of distance (L). Mobility of electrons at first TOF is determined using the following equation

$$\mu_{\text{TOF}} = \frac{L}{\Delta t E}.$$

Current density across the channel according to Ohm law is determined using the equation

$$J_x = \sigma E_x. \quad (2)$$

Substituting the equation (1) in (2) and integrating will give us the total channel current

$$I_x = \int_y \int_z J_x dy dz = \mu E_x \int_y \int_z n(y) dy dz. \quad (3)$$

The channel charge per unit area is defined in equation

$$Q_{\text{ch}} = -\int_y en(y) dy. \quad (4)$$

Substituting equation (3) in (4), the following equation and determines the total channel current.

$$\begin{aligned} I_x &= -\mu E_x Q_{\text{ch}} \int_z dz \\ I_x &= -\mu E_x Q_{\text{ch}} W, \end{aligned} \quad (5)$$

where W is the channel width accepted by integration over z axis and $E_x = \frac{dV_x}{dx}$. The channel charge Q_{ch} per unit area is assumed to be constant across, and it is accumulated across the channel after flat band has achieved, which is determined at equation.

$$Q_{\text{ch}} = -C_{\text{ins}}(V_G - V_x - \Phi_{\text{ms}} - V_{\text{ins}}(\text{FB})), \quad (6)$$

where V_G is the gate to source potential, V_x is the potential in the channel at a point x and the C_{ins} is insulator capacitor per unit area. The insulator capacitor per unit is determined using the following equation

$$C_{\text{ins}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{ins}}}{t_{\text{ins}}},$$

where ϵ_0 and ϵ_{ins} are the permittivity of free space and relative insulator permittivity and t_{ins} is the insulator layer thickness. Fig. 2 shows the metal, insulator and semiconductor energy levels before physical contact.

Electron affinity of insulator (ex_i), Electron affinity of semiconductor (ex_s), Insulator gap energy (Eg_i), semiconductor gap energy (Eg_s), Fermi level for semiconductor (E_{Fs}), Fermi level for insulator (E_{Fi}), Potential difference between the intrinsic Fermi level and the doped Fermi level ($e\Phi_F$), Metal work function ($e\Phi_m$), Fermi level for metal (E_{Fm}). When metal, insulator and semiconductor materials are jointed together to form MIS capacitor, an equilibrium state occurs by Fermi level alignment between the metal work function and the semiconductor Fermi level (a short between the semiconductor bulk and the metal contact may be needed to promote this equilibrium). This equilibrium and the

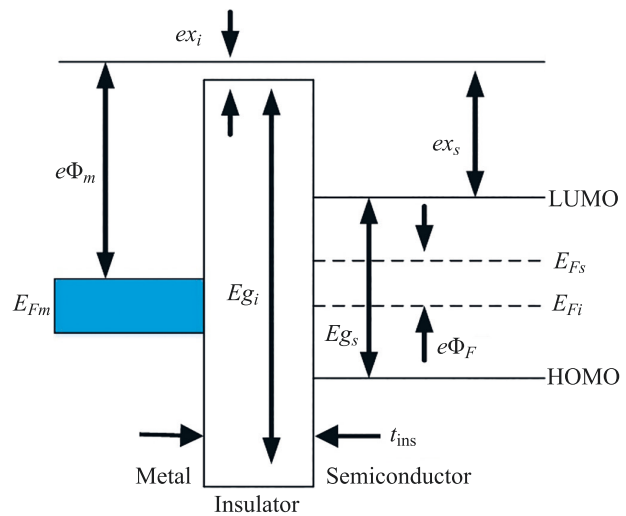


Fig. 2. Metal, insulator and semiconductor energy levels before physical contact

associated charging cause the HOMO and LUMO levels to bend near the interface between the semiconductor and the insulator. In addition, it causes a shift in the vacuum levels of the metal and the semiconductor. The existence of nonzero potential between the gate material and the semiconductor cause net charge to appear on both sides of the insulator. The metal-semiconductor work function difference Φ_{ms} is derived from equation

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (\chi_s + \frac{E_{gs}}{2q} - \Phi_F),$$

where Φ_m is the metal work function, χ_s is the semiconductor electron affinity, E_{gs} is the semiconductor gap energy, q is charge, and Φ_F is the potential difference between the intrinsic Fermi level and the doped Fermi level. In the case of non-degenerate semiconductors, it is defined by using the following equation:

$$\Phi_F = V_t \ln \frac{N_d}{n_i},$$

where V_t is the thermal voltage, N_d is the donor doping concentration, and n_i is the intrinsic carrier concentration. The contact potential effect (the different energy levels of the metal and semiconductor) is not the only one that causes net concentration of charges. A “parasitic” charge may exist in the insulator and influence the charge concentration in the MIS device.

If the “trapped” charge is defined as Q_{ss} and if we assume it is concentrated close to the insulator semiconductor interface (as appear in Fig. 3), then the induced potential drop across the insulator is defined by using the equation.

$$V_{ins} = \frac{Q_{ss}}{C_{ins}}.$$

In this equation, the MIS capacitor is in equilibrium without external potential that can sum the energy levels using the equation

$$-\Phi_{ms} = \Phi_{s0} - V_{ins0}. \quad (7)$$

If a gate voltage V_G is applied, then the potential drop across the insulator and the surface potential changes as per the following equation

$$V_G = \Delta V_{ins0} + \Delta \Phi_{s0} = (V_{ins} - V_{ins0}) + (\Phi_s - \Phi_{s0}). \quad (8)$$

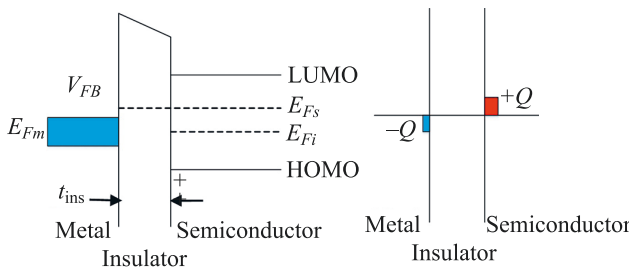


Fig. 3. Flat band conditions after applying external potential V_{FB}

By inserting equation (7) into (8), the gate voltage V_G will be converted to the following equation

$$V_G = V_{ins} + \Phi_s + \Phi_{ms}.$$

Flat band conditions exist when no charge is present in the semiconductor and the semiconductor energy bands are flat. In this condition, the surface potential equals to zero and the charge density on the gate metal should cancel the parasitic charge existing in the insulator as defined by the following equation

$$Q_{ss} + Q_m = 0.$$

Therefore, in flat band condition the gate potential is derived as equation

$$V_G(\text{FB}) = V_{ins} + \Phi_{ms} = \frac{Q_{ss}}{C_{ins}} + \Phi_{ms}.$$

Hence, the flat band condition results in the threshold voltage in the form of the following equation

$$V_t = \frac{Q_{ss}}{C_{ins}} + \Phi_{ms} = \Phi_{ms} + V_{ins(\text{FB})}. \quad (9)$$

Substituting the equation (9) in (6), we get the charge per unit as the following equation

$$Q_{ch} = -C_{ins}(V_G - V_x - V_t). \quad (10)$$

Substituting the equation (10) in (5) with $E_x = \frac{dV_x}{dx}$, we apply electric field among the drain and source contact. Then, the following equation defines the total channel current:

$$I_x = \mu \frac{dV_x}{dx} C_{ins}(V_G - V_x - V_t)W. \quad (11)$$

Integrating (11) over the channel length L and the drain source potential V_{DS} , the following set of equations is derived:

$$\int_0^L I_x = \int_{V_s}^{V_D} \mu \frac{dV_x}{dx} C_{ins}(V_G - V_x - V_t)W,$$

$$\int_0^L I_x dx = \int_{V_s}^{V_D} \mu WC_{ins}(V_G - V_x - V_t)dV_x,$$

$$I_x \int_0^L dx = \mu WC_{ins} \int_{V_s}^{V_D} (V_G - V_x - V_t)dV_x,$$

$$I_x = \mu \frac{W}{L} C_{ins} \int_{V_s}^{V_D} (V_G - V_x - V_t)dV_x.$$

Here, $V_{DS} = V_D - V_s$ and $I_x = I_{DS}$, and then

$$I_{DS,lin} = \mu \frac{W}{L} C_{ins} [V_G - V_t] V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}. \quad (12)$$

Equation (12) can be used as long as $|V_{DS}| < |V_G - V_t|$. This region is called the linear region. However, when drain-source voltage increases above this limit, section of

the channel (near the drain electrode) will move to depletion state cancelling charge accumulation at this zone. By increasing the drain-source voltage, the channel depletion zone enlarges. This bottleneck section limits the channel current by increasing the channel resistance associated with increasing the channel depletion that is affected by the drain-source voltage. In turn, this dependence causes the channel current to get into saturation region. For this case, integration of the boundaries is used, and the result looks like equation:

$$\int_0^{L_{\text{eff}}} I_{DS}(y) dy = \int_0^{V_G - V_t} W \mu C_{\text{ins}} (V_G - V_y - V_t) dv(y),$$

where L_{eff} is the effective channel length and $V_G - V_t$ is the voltage boundaries inside L_{eff} . For long channel transistor ($L \gg d$ in lateral transistors) the depletion section is small compared to channel length ($L - L_{\text{eff}} \ll L$). So L_{eff} can be written as L . Integration of the equation results in

$$\begin{aligned} I_{DS} L &= \mu W C_{\text{ins}} \left[[V_G - V_t] V - \frac{V^2}{2} \right]_0^{V_G - V_t} = \\ &= \mu \frac{W}{L} C_{\text{ins}} \left[[V_G - V_t] [V_G - V_t] - \frac{(V_G - V_t)^2}{2} \right] \quad (13) \\ I_{DS, \text{sat}} &= \mu \frac{W}{2L} C_{\text{ins}} [V_G - V_t]^2. \end{aligned}$$

Equation (13) can be used as long as $|V_{DS}| > |V_G - V_t|$. This region is defined as the saturation region. $\mu = \left(\frac{L}{W} \right) ((St) V_G)$. Here, L and W are the length and width of the channel, St and V_G are the thickness of the semiconductor and gate voltage, respectively. In this model, three different layers of insulator are used, such as SiO_2 , POM-H and PEI-EP, for enhancing the conductivity of current from source to drain channel by varying the gate and drain voltage. The following two equations are an illustration of the linear drain current for tri-layer OTFT.

$$I_{DS, \text{lin}} = \mu \frac{W}{L} \left[\frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{SiO}_2}}{t_{\text{SiO}_2}} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{POM-H}}}{t_{\text{POM-H}}} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{PEI-EP}}}{t_{\text{PEI-EP}}} \right] \times \\ \times [V_G - V_t] V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2},$$

$$I_{DS, \text{sat}} = \mu \frac{W}{2L} \left[\frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{SiO}_2}}{t_{\text{SiO}_2}} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{POM-H}}}{t_{\text{POM-H}}} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{PEI-EP}}}{t_{\text{PEI-EP}}} \right] [V_G - V_t]^2,$$

where ϵ_{SiO_2} , $\epsilon_{\text{POM-H}}$, $\epsilon_{\text{PEI-EP}}$ are the relative permittivity of the insulators, such as silicone dioxide, POM-H and PEI-EP; t_{SiO_2} , $t_{\text{POM-H}}$, $t_{\text{PEI-EP}}$ is the thickness of the insulators. The current “on-off” ratio is derived by dividing the maximum drain current to the minimum drain current with the same drain voltage. The description of different parameters used in the designed model for evaluating are illustrated in the Table 1 (parameters t_{SiO_2} , $t_{\text{POM-H}}$, $t_{\text{PEI-EP}}$ correspond to t_{ins} in Fig 2 & 3).

Model Parameter Extraction

Electrical characteristics of tri-layer OTFT, such as capacitive insulation, threshold voltage and mobility, are derived using mathematical modeling on Matlab R2020b software with the system configurations of Intel i5-3450S processor at the speed of 2.80 GHz based on 64-bit operating system and 8.0 GB Memory (RAM). In this mathematical model, three dielectric layers, such as SiO_2 , POM-H, PEI-EP, are used for improving the electrical conductivity of the transistor. POM-H is the perfect material for components that are meant to replace metal. It provides great stiffness and strength with low friction and high wear resistance. It has a broad operating temperature range (-40°C to 120°C) with good stability. Additionally, it mixes well with metals and other polymers that provide great dimensional stability in high precision moulding. Likewise, the third dielectric medium PEI-EP can possess high initial decomposition temperature up to 340°C . By using these POM-H and PEI-EP layer, the leakage current from the channel will be reduced and this improves the mobility of the free electrons in the channel.

Table 1. Description for the parameters used and derived for the tri-layer OTFT

Parameters	Description	Values
L_{channel}	Channel Length, cm	0.02
W_{channel}	Channel Width, cm	1
T_{OX}	Thickness of the semiconductor, nm	40
V_G	Gate to source Voltage, V	-20 to -80
V_{DS}	Drain to source Voltage, V	-2.5 to -10
ϵ_0	Permittivity of the vacuum space, F/m	$8.854 \cdot 10^{-12}$
ϵ_{SiO_2}	Relative permittivity of silicone dioxide	3.9
$\epsilon_{\text{POM-H}}$	Relative permittivity of POM-H	3.8
$\epsilon_{\text{PEI-EP}}$	Relative permittivity of PEI-EP	3.8
t_{SiO_2}	Thickness of the silicone dioxide insulator, μm	0.3
$t_{\text{POM-H}}$	Thickness of the POM-H insulator, μm	0.8
$t_{\text{PEI-EP}}$	Thickness of the PEI-EP insulator, μm	0.3

I-V characteristics for single-, bi- and tri-layer dielectric medium OTFT

OTFTs are tri-terminal, unipolar, voltage-controlled, high input impedance devices which are used as an integral part for vast variety of electronic circuits. The OTFT devices will be in 'off' state with a minimum current flow between source and drain electrodes when the gate voltage is not applied. If the gate voltage is applied, the electrons or holes can be induced at semiconductor/dielectric interface that increases the source drain current ('on' state). OTFTs are mainly designed using a single dielectric medium for reducing the leakage current and enhancing the current flow at the source-drain channel. Though the single-layer dielectric medium (such as SiO₂) is good in reducing leakage current, the temperature resistance is still a major drawback in the OTFT. Thus, a tri-layer OTFT mathematical model has been derived using organic dielectric medium for enhancing the temperature resistance of the device. Fig. 4 shows the I-V characteristics for single-layer dielectric medium OTFT.

Fig. 4 illustrates the I-V characteristics for three different layer OTFT models. The V_{gs} (V) refers to V_G that represents gate to source voltage which is kept constant for drain current characteristics of MOSFET. In this mathematical model, the gate voltage has been varied

for attaining different drain current characteristics of the designed tri-layer OTFT model. I-V characteristic of the OTFT is determined by making the gate voltage (V_G) constant and varying the drain voltage (V_{DS}) to attain the drain current (I_{DS}) of the OTFT. The single-layer OTFT consists of SiO₂ as a dielectric medium, bi-layer consists of SiO₂ and PEI-EP as dielectric medium and tri-layer consists of SiO₂, PEI-EP and POM-H as a dielectric medium. The insulation of the substrate current will be high for the designed tri-layer OTFT due to the three insulation layer, which reduces the leakage current at the source to drain channel.

Table 2 illustrates the attained values of the drain current characteristics for the three different OTFT models. These values of the I_{DS} (mA) are almost similar to the I_{DS} (mA) of single- and bi-layer dielectric medium OTFT model but the resistance of the tri-layer dielectric medium has enhanced the values of the designed tri-layer OTFT than the other OTFT models.

The threshold voltage is abbreviated as V_t which is the least gate-to-source voltage (V_G) required to provide a conducting route between the source and drain terminals. It is a critical scaling factor for maintaining power efficiency. In this evaluation, the threshold voltage of the three different layer OTFT model are demonstrated at Fig. 5.

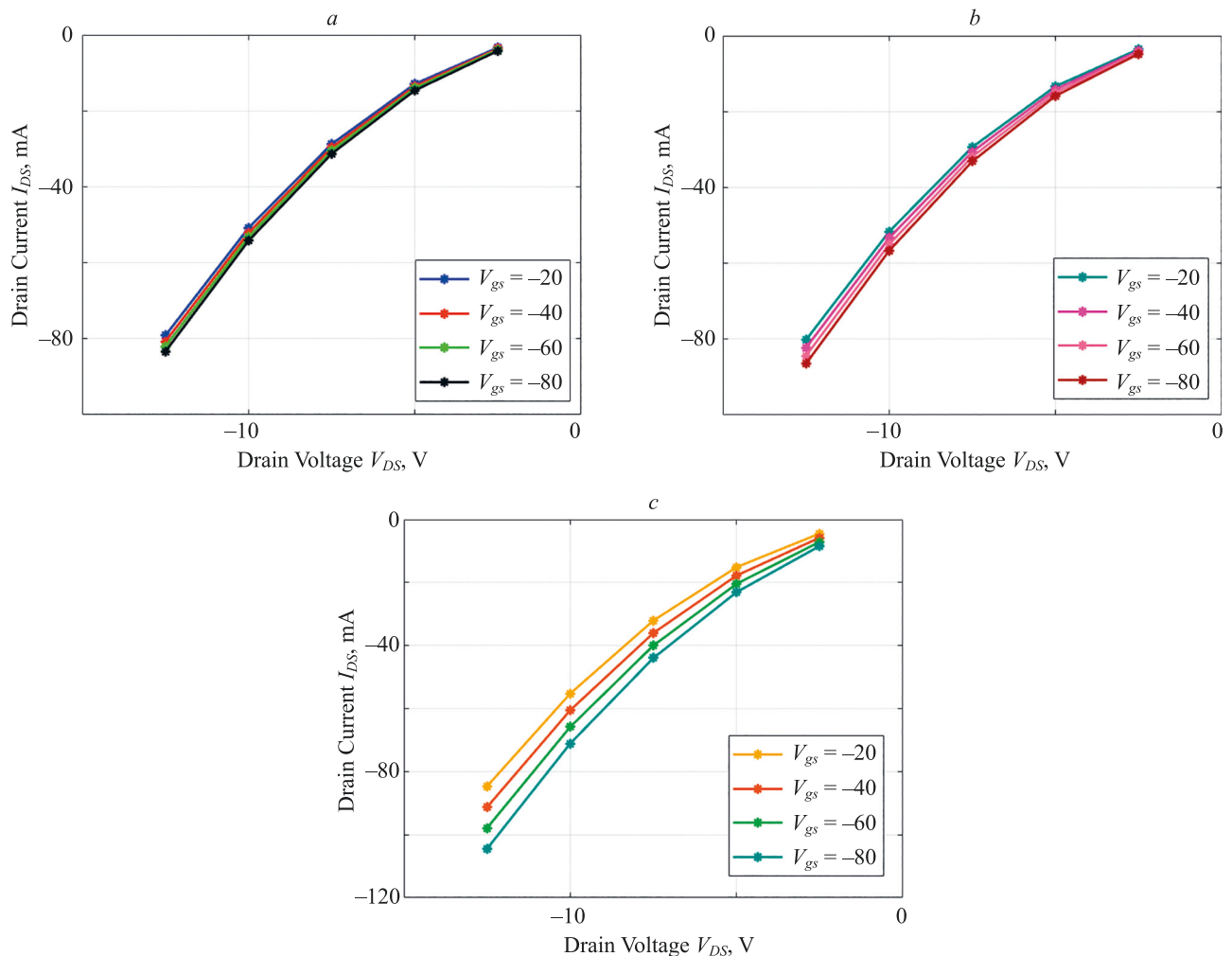


Fig. 4. I-V characteristics for single-layer (a), bi-layer (b) and tri-layer (c) dielectric media

Table 2. I-V characteristics for single-, bi- and tri-layer dielectric medium OTFT models, V

Gate voltage (V_G)	Drain voltage (V_{DS})								
	Single-layer			Bi-layer			Tri-layer		
	-2.5	-5	-7.5	-2.5	-5	-7.5	-2.5	-5	-7.5
-20	-3.33	-12.91	-28.75	-3.54	-13.33	-29.37	-4.44	-15.13	-32.07
-40	-3.64	-13.54	-29.69	-3.96	-14.17	-30.63	-5.76	-17.77	-36.03
-60	-3.91	-14.08	-30.50	-4.37	-15.00	-31.88	-7.08	-20.41	-40.00
-80	-4.18	-14.61	-31.29	-4.79	-15.84	-33.14	-8.40	-23.06	-43.96

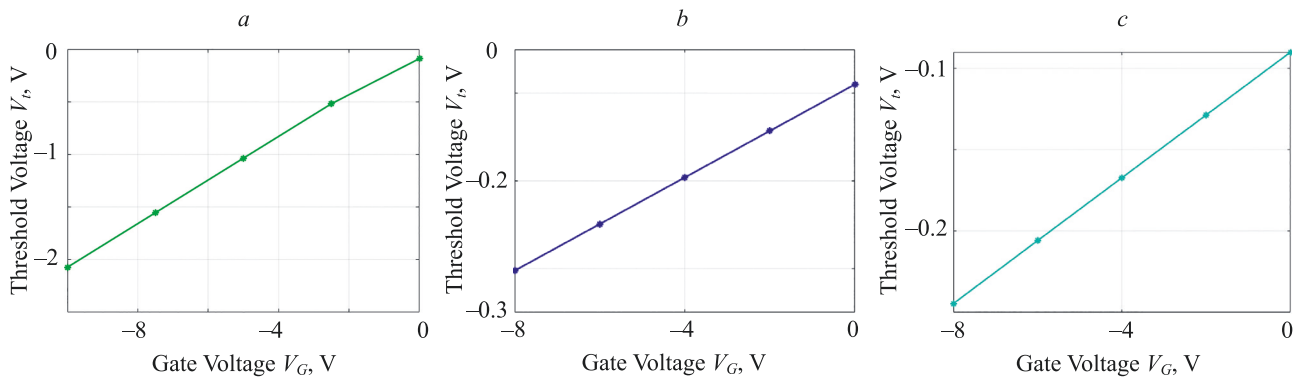


Fig. 5. Threshold voltages for single-layer (a), bi-layer (b) and tri-layer (c) dielectric media of OTFT

Table 3. Threshold voltage vs. gate voltage for different layer structures of dielectric medium OTFT, V

Parameter	Single-layer			Bi-layer			Tri-layer		
Gate voltage (V_G)	-2.5	-5	-7.5	-2.5	-5	-7.5	-2.5	-5	-7.5
Threshold voltage (V_t)	-0.51	-1.03	-1.6	-0.14	-0.19	-0.25	-0.12	-0.16	-0.207

Table 3 illustrates the attained threshold voltage of three different layers OTFT for different gate voltage. Threshold voltage for minimum gate voltage is similar for three different types of OTFT but the maximum gate voltage differs a lot for the different type of OTFTs. The threshold voltage for the tri-layer dielectric medium OTFT model consist of low voltages, lower than single- and bi-layer dielectric medium OTFT model, which results in quick conduction of current among the source and drain channel.

Effective mobility of the single-, bi- and tri-layer OTFT for different pentacene thickness are illustrated at Fig. 6. The OTFT is activated by biasing the gate which begins

collecting carriers among the source and drain channels. This attraction is normal to the carrier flow that attracts channel carriers to the semiconductor-oxide interface where they can scatter off the interface. This additional scattering mechanism reduces the mobility of the carriers crossing the channel. Hence, a tri-layer dielectric OTFT has been designed to enhance the mobility of the carrier between the conduction channels.

Table 4 illustrates the effective mobility of three different layer OTFT model for different pentacene thickness. Thus, the evaluation of the effective mobility for three different layer OTFT model shows that the designed

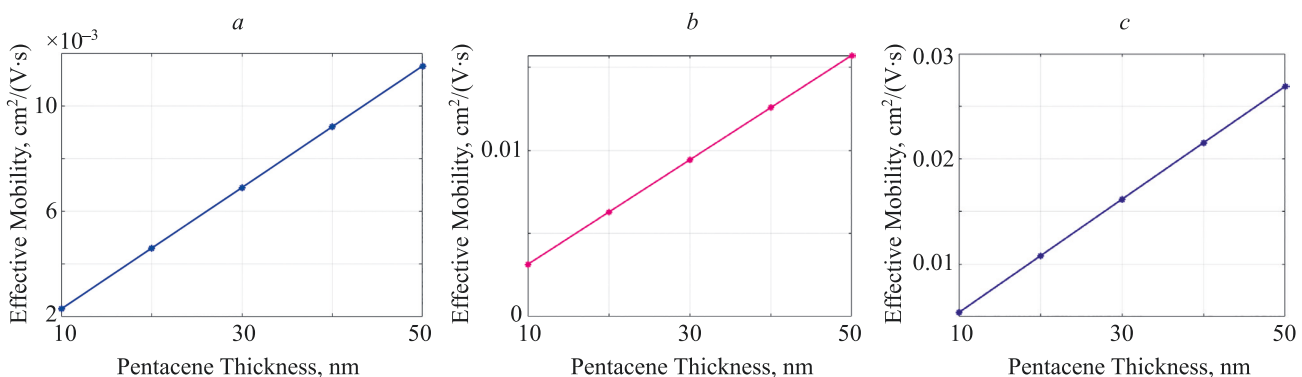


Fig. 6. Effective mobility for single-layer (a), bi-layer (b) and tri-layer (c) OTFT

Table 4. Effective mobility vs. pentacene thickness for different layer structures

Parameter name	Single-layer			Bi-layer			Tri-layer		
Pentacene thickness, nm	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Effective mobility, $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	0.002	0.004	0.006	0.003	0.006	0.009	0.005	0.010	0.016

tri-layer dielectric OTFT based on SiO_2 , POM-H and PEI-EP model performs better than the other OTFT model.

software to evaluate the reliability of the designed model performance.

Conclusion

Mathematical modelling of tri-layer OTFT has been implemented and compared with the existing OTFT based on different layers of dielectric medium. The proposed tri-layer OTFT model designed in this research work is based on the three dielectric medium, such as SiO_2 , POM-H and PE-EP. For evaluating the I-V characteristics of the designed tri-layer OTFT, the pentacene semiconductor is used in this designed model. The evaluated parameters of the designed model are drain current (mA), threshold voltage (V_t) and mobility (μ). The attained I_{DS} (mA) from single-, bi- and tri-layer dielectric medium OTFT model for -20 V gate voltage and -2.5 V drain voltage are -3.33 , -3.54 and -4.44 . Then, the threshold voltage of the single-, bi- and tri-layer OTFT of 10 V (V_G) are -2.072 , -0.3023 and -0.2445 . Likewise, the mobility of the three OTFT model for 40 nm pentacene are 0.0092 , 0.0125 and 0.0215 . Thus, the evaluation of the drain current (mA), mobility (μ) and threshold voltage (V_t) of three different layer dielectric medium OTFT model shows that the performance of the designed tri-layer dielectric medium OTFT model is greater than the other OTFT models. In future, the generated mathematical model will be simulated using computerised

Acknowledgements

Funding

The authors declare that no funds, grants, or other support were received during the preparation of this manuscript.

Conflict of Interest

The authors declared that they have no conflicts of interest to this work. We declare that we do not have any commercial or associative interest that represents a conflict of interest in connection with the work submitted.

Availability of data and material

Not applicable.

Code availability

Not applicable.

Author contributions

The corresponding author claims the major contribution of the paper including formulation, analysis and editing. The co-author provides guidance to verify the analysis result and manuscript editing.

Compliance with ethical standards

This article is a completely original work of its authors; it has not been published before and will not be sent to other publications until the journal's editorial board decides not to accept it for publication.

References

1. Ana F., Najeeb-ud-Din. An analytical modeling approach to the electrical behavior of the bottom-contact organic thin-film transistors in presence of the trap states. *Journal of Computational Electronics*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 543–552. <https://doi.org/10.1007/s10825-019-01314-6>
2. Marinov O., Deen M.J., Jiménez-Tejada J.A., Chen C.H. Variable-range hopping charge transport in organic thin-film transistors. *Physics Reports*, 2020, vol. 844, pp. 1–105. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.12.002>
3. Ishaku A.A., Gleskova H. Potential of low-voltage organic transistors with high on-state drain current for temperature sensor development. *Organic Electronics*, 2021, vol. 93, pp. 106152. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106152>
4. Jiménez Tejada J.A., Lopez-Varo P., Chaure N.B., Chambrier I., Cammidge A.N., Cook M.J., Jafari-Fini A., Ray A.K. Organic thin film transistors using a liquid crystalline palladium phthalocyanine as active layer. *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 123, no. 11, pp. 115501. <https://doi.org/10.1063/1.5017472>
5. Krammer M., Borchert J.W., Petritz A., Karner-Petritz E., Schider G., Stadlober B., Klauk H., Zojer K. Critical evaluation of organic thin-film transistor models. *Crystals*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 85. <https://doi.org/10.3390/cryst9020085>
6. Shiwa R., Tamura M., Matsui H., Takeda Y., Murase T., Tokito S. Charge carrier distribution in low-voltage dual-gate organic thin-film transistors. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 8, pp. 1341. <https://doi.org/10.3390/app8081341>
7. Teja K.B., Gupta N. Substrate selection framework for organic thin-film transistor based on flexibility and reliability issues. *IEEE Journal*

Литература

1. Ana F., Najeeb-ud-Din. An analytical modeling approach to the electrical behavior of the bottom-contact organic thin-film transistors in presence of the trap states // *Journal of Computational Electronics*. 2019. V. 18. N 2. P. 543–552. <https://doi.org/10.1007/s10825-019-01314-6>
2. Marinov O., Deen M.J., Jiménez-Tejada J.A., Chen C.H. Variable-range hopping charge transport in organic thin-film transistors // *Physics Reports*. 2020. V. 844. P. 1–105. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.12.002>
3. Ishaku A.A., Gleskova H. Potential of low-voltage organic transistors with high on-state drain current for temperature sensor development // *Organic Electronics*. 2021. V. 93. P. 106152. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2021.106152>
4. Jiménez Tejada J.A., Lopez-Varo P., Chaure N.B., Chambrier I., Cammidge A.N., Cook M.J., Jafari-Fini A., Ray A.K. Organic thin film transistors using a liquid crystalline palladium phthalocyanine as active layer // *Journal of Applied Physics*. 2018. V. 123. N 11. P. 115501. <https://doi.org/10.1063/1.5017472>
5. Krammer M., Borchert J.W., Petritz A., Karner-Petritz E., Schider G., Stadlober B., Klauk H., Zojer K. Critical evaluation of organic thin-film transistor models // *Crystals*. 2019. V. 9. N 2. P. 85. <https://doi.org/10.3390/cryst9020085>
6. Shiwa R., Tamura M., Matsui H., Takeda Y., Murase T., Tokito S. Charge carrier distribution in low-voltage dual-gate organic thin-film transistors // *Applied Sciences*. 2018. V. 8. N 8. P. 1341. <https://doi.org/10.3390/app8081341>
7. Teja K.B., Gupta N. Substrate selection framework for organic thin-film transistor based on flexibility and reliability issues // *IEEE*

- on *Flexible Electronics*, 2022, vol. 1, no. 2, pp. 141–149. <https://doi.org/10.1109/jflex.2022.3178674>
8. Dadhich S., Dwivedi A.D., Mathur G. Numerical simulation and analytical modelling of C8-BTBT-C8 organic transistor and analysis of semiconductor thickness. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022, vol. 862, pp. 669–680. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0252-9_60
 9. Jo S.W., Cho S., Kim C.H. Key factors affecting contact resistance in coplanar organic thin-film transistors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, vol. 55, no. 40, pp. 405101. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac8124>
 10. Pruefer J., Leise J., Borchert J.W., Klauk H., Darbandy G., Nikolaou A., Iniguez B., Gneiting T., Kloes A. Modeling the short-channel effects in coplanar organic thin-film transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, vol. 69, no. 3, pp. 1099–1106. <https://doi.org/10.1109/ted.2022.3145779>
 11. Cortes-Ordóñez H., Jacob S., Mohamed F., Ghibaudo G., Iniguez B. Analysis and compact modeling of gate capacitance in organic thin-film transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, vol. 66, no. 5, pp. 2370–2374. <https://doi.org/10.1109/ted.2019.2906827>
 12. Borthakur T., Sarma R. Top-contact pentacene-based organic thin film transistor (OTFT) with N,N'-Bis (3-methyl phenyl)-N,N'-diphenyl benzidine (TPD)/Au bilayer source-drain electrode. *Journal of Electronic Materials*, 2018, vol. 47, no. 1, pp. 627–632. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5820-2>
 13. Li N., Deng W., Wu W., Luo Z., Huang J. A mobility model considering temperature and contact resistance in organic thin-film transistors. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2020, vol. 8, pp. 189–194. <https://doi.org/10.1109/jeds.2020.2974031>
 14. Cortes-Ordóñez H., Haddad C., Mescot X., Romanjek K., Ghibaudo G., Estrada M., Cerdeira A., Iniguez B. Parameter Extraction and Compact Modeling of OTFTs From 150 K to 350 K. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, vol. 67, no. 12, pp. 5685–5692. <https://doi.org/10.1109/ted.2020.3032082>
 15. Leise J., Pruefer J., Darbandy G., Seifaei M., Manoli Y., Klauk H., Zschieschang U., Iniguez B., Kloes A. Charge-based compact modeling of capacitances in staggered multi-finger OTFTs. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2020, vol. 8, pp. 396–406. <https://doi.org/10.1109/jeds.2020.2978400>
 - Journal on *Flexible Electronics*, 2022. V. 1. N 2. P. 141–149. <https://doi.org/10.1109/jflex.2022.3178674>
 8. Dadhich S., Dwivedi A.D., Mathur G. Numerical simulation and analytical modelling of C8-BTBT-C8 organic transistor and analysis of semiconductor thickness // *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022. V. 862. P. 669–680. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0252-9_60
 9. Jo S.W., Cho S., Kim C.H. Key factors affecting contact resistance in coplanar organic thin-film transistors // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022. V. 55. N 40. P. 405101. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac8124>
 10. Pruefer J., Leise J., Borchert J.W., Klauk H., Darbandy G., Nikolaou A., Iniguez B., Gneiting T., Kloes A. Modeling the short-channel effects in coplanar organic thin-film transistors // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022. V. 69. N 3. P. 1099–1106. <https://doi.org/10.1109/ted.2022.3145779>
 11. Cortes-Ordóñez H., Jacob S., Mohamed F., Ghibaudo G., Iniguez B. Analysis and compact modeling of gate capacitance in organic thin-film transistors // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019. V. 66. N 5. P. 2370–2374. <https://doi.org/10.1109/ted.2019.2906827>
 12. Borthakur T., Sarma R. Top-contact pentacene-based organic thin film transistor (OTFT) with N,N'-Bis (3-methyl phenyl)-N,N'-diphenyl benzidine (TPD)/Au bilayer source-drain electrode // *Journal of Electronic Materials*, 2018. V. 47. N 1. P. 627–632. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5820-2>
 13. Li N., Deng W., Wu W., Luo Z., Huang J. A mobility model considering temperature and contact resistance in organic thin-film transistors // *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2020. V. 8. P. 189–194. <https://doi.org/10.1109/jeds.2020.2974031>
 14. Cortes-Ordóñez H., Haddad C., Mescot X., Romanjek K., Ghibaudo G., Estrada M., Cerdeira A., Iniguez B. Parameter Extraction and Compact Modeling of OTFTs From 150 K to 350 K // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020. V. 67. N 12. P. 5685–5692. <https://doi.org/10.1109/ted.2020.3032082>
 15. Leise J., Pruefer J., Darbandy G., Seifaei M., Manoli Y., Klauk H., Zschieschang U., Iniguez B., Kloes A. Charge-based compact modeling of capacitances in staggered multi-finger OTFTs // *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2020. V. 8. P. 396–406. <https://doi.org/10.1109/jeds.2020.2978400>

Authors

Deepika Panghal — Research Scholar, Department of ECE, Deenbandhu Chhotu Ram University of Science and Technology, Sonapat, 131039, India, <https://orcid.org/0000-0001-6769-0948>, deepikapanghal5@gmail.com

Rekha Yadav — D.Sc. Associate Professor, Department of ECE, Deenbandhu Chhotu Ram University of Science and Technology, Sonapat, 131039, India, <https://orcid.org/0000-0001-9580-9766>, Rekha.yadav.ece@dcrustrm.org

Received 21.01.2023

Approved after reviewing 22.03.2023

Accepted 16.05.2023

Авторы

Пангал Дипика — магистр, исследователь, Университет науки и технологий Динбандху Чхоту Рам, Сонипат, 131039, Индия, <https://orcid.org/0000-0001-6769-0948>, deepikapanghal5@gmail.com

Ядав Рекха — доктор наук, доцент, Университет науки и технологий Динбандху Чхоту Рам, Сонипат, 131039, Индия, <https://orcid.org/0000-0001-9580-9766>, Rekha.yadav.ece@dcrustrm.org

Статья поступила в редакцию 21.01.2023

Одобрена после рецензирования 22.03.2023

Принята к печати 16.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492

УДК 538.958, 544.174.3, 544.173

Исследование гидратов диоксида углерода в тонких пленках методом FTIR-спектроскопии при температурах 11–180 К

Олег Юрьевич Голиков^{1✉}, Дархан Есейұлы Ережеп², Дмитрий Юрьевич Соколов^{3,4}

^{1,2,3} Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, 050038, Республика Казахстан

⁴ Алматинский технологический университет, Алматы, 050012, Республика Казахстан

¹ golikov@physics.kz ✉, <https://orcid.org/0000-0002-6691-8346>

² darhan_13@physics.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

³ yasnyisokol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7966-1140>

Аннотация

Введение. Исследованы инфракрасные спектры тонких пленок смеси диоксида углерода (CO_2) и воды (H_2O), полученных методом осаждения из паровой фазы, в диапазоне температур 11–180 К. По результатам анализа спектров изучено образование гидратов и клатратов. **Метод.** Для исследования образующихся тонких пленок применены методы инфракрасной спектроскопии, масс-спектроскопии и оптического анализа. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (Fourier transform infrared, FTIR) позволила идентифицировать молекулярный состав и структурное состояние молекулярных смесей. Масс-спектроскопия и анализ интерференционной картины применены для дополнительного подтверждения образования определенных структур смеси CO_2 и H_2O . **Основные результаты.** Показано, что в смеси CO_2 и H_2O происходит образование гидратных и газовой-гидратных структур CO_2 . Образованные гидратные соединения удерживают молекулы CO_2 в своих структурах и не позволяют ему сублимировать при температуре сублимации свободного CO_2 (93 К) при давлении $P = 0,5$ мкторр. При этом температура сублимации связанных в гидратные структуры молекул CO_2 лежит в интервале 147–150 К. Для выбранного соотношения концентраций CO_2 (25 %) и H_2O (75 %) показано, что изменение в спектрах и результаты масс-спектроскопии свидетельствуют о неполной гидратизации смеси. Часть молекул CO_2 остаются в свободном состоянии и сублимируют при более низкой температуре. Подтверждено, что увеличение показателя преломления при уменьшении концентрации H_2O в смеси от 100 % до 25 % свидетельствует об увеличении менее плотных образований в сравнении с аморфными структурами конденсатов CO_2 и H_2O . **Обсуждение.** Полученные результаты расширяют знания о процессах клатратного и гидратного образований в смесях CO_2 и H_2O , о физических характеристиках их строения и изменении характеристик в зависимости от способа образования. Исследование представляет интерес для современной физики конденсированного состояния.

Ключевые слова

FTIR-спектроскопия, метод физического осаждения из паровой фазы, гидраты, клатраты, конденсированное состояние, тонкие пленки

Ссылка для цитирования: Голиков О.Ю., Ережеп Д.Е., Соколов Д.Ю. Исследование гидратов диоксида углерода в тонких пленках методом FTIR-спектроскопии при температурах 11–180 К // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 483–492. doi: 10.17586/2226-1494-2023- 23-3-483-492

Researching carbon dioxide hydrates in thin films via FTIR spectroscopy at temperatures of 11–180 K

Oleg Yu. Golikov^{1✉}, Darkhan E. Yerezhep², Dmitry Yu. Sokolov^{3,4}

^{1,2,3} Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050038, Kazakhstan

⁴ Almaty Technological University, Almaty, 050012, Kazakhstan

¹ golikov@physics.kz ✉, <https://orcid.org/0000-0002-6691-8346>

² darhan_13@physics.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>

³ yasnyisokol@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7966-1140>

© Голиков О.Ю., Ережеп Д.Е., Соколов Д.Ю., 2023

Abstract

The IR spectra of thin films of a mixture of carbon dioxide and water were obtained using the physical vapor deposition method. They were researched in the temperature range of 11–180 K. Based on the results of the research; the formation of hydrates and clathrates was investigated. Several methods were used in the course of this research. These methods are mass spectroscopy, IR spectroscopy, and optical analysis of the thin films formed. Not only the molecular composition but also the state of the structure of molecular mixtures can be determined via Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Additional data were needed to confirm the emergence of certain structures of carbon dioxide and water mixtures. The mass spectroscopy method and interference pattern analysis were utilized to obtain that data. Hydrate and gas hydrate structures of CO₂ do form in the mixture of carbon dioxide and water. This was confirmed in the course of the experiments. The CO₂ molecules are contained in their structures by the hydrate compounds formed, which prevents CO₂ from sublimating at the sublimation temperature of free CO₂ (93 K) under the pressure of $P = 0.5 \mu\text{Torr}$. Meanwhile, the sublimation temperature of CO₂ molecules bound in hydrate structures becomes equal to 147–150 K. The ratio of CO₂ and H₂O concentrations was chosen to be 25 % and 75 %, respectively. For this ratio, the changes in the spectra and the results obtained via mass spectroscopy indicate incomplete hydration of the mixture. Still, some CO₂ molecules remain free and sublime at a lower temperature. It was found that the concurrent increase in the refractive index and decrease in the concentration of H₂O from 100 % to 25 % indicate the growth of the formations that are less dense compared with the amorphous structures of CO₂ and H₂O condensates. The results obtained in the course of this research broaden the knowledge of the processes of clathrate and hydrate formation in mixtures of CO₂ and H₂O, the physical characteristics of their structures, and the changes in their characteristics depending on the way they are formed.

Keywords

FTIR spectroscopy, physical vapor deposition method, hydrates, clathrates, condensed state, thin films

For citation: Golikov O.Yu., Yerezhap D.E., Sokolov D.Yu. Researching carbon dioxide hydrates in thin films via FTIR spectroscopy at temperatures of 11–180 K. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 483–492 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-483-492

Введение

Захват и хранение молекул диоксида углерода (CO₂) является одной из наиболее перспективных стратегий по борьбе с глобальным потеплением, угрожающим экологической катастрофой [1–3]. Известно, что молекулы CO₂, залегающие на глубине свыше 400 метров под водой (H₂O), изменяют свою структуру и образуют газовый гидрат, который блокирует его испарение на поверхность H₂O и в атмосферу, что, в свою очередь, позволяет избежать образования парниковых газов. Данная концепция легла в основу одного из ключевых факторов снижения выбросов CO₂ [4]. Кроме этого, газогидратные образования содержат большое количество относительно чистой энергии в сравнении с другими традиционными источниками углеводородов [5]. В научных работах, посвященных ряду передовых технологий добычи полезных ископаемых [6, 7], описано, что из газовых гидратов также может быть получен природный газ. Также важно знать условия, при которых молекулы CO₂ способны создавать и оставаться в структурах газовых гидратов.

Газовые гидраты представляют собой соединения, образованные молекулами H₂O, связанными водородной связью в сферическую форму, которая стабилизируется за счет молекулы-гостя (NO₂, Ar, CO₂). Молекула-гость во время стабилизации «запирается» внутри решетки H₂O и хранится внутри нее продолжительное время, пока целостность водородной связи не будет нарушена [8]. Уникальной физической особенностью газовых гидратов является гостевая избирательность [9, 10], которая имеет особую важность при создании технологии отделения и хранения определенных газов. Можно сказать, что улавливание молекул CO₂ или любых других гостевых молекул может легко достигаться даже в смешанных газах. Газовые гидраты

также показывают очень хорошие показатели хранения газа в созданной структуре [11–13].

Концепция хранения молекул CO₂ в так называемой гидратной герметизации была предложена в работе [14]. Позже данный эффект был подробнее описан в работе [15], а его применение в [16–18], где описана возможность и техническая осуществимость по хранению молекул CO₂ с использованием газовой-гидратного захвата.

Ряд работ, изучающих газовые гидраты, направлен на более фундаментальные исследования, например на исследования: скорости образования гидратной структуры [19, 20]; клатратного (газово-гидратного) разделения на основе технологии улавливания в интегрированном комбинированном цикле газификации углерода [21, 24]; влияний температуры и давления на образования газовых гидратов [25]. Изучение поведения и особенностей образования гидратных и газовой-гидратных структур не прекращается и по сей день, являясь одним из актуальных направлений в области экологии и энергетики [26–29].

Настоящая работа включает в себя исследование процесса образования, а также исследование основных спектральных характеристик тонких пленок и газовой-гидратных структур молекул CO₂, полученных при помощи метода осаждения из газовой фазы. Основные инструменты, с помощью которых выполнен анализ полученных образцов: инфракрасная (ИК) спектроскопия с преобразованием Фурье (Fourier transform infrared, FTIR-спектроскопия) среднего ИК диапазона (400–4200 см⁻¹), а также масс-спектроскопия. Выбор FTIR обусловлен несколькими факторами: данный метод используется исследователями и хорошо зарекомендовал себя во многих отраслях науки, в том числе при исследовании тонких пленок и криоконденсатов [30–32]; в среднем ИК диапазоне можно заметить большую часть

спектральных пиков [33–35]. Масс-спектропия как метод в настоящей работе применяется для верификации данных.

Методология

Тонкие пленки исследуемых соединений $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ получены методом криовакуумной конденсации из газовой фазы (метод физического осаждения из паровой фазы, PVD [36]). Выполнено осаждение при $T = 11$ К на специальную, покрытую золотом, подложку полуавтоматической установки криовакуумного спектрофотометра (рис. 1). Метод осаждения из газовой фазы является одним из наиболее эффективных способов получения тонких пленок криоконденсатов в хорошо контролируемых структурно-фазовых состояниях [37–39]. Он также широко применяется в исследованиях физических свойств соединений при низких и сверхнизких температурах [39–43].

Газоанализатор Extorr XT100 («Extorr Inc.», США) представляет собой квадрупольный анализатор остаточных газов и имеет в составе встроенный в подложку элемент нагрева, позволяющий количественно определять компоненты при их сублимации. Диапазон температур, при котором производилось снятие значений спек-

тров, составил 11–200 К при давлении $P = 0,5$ мкторр. Толщина создаваемых пленок оставалась одинаковой для всех экспериментов в пределах всего температурного диапазона конденсации.

Важной особенностью установки является наличие автоматизированного модуля контроля температуры, выполненного с помощью программного комплекса LabView («National Instruments», США). Данный модуль связывает между собой охлаждающую подложку, машину Гиффорда–МакМагона, нагреватель, термодатчик DT-670 и PID-регулятор термоконтроллера LakeShore 325 («LakeShore», США). С его помощью осуществлено более быстрое достижение необходимых температур и дальнейшая стабилизация температуры вблизи контрольной точки снятия спектральных характеристик [44]. Кроме этого, при достижении контрольной точки модуль выполняет отключение машины Гиффорда–МакМагона, создающей вибрационные колебания во время своей работы, что позволяет уменьшить искажения в ИК спектрах.

Спектральные характеристики образцов детектированы с помощью FTIR-спектрометра ФСМ 2203 («ИНФРАСПЕК», Россия), обладающего максимальным спектральным разрешением равным $0,125 \text{ см}^{-1}$ и имеющего спектральный диапазон $370\text{--}7800 \text{ см}^{-1}$.

Коэффициент преломления и толщина нанесенной на подложку тонкой пленки измерены при помощи интерференционных картин, полученных с двух лучей полупроводникового лазера в результате деления, которые детектированы фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) P25A («Sens-Tech», Великобритания). Углы падения двух лучей составляют $\alpha_1 = 0^\circ$ и $\alpha_2 = 45^\circ$. Длина волны лазера $\lambda = 406 \text{ нм}$, максимальная чувствительность фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) около 400 нм , что важно для получения качественных интерференционных картин. Расчет коэффициентов преломления выполним по формуле [45]:

$$n = \sqrt{\frac{\sin^2 \alpha_2 - \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 \sin^2 \alpha_1}{1 - \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2}}$$

где t_1 и t_2 — периоды; α_1 и α_2 — углы падения лучей первого и второго лазеров.

Формирование и ход лазерного луча в ходе эксперимента показаны в виде 3D-модели (рис. 2). С помощью данных, регистрируемых с лазеров, проверено направление испарения: действительно ли сублимация происходит с подложки, на которой расположен образец, или это выход остаточных газов из какой-то другой части вакуумной камеры. При сублимации исследуемой смеси с подложки напряжение сигнала, поступающее на ФЭУ, увеличивается в разы из-за сублимата, влияющего на ход луча.

В ходе исследований созданы смеси в различных концентрационных соотношениях H_2O и CO_2 . Для этого использована система натекания 11 (рис. 1). При создании необходимых пропорций H_2O и CO_2 применен

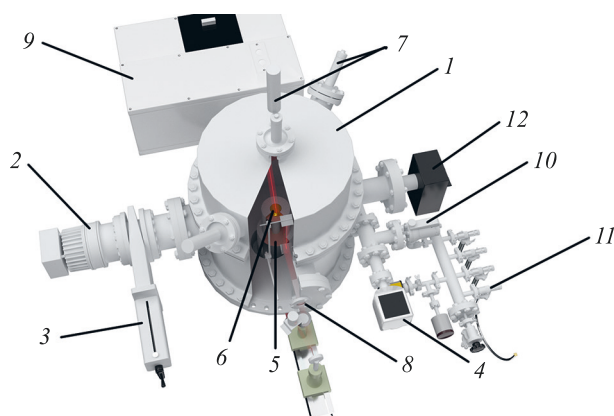


Рис. 1. 3D-модель экспериментальной установки криовакуумного спектрофотометра.

- 1 — вакуумная камера; 2 — вакуумный насос Turbo-V-301;
- 3 — вакуумная задвижка CFF-100; 4 — датчик давления FRG-700; 5 — машина Гиффорда–МакМагона; 6 — подложка;
- 7 — фотоумножитель, лазерный интерферометр; 8 — источник света, оптический канал; 9 — инфракрасный спектрометр;
- 10 — высокоточная система напуска газа в камеру;
- 11 — система напуска в систему производства смеси;
- 12 — масс-спектрометр Extorr XT100

Fig. 1. A 3D model of the experimental cryovacuum spectrophotometer apparatus.

- 1 — vacuum chamber; 2 — Turbo-V-301 vacuum pump;
- 3 — CFF-100 vacuum gate valve; 4 — FRG-700 pressure sensor; 5 — Gifford-McMahon machine; 6 — substrate;
- 7 — photomultiplier, laser interferometer; 8 — light source, optical channel; 9 — infrared spectrometer; 10 — a high-precision system of injecting gas into the chamber; 11 — a system of injecting the mixture into the production system; 12 — Extorr XT100 mass spectrometer

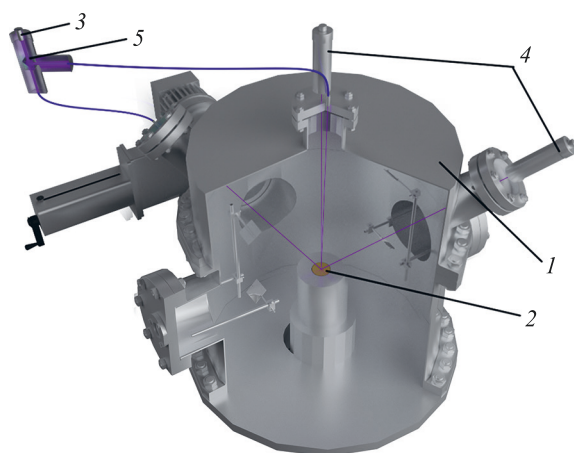


Рис. 2. 3D-модель формирования лазерного пучка при криовакuumной конденсации.

1 — вакуумная камера; 2 — подложка; 3 — лазер;
4 — фотомножители; 5 — оптический сплиттер

Fig. 2. A 3D model of laser beam formation in the process of cryovacuum condensation:

1 — vacuum chamber; 2 — substrate; 3 — laser;
4 — photomultipliers; 5 — optical splitter

закон Дальтона о парциальном давлении газовой смеси. Последовательность создания образца состоит в следующем:

- создание области низкого давления путем откачки воздуха и остаточных паров из небольшого объема системы натекания, в котором будет производиться дальнейшее создание смеси для получения чистой среды;
- подача в откачанный объем вещества будущей смеси, обладающее меньшим давлением насыщенных паров (H_2O);
- подача второго вещества (CO_2). При этом по значениям давления после напуска первого и второго веществ определим их соотношение;
- подача созданной смеси в вакуумную камеру с последующим осаждением на подложку.

В экспериментах использованы: CO_2 чистотой 99,999 % (ТОО «ИСХАН ТЕХНО-ГАЗ», г. Алматы, Казахстан) с максимальной объемной долей кислорода не более 0,0005 %; пары H_2O не более 0,0007 %; дистиллированная вода с массовой долей остатка после выпаривания не более 0,005 % от объема.

Результаты и обсуждение

Коэффициент преломления и скорость роста.

В ходе эксперимента определены скорость роста конденсата и показатели преломления для ряда различных концентраций CO_2 и H_2O при температурах T равных 11, 45, 80 и 110 К. Данные, полученные с помощью интерференционных картин двух лазерных лучей для смесей H_2O и CO_2 , представлены в табл. 1 и 2. Видно, что по мере приближения концентрации H_2O в смеси к 25 % (H_2O (25 %) + CO_2 (75 %), табл. 2) наблюдается увеличение показателя преломления. Полученная закономерность свидетельствует о росте более плотных структур, чем аморфные конденсаты CO_2 или аморфный лед H_2O . Данная закономерность проявляется и в других газовой-гидратных смесях [42].

По данным табл. 1 заметно, что по мере увеличения температуры конденсации коэффициент преломления для смеси H_2O (85 %) + CO_2 (15 %) увеличивается до 80 К, а затем становится меньше при 110 К. Вероятно это связано с тем, что температура сублимации свободных молекул CO_2 при данном давлении $P = 0,5$ мкторр составляет 93 К.

FTIR-спектры. Значения частот асимметричных колебаний (мода ν_3) чаще других используются для идентификации и описания газовых, твердых, гидратных и газогидратных образований CO_2 в различных соединениях [33–35]. В настоящей работе на данном факте сосредоточено основное внимание. На рис. 3 изображены колебательные моды двух диапазонов. Первый диапазон 2265–2295 cm^{-1} (рис. 3, а) характерен для асимметричных колебаний изотопа $O^{16}C^{13}O^{16}$, а второй — 2310–2390 cm^{-1} (рис. 3, б) — для молекул чистого диоксида углерода $O^{16}C^{12}O^{16}$. Колебания на более высоких частотах (ν) (2279 и 2283 cm^{-1}) для молекул $O^{16}C^{13}O^{16}$ можно отнести к колебаниям мелких структур диоксида углерода (5^{12}), а колебания на частоте 2275 cm^{-1} к колебаниям больших структур (5^{1262}).

Асимметричные колебательные спектры на частотах 2275 и 2279 cm^{-1} отражают корреляцию с FTIR-спектрами газовых гидратов $O^{16}C^{13}O^{16}$ sI типа [46]. Отметим, что кроме самого наличия пиков, коррелируют также и наличие сдвига в сторону уменьшения волнового числа при увеличении температуры подложки. Интересной особенностью является наличие раздвоенности основного пика на дополнительную

Таблица 1. Зависимость коэффициента преломления и скорости роста от температуры

Table 1. Dependence of the refractive index and growth rate vs. the temperature

Состав	Температура, К	Скорость роста, мкм/с	Коэффициент преломления
H_2O (85 %) + CO_2 (15 %)	11	0,0167	1,2567
	45	0,0141	1,3293
	80	0,0110	1,4044
	110	0,0052	1,2875
CO_2 (100 %)	11	0,0230	1,2320
	45	0,0138	1,3935
H_2O (100 %)	11	0,0167	1,2231

Таблица 2. Зависимость коэффициента преломления и скорости роста от концентрации, при температуре $T = 11$ КTable 2. Dependence of the refractive index and growth rate vs. the concentration at a temperature of $T = 11$ К

Состав	Скорость роста, мкм/с	Коэффициент преломления
CO ₂ (100 %)	0,0118	1,2320
H ₂ O (25 %) + CO ₂ (75 %)	0,0114	1,3381
H ₂ O (50 %) + CO ₂ (50 %)	0,0176	1,2860
H ₂ O (75 %) + CO ₂ (25 %)	0,0181	1,2760
H ₂ O (80 %) + CO ₂ (20 %)	0,0166	1,2703
H ₂ O (85 %) + CO ₂ (15 %)	0,0166	1,2708
H ₂ O (90 %) + CO ₂ (10 %)	0,0155	1,2539
H ₂ O (95 %) + CO ₂ (5 %)	0,0173	1,2330
H ₂ O (100 %)	0,0167	1,2231

частоту 2283 см^{-1} . Эту частоту также можно отнести к колебаниям молекул изотопа $\text{O}^{16}\text{C}^{13}\text{O}^{16}$ [47]. Заметим, что с повышением температуры интенсивность данного колебания ослабевает, а после 94 К исчезает. Это можно связать с тем, что данный пик относится к колебаниям свободных молекул $\text{O}^{16}\text{C}^{13}\text{O}^{16}$, которые не организовали водородную связь с молекулами H_2O , из-за чего при достижении температуры сублимации чистого CO_2 они испаряются. О том, что данный пик относится к частотам колебаний газообразного и льда $\text{O}^{16}\text{C}^{13}\text{O}^{16}$, также говорится в работе [33].

Спектры ассиметричных мод растягивания ν_3 для молекул $\text{O}^{16}\text{C}^{12}\text{O}^{16}$, которые наблюдались в ходе экспериментов, расположены на рис. 3, *b* (частоты 2340 и 2357 см^{-1}). В работе [33] колебательный пик на частоте 2357 см^{-1} относят к колебаниям чистого газообразного

$\text{O}^{16}\text{C}^{12}\text{O}^{16}$. Колебательный пик на частоте 2340 см^{-1} в разных источниках интерпретируют по-разному, так как и газ, и лед, и гидрат $\text{O}^{16}\text{C}^{12}\text{O}^{16}$ демонстрируют ассиметричные колебания на данной частоте [33, 48, 49]. Авторы данной работы предполагают, что полученный пик относится к газовому гидрату $\text{O}^{16}\text{C}^{12}\text{O}^{16}$ sI-типа, так как наблюдается наличие молекул CO_2 после температуры сублимации, привычной для льдов и газов CO_2 . Пик на частоте 2379 см^{-1} является несвойственным пиком изотопа $\text{O}^{16}\text{C}^{13}\text{O}^{16}$ [47] и относится к газовой структуре несвязанных с H_2O молекул CO_2 .

В ходе экспериментов колебания второго резонанса Ферми не наблюдались. Однако в работе [33] показано их ожидаемое местоположение. Отсутствие данных пиков в ходе настоящих экспериментов предположительно связано с тем, что водяной лед демонстрирует высокую интенсивность поглощения в данном диапазоне, тем самым не позволяя обнаружить более слабые пики на частотах $3580\text{--}3620\text{ см}^{-1}$.

На рис. 4 представлены пики поглощения первого резонанса Ферми. Как и в случае с колебательным пиком на частоте 2340 см^{-1} , данный участок представляет значительные сложности в интерпретации из-за большой схожести колебательных спектров газовых, гидратных и клатратных соединений CO_2 и H_2O . На основе работ [33, 35, 46] можно предположить, что пики на частоте 3709 см^{-1} относятся к характерным пикам гидрата CO_2 , как и поглощение на частоте 3704 см^{-1} .

Уникальная зависимость видна на трехмерном представлении колебательных спектров ν_3 (рис. 5). Отметим, что началом сублимации свободных молекул CO_2 при давлении $P = 0,5$ мкторр является температура $T = 94\text{ К}$ [50]. Ассиметричные колебания ν_3 для молекул CO_2 на частоте 2340 см^{-1} присутствуют вплоть до 150 К . Это наблюдение может говорить о том, что часть молекул CO_2 остается в составе смеси после преодоле-

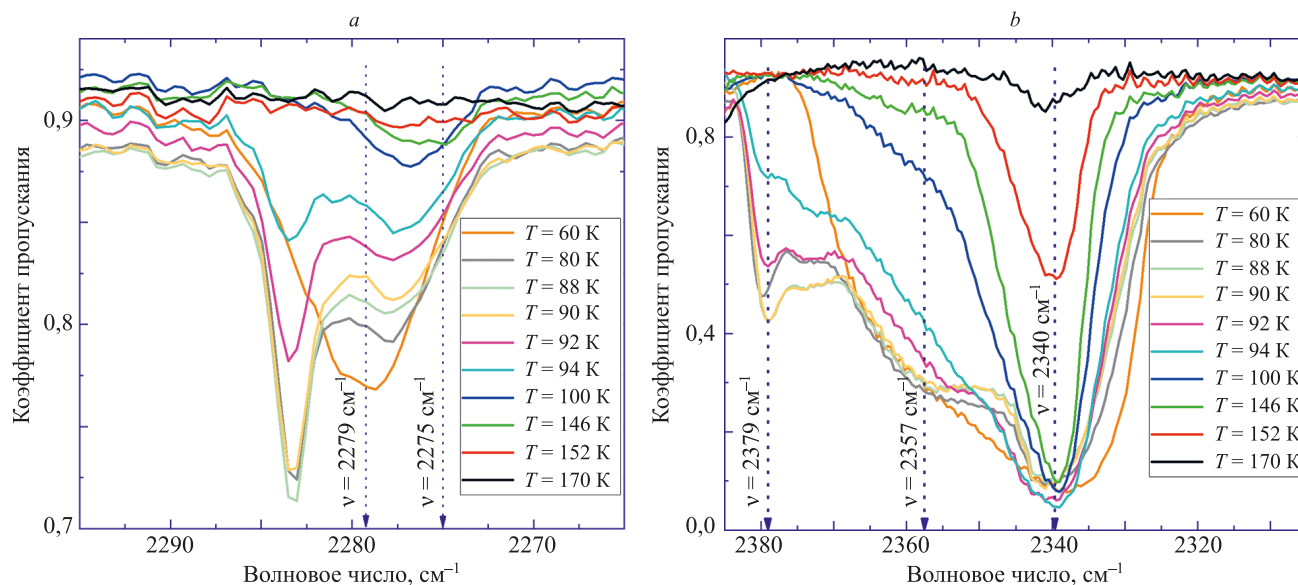


Рис. 3. FTIR-спектр диоксида углерода в зависимости от температуры в колебательных зонах: $2265\text{--}2295\text{ см}^{-1}$ (ν_3) изотопа $\text{O}^{16}\text{C}^{13}\text{O}^{16}$ (a) и $2310\text{--}2380\text{ см}^{-1}$ (ν_3) изотопа $\text{O}^{16}\text{C}^{12}\text{O}^{16}$ (b)

Fig 3. FTIR spectrum of the carbon dioxide vs. the temperature in the oscillation zones of: $2265\text{--}2295\text{ см}^{-1}$ (ν_3) of the $\text{O}^{16}\text{C}^{13}\text{O}^{16}$ isotope (a) and $2310\text{--}2380\text{ см}^{-1}$ (ν_3) of the $\text{O}^{16}\text{C}^{12}\text{O}^{16}$ isotope (b)

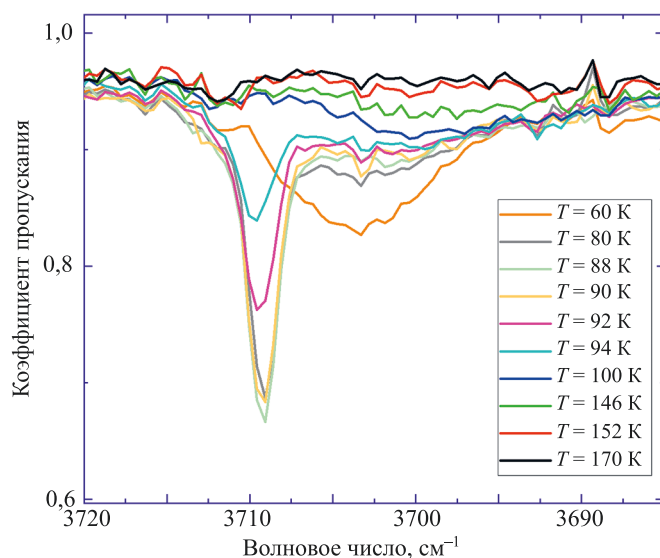


Рис. 4. FTIR-спектр диоксида углерода в зависимости от температуры в диапазоне первого резонанса Ферми
Fig 4. FTIR spectrum of the carbon dioxide vs. the temperature in the range of the first Fermi resonance

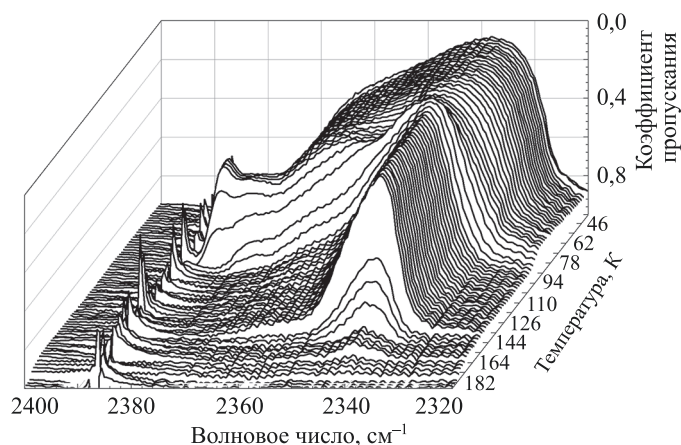


Рис. 5. Температурная эволюция колебательный моды ν_3 молекулы диоксида углерода в диапазоне частот 2320–2400 cm^{-1}
Fig. 5. Thermal evolution of the ν_3 vibrational mode of the carbon dioxide molecule in the frequency range 2320–2400 cm^{-1}

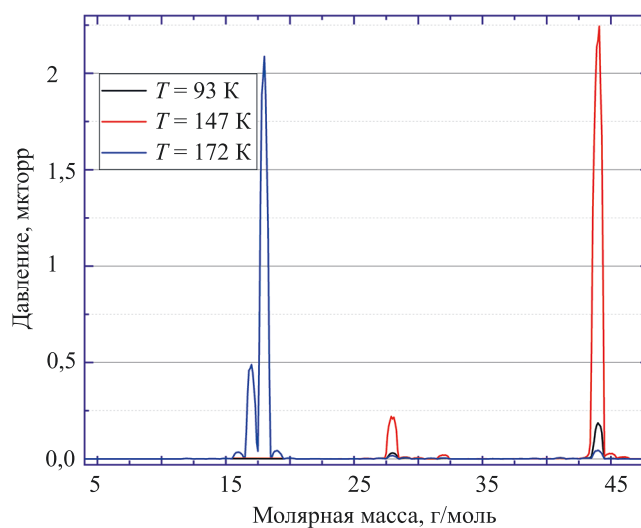


Рис. 6. Масс-спектры конденсационной смеси воды и диоксида углерода при разных температурах
Fig. 6. The mass spectra of the condensation mixture of the water and the carbon dioxide at different temperatures

ния температуры сублимации, задерживаясь, по всей видимости, в газовой-гидратных структурах.

Заметим, что форма колебательного пика на частотном диапазоне 2320–2380 см⁻¹ претерпевает изменения после достижения температуры в 94 К. Вероятнее всего, это связано с испарением молекул свободного изотопа O¹⁶C¹³O¹⁶ или заключенного в мелких структурах (S¹²). Требуется провести еще ряд исследований для того чтобы с уверенностью заявлять, что данные пики принадлежат изотопу O¹⁶C¹³O¹⁶.

Масс-спектры. Масс-спектры смеси H₂O + CO₂, снятые во время сублимационных процессов, показаны на рис. 6. Полученные результаты в первую очередь связаны с идентификацией сублимирующего вещества по его молярной массе. Видно, что частично сублимация молекул CO₂ и H₂O протекает при их привычных для давления $P = 0,5$ мкторр температурах: для CO₂ — около 93 К (наблюдается незначительная сублимация), для H₂O — около 172 К (полная сублимация молекул H₂O).

При этом на рис. 6 видно, что часть молекул CO₂ остается в составе смеси и после преодоления температуры его сублимации. Единственным возможным описанием данного явления считается образование гидратных структур, которые препятствуют сублимации части молекул CO₂, задерживая их в составе смеси. Предполагается, что данные структуры являются газовыми гидратами, и молекулы CO₂ «застревают» в сферически-связанных молекулах H₂O, которые удерживают их и не позволяют сублимировать при температуре 93 К. Представленные выше FTIR-спектры также указывают на сохранение CO₂ в составе смеси после преодоления температуры сублимации.

Заключение

Исследованы структурные образования в смеси диоксида углерода (CO₂) и воды (H₂O), полученные методом PVD. Для достижения поставленных целей использованы несколько методов: масс-спектропия, оптические исследования и FTIR-спектропия.

На основе полученных данных сделаны следующие выводы. В ходе экспериментов в смеси происходит образование гидратных и газовой-гидратных структур CO₂. Образованные гидратные соединения удерживают молекулы CO₂ в своих структурах, не позволяя сублимировать при температуре 93 К (температура сублимации свободного CO₂ при давлении $P = 0,5$ мкторр). При этом сублимационная температура связанных в гидратные структуры молекул CO₂ равна 147–150 К. Для выбранной концентрации CO₂ (25 %) — H₂O (75 %) изменения в снятых спектрах и данные, полученные с помощью масс-спектропии, говорят о неполной гидратизации смеси. Часть молекул CO₂ остается в свободном состоянии и сублимирует ранее. Увеличение показателя преломления при приближении концентрации H₂O в смеси к 25 % свидетельствует о росте более плотных по сравнению с аморфными конденсатами CO₂ и аморфным льдом H₂O структур.

В дальнейшем для более точного изучения условий образования гидратных и газовой-гидратных соединений CO₂ требуется провести большее количество исследований. Исследования в области гидратных и клатратных структур не обладают достаточным количеством данных о физических характеристиках их строения и зависимости определенных характеристик от способа образования гидрата или клатрата. По этой причине важно исследовать данную область с разных сторон, применяя различные методы получения гидратов, в том числе в тонких пленках, полученных с помощью методов криовакуумного осаждения из газовой среды.

Литература

1. Smith S.J., Wigley M.L. Global warming potentials: 1. Climatic implications of emissions reductions // *Climatic Change*. 2000. V. 44. N 4. P. 445–457. <https://doi.org/10.1023/A:1005584914078>
2. Pierrehumbert R.T. Short-lived climate pollution // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2014. V. 42. N 1. P. 341–379. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054843>
3. Edwards M.R., McNerney J., Trancik J.E. Testing emissions equivalency metrics against climate policy goals // *Environmental Science & Policy*. 2016. V. 66. P. 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.08.013>
4. Schrag D.P. Storage of carbon dioxide in offshore sediments // *Science*. 2009. V. 325. N 5948. P. 1658–1659. <https://doi.org/10.1126/science.1175750>
5. Kvenvolden K.A. Gas hydrates-geological perspective and global change // *Reviews of Geophysics*. 1993. V. 31. N 2. P. 173–187. <https://doi.org/10.1029/93rg00268>
6. Konno Y., Fujii T., Sato A., Akamine K., Naiki M., Masuda Y., Yamamoto K., Nagao J. Key findings of the world's first offshore methane hydrate production test off the coast of Japan: Toward future commercial production // *Energy & Fuels*. 2017. V. 31. N 3. P. 2607–2616. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03143>
7. Li J., Ye J., Qin X., Qiu H., Wu N., Lu H., Xie W., Lu J., Peng F., Xu Z., Lu C., Kuang Z., Wei J., Liang Q., Lu H., Kou B. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea // *China Geology*. 2018. V. 1. N 1. P. 5–16. <https://doi.org/10.31035/cg2018003>

References

1. Smith S.J., Wigley M.L. Global warming potentials: 1. Climatic implications of emissions reductions. *Climatic Change*, 2000, vol. 44, no. 4, pp. 445–457. <https://doi.org/10.1023/A:1005584914078>
2. Pierrehumbert R.T. Short-lived climate pollution. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2014, vol. 42, no. 1, pp. 341–379. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054843>
3. Edwards M.R., McNerney J., Trancik J.E. Testing emissions equivalency metrics against climate policy goals. *Environmental Science & Policy*, 2016, vol. 66, pp. 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.08.013>
4. Schrag D.P. Storage of carbon dioxide in offshore sediments. *Science*, 2009, vol. 325, no. 5948, pp. 1658–1659. <https://doi.org/10.1126/science.1175750>
5. Kvenvolden K.A. Gas hydrates-geological perspective and global change. *Reviews of Geophysics*, 1993, vol. 31, no. 2, pp. 173–187. <https://doi.org/10.1029/93rg00268>
6. Konno Y., Fujii T., Sato A., Akamine K., Naiki M., Masuda Y., Yamamoto K., Nagao J. Key findings of the world's first offshore methane hydrate production test off the coast of Japan: Toward future commercial production. *Energy & Fuels*, 2017, vol. 31, no. 3, pp. 2607–2616. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b03143>
7. Li J., Ye J., Qin X., Qiu H., Wu N., Lu H., Xie W., Lu J., Peng F., Xu Z., Lu C., Kuang Z., Wei J., Liang Q., Lu H., Kou B. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea. *China Geology*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 5–16. <https://doi.org/10.31035/cg2018003>

8. Sloan Jr. E.D., Koh C.A., Koh C.A. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. CRC Press, 2007. 752 p. <https://doi.org/10.1201/9781420008494>
9. Ricaurte M., Dicharry Ch., Renaud X., Torr  J.-Ph. Combination of surfactants and organic compounds for boosting CO₂ separation from natural gas by clathrate hydrate formation // *Fuel*. 2014. V. 122. P. 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.025>
10. Tomita S., Akatsu S., Ohmura R. Experiments and thermodynamic simulations for continuous separation of CO₂ from CH₄ + CO₂ gas mixture utilizing hydrate formation // *Applied Energy*. 2015. V. 146. P. 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.088>
11. Mimachi H., Takahashi M., Takeya S., Gotoh Y., Yoneyama A., Hyodo K., Takeda T., Murayama T. Effect of long-term storage and thermal history on the gas content of natural gas hydrate pellets under ambient pressure // *Energy & Fuels*. 2015. V. 29. N 8. P. 4827–4834. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00832>
12. Malla B.K., Vishwakarma G., Chowdhury S., Selvarajan P., Pradeep T. Formation of ethane clathrate hydrate in ultrahigh vacuum by thermal annealing // *Journal of Physical Chemistry C*. 2022. V. 126. N 42. P. 17983–17989. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c06264>
13. Li M., Li K., Yang L., Su Y., Zhao J., Song Y. Evidence of guest–guest interaction in clathrates based on in situ Raman spectroscopy and density functional theory // *Journal of Physical Chemistry Letters*. 2022. V. 13. N 1. P. 400–405. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.1c03857>
14. Koide H., Takahashi M., Tsukamoto H., Shindo Y. Self-trapping mechanisms of carbon dioxide in the aquifer disposal // *Energy Conversion and Management*. 1995. V. 36. N 6–9. P. 505–508. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(95\)00054-h](https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)00054-h)
15. Tohidi B., Yang J., Salehabadi M., Anderson R., Chapoy A. CO₂ hydrates could provide secondary safety factor in subsurface sequestration of CO₂ // *Environmental Science & Technology*. 2010. V. 44. N 4. P. 1509–1514. <https://doi.org/10.1021/es902450j>
16. Zheng J., Chong Z.R., Qureshi M.F., Linga P. Carbon dioxide sequestration via gas hydrates: a potential pathway toward decarbonization // *Energy & Fuels*. 2020. V. 34. N 9. P. 10529–10546. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02309>
17. Qureshi M.F., Dhamu V., Usadi A., Barckholtz T.A., Mhadeshwar A.B., Linga P. CO₂ Hydrate formation kinetics and morphology observations using high-pressure liquid CO₂ applicable to sequestration // *Energy & Fuels*. 2022. V. 36. N 18. P. 10627–10641. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c03840>
18. Takahashi T., Sato T. Inclusive environmental impact assessment indices with consideration of public acceptance: Application to power generation technologies in Japan // *Applied Energy*. 2015. V. 144. P. 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.053>
19. Englezos P., Kalogerakis N., Dholabhai P.D., Bishnoi P.R. Kinetics of formation of methane and ethane gas hydrates // *Chemical Engineering Science*. 1987. V. 42. N 11. P. 2647–2658. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(87\)87015-x](https://doi.org/10.1016/0009-2509(87)87015-x)
20. Ribeiro C.P., Lage P.L.C. Gas-liquid direct-contact evaporation: A review // *Chemical Engineering & Technology*. 2005. V. 28. N 10. P. 1081–1107. <https://doi.org/10.1002/ceat.200500169>
21. Linga P., Kumar R., Englezos P. Gas hydrate formation from hydrogen/carbon dioxide and nitrogen/carbon dioxide gas mixtures // *Chemical Engineering Science*. 2007. V. 62. N 16. P. 4268–4276. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.04.033>
22. Cai J., Zhang Y., Xu C.-G., Xia Z.-M., Chen Z.-Y., Li X.-S. Raman spectroscopic studies on carbon dioxide separation from fuel gas via clathrate hydrate in the presence of tetrahydrofuran // *Applied Energy*. 2018. V. 214. P. 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.055>
23. Li X.-S., Xu C.-G., Chen Z.-Y., Wu H.-J. Hydrate-based pre-combustion carbon dioxide capture process in the system with tetra-n-butyl ammonium bromide solution in the presence of cyclopentane // *Energy*. 2011. V. 36. N 3. P. 1394–1403. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.034>
24. Liu H., Wang J., Chen G., Liu B., Dandekar A., Wang B., Zhang X., Sun C., Ma Q. High-efficiency separation of a CO₂/H₂ mixture via hydrate formation in W/O emulsions in the presence of cyclopentane and TBAB // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. V. 39. N 15. P. 7910–7918. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.094>
25. Kumar R., Wu H., Englezos P. Incipient hydrate phase equilibrium for gas mixtures containing hydrogen, carbon dioxide and propane //
8. Sloan Jr. E.D., Koh C.A., Koh C.A. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. CRC Press, 2007. 752 p. <https://doi.org/10.1201/9781420008494>
9. Ricaurte M., Dicharry Ch., Renaud X., Torr  J.-Ph. Combination of surfactants and organic compounds for boosting CO₂ separation from natural gas by clathrate hydrate formation. *Fuel*, 2014, vol. 122, pp. 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.025>
10. Tomita S., Akatsu S., Ohmura R. Experiments and thermodynamic simulations for continuous separation of CO₂ from CH₄ + CO₂ gas mixture utilizing hydrate formation. *Applied Energy*, 2015, vol. 146, pp. 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.088>
11. Mimachi H., Takahashi M., Takeya S., Gotoh Y., Yoneyama A., Hyodo K., Takeda T., Murayama T. Effect of long-term storage and thermal history on the gas content of natural gas hydrate pellets under ambient pressure. *Energy & Fuels*, 2015, vol. 29, no. 8, pp. 4827–4834. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00832>
12. Malla B.K., Vishwakarma G., Chowdhury S., Selvarajan P., Pradeep T. Formation of ethane clathrate hydrate in ultrahigh vacuum by thermal annealing. *Journal of Physical Chemistry C*, 2022, vol. 126, no. 42, pp. 17983–17989. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c06264>
13. Li M., Li K., Yang L., Su Y., Zhao J., Song Y. Evidence of guest–guest interaction in clathrates based on in situ Raman spectroscopy and density functional theory. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 400–405. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.1c03857>
14. Koide H., Takahashi M., Tsukamoto H., Shindo Y. Self-trapping mechanisms of carbon dioxide in the aquifer disposal. *Energy Conversion and Management*, 1995, vol. 36, no. 6–9, pp. 505–508. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(95\)00054-h](https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)00054-h)
15. Tohidi B., Yang J., Salehabadi M., Anderson R., Chapoy A. CO₂ hydrates could provide secondary safety factor in subsurface sequestration of CO₂. *Environmental Science & Technology*, 2010, vol. 44, no. 4, pp. 1509–1514. <https://doi.org/10.1021/es902450j>
16. Zheng J., Chong Z.R., Qureshi M.F., Linga P. Carbon dioxide sequestration via gas hydrates: a potential pathway toward decarbonization. *Energy & Fuels*, 2020, vol. 34, no. 9, pp. 10529–10546. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02309>
17. Qureshi M.F., Dhamu V., Usadi A., Barckholtz T.A., Mhadeshwar A.B., Linga P. CO₂ Hydrate formation kinetics and morphology observations using high-pressure liquid CO₂ applicable to sequestration. *Energy & Fuels*, 2022, vol. 36, no. 18, pp. 10627–10641. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c03840>
18. Takahashi T., Sato T. Inclusive environmental impact assessment indices with consideration of public acceptance: Application to power generation technologies in Japan. *Applied Energy*, 2015, vol. 144, pp. 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.053>
19. Englezos P., Kalogerakis N., Dholabhai P.D., Bishnoi P.R. Kinetics of formation of methane and ethane gas hydrates. *Chemical Engineering Science*, 1987, vol. 42, no. 11, pp. 2647–2658. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(87\)87015-x](https://doi.org/10.1016/0009-2509(87)87015-x)
20. Ribeiro C.P., Lage P.L.C. Gas-liquid direct-contact evaporation: A review. *Chemical Engineering & Technology*, 2005, vol. 28, no. 10, pp. 1081–1107. <https://doi.org/10.1002/ceat.200500169>
21. Linga P., Kumar R., Englezos P. Gas hydrate formation from hydrogen/carbon dioxide and nitrogen/carbon dioxide gas mixtures. *Chemical Engineering Science*, 2007, vol. 62, no. 16, pp. 4268–4276. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.04.033>
22. Cai J., Zhang Y., Xu C.-G., Xia Z.-M., Chen Z.-Y., Li X.-S. Raman spectroscopic studies on carbon dioxide separation from fuel gas via clathrate hydrate in the presence of tetrahydrofuran. *Applied Energy*, 2018, vol. 214, pp. 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.055>
23. Li X.-S., Xu C.-G., Chen Z.-Y., Wu H.-J. Hydrate-based pre-combustion carbon dioxide capture process in the system with tetra-n-butyl ammonium bromide solution in the presence of cyclopentane. *Energy*, 2011, vol. 36, no. 3, pp. 1394–1403. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.034>
24. Liu H., Wang J., Chen G., Liu B., Dandekar A., Wang B., Zhang X., Sun C., Ma Q. High-efficiency separation of a CO₂/H₂ mixture via hydrate formation in W/O emulsions in the presence of cyclopentane and TBAB. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, no. 15, pp. 7910–7918. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.094>
25. Kumar R., Wu H., Englezos P. Incipient hydrate phase equilibrium for gas mixtures containing hydrogen, carbon dioxide and propane.

- Fluid Phase Equilibria, 2006. V. 244. N 2. P. 167–171. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2006.04.008>
26. Wang X., Zhang F., Lipiński W. Research progress and challenges in hydrate-based carbon dioxide capture applications // *Applied Energy*. 2020. V. 269. P. 114928. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114928>
 27. Uchida T. Physical property measurements on CO₂ clathrate hydrates. Review of crystallography, hydration number, and mechanical properties // *Waste Management*. 1998. V. 17. N 5–6. P. 343–352. [https://doi.org/10.1016/s0956-053x\(97\)10047-2](https://doi.org/10.1016/s0956-053x(97)10047-2)
 28. Lee Y.-J., Han K.W., Jang J.S., Jeon T.-I., Park J., Kawamura T., Yamamoto Y., Sugahara T., Vogt T., Lee J.-W., Lee Y., Yoon J.-H. Selective CO₂ trapping in guest-free hydroquinone clathrate prepared by gas-phase synthesis // *ChemPhysChem*. 2011. V. 12. N 6. P. 1056–1059. <https://doi.org/10.1002/cphc.201001047>
 29. Arismendi-Arrieta D.J., Valdés Á., Prosmi R. A systematic protocol for benchmarking guest-host interactions by first-principles computations: capturing CO₂ in clathrate hydrates // *Chemistry — A European Journal*. 2018. V. 24. N 37. P. 9353–9363. <https://doi.org/10.1002/chem.201800497>
 30. Aldiyarov A., Aryutkina M., Drobyshev A., Kurnosov V. IR spectroscopy of ethanol in nitrogen cryomatrixes with different concentration ratios // *Low Temperature Physics*. 2011. V. 37. N 6. P. 524–531. <https://doi.org/10.1063/1.3622633>
 31. Sanz-Hervás A., Iborra E., Clement M., Sangrador J., Aguilar M. Influence of crystal properties on the absorption IR spectra of polycrystalline AlN thin films // *Diamond and Related Materials*. 2003. V. 12. N 3–7. P. 1186–1189. [https://doi.org/10.1016/s0925-9635\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/s0925-9635(02)00228-5)
 32. Karamancheva I., Stefov V., Šoptrajanov B., Danev G., Spasova E., Assa J. FTIR spectroscopy and FTIR microscopy of vacuum-evaporated polyimide thin films // *Vibrational Spectroscopy*. 1999. V. 19. N 2. P. 369–374. [https://doi.org/10.1016/s0924-2031\(99\)00011-9](https://doi.org/10.1016/s0924-2031(99)00011-9)
 33. Oancea A., Grasset O., Le Menn E., Bollengier O., Bezacier L., Le Mouélic S., Tobie G. Laboratory infrared reflection spectrum of carbon dioxide clathrate hydrates for astrophysical remote sensing applications // *Icarus*. 2012. V. 221. N 2. P. 900–910. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.09.020>
 34. Myshakin E.M., Saidi W.A., Romanov V.N., Cygan R.T., Jordan K.D. Molecular dynamics simulations of carbon dioxide intercalation in hydrated na-montmorillonite // *Journal of Physical Chemistry C*. 2013. V. 117. N 21. P. 11028–11039. <https://doi.org/10.1021/jp312589s>
 35. Valdés Á., Arismendi-Arrieta D.J., Prosmi R. Quantum dynamics of carbon dioxide encapsulated in the cages of the si clathrate hydrate: Structural guest distributions and cage occupation // *Journal of Physical Chemistry C*. 2015. V. 119. N 8. P. 3945–3956. <https://doi.org/10.1021/jp5123745>
 36. Tylinski M., Chua Y.Z., Beasley M.S., Schick C., Ediger M.D. Vapor-deposited alcohol glasses reveal a wide range of kinetic stability // *Journal of Chemical Physics*. 2016. V. 145. N 17. P. 174506. <https://doi.org/10.1063/1.4966582>
 37. Shinbayeva A., Drobyshev A., Drobyshev N. The standardization and certification procedures of cryogenic equipment in Kazakhstan // *Low Temperature Physics*. 2015. V. 41. N 7. P. 571–573. <https://doi.org/10.1063/1.4927050>
 38. Aldiyarov A., Nurmukan A., Sokolov D., Korshikov E. Investigation of vapor cryodeposited glasses and glass transition of tetrachloromethane films // *Applied Surface Science*. 2020. V. 507. P. 144857. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144857>
 39. Drobyshev A., Aldiyarov A., Nurmukan A., Sokolov D., Shinbayeva A. Structure transformations in thin films of CF₃-CFH₂ cryodeposits. Is there a glass transition and what is the value of T_g? // *Applied Surface Science*. 2018. V. 446. P. 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.270>
 40. Drobyshev A., Aldiyarov A., Sokolov D., Shinbayeva A. Refractive indices and density of cryovacuum-deposited thin films of methane in the vicinity of the α - β -transition temperature // *Low Temperature Physics*. 2017. V. 43. N 6. P. 724–727. <https://doi.org/10.1063/1.4985981>
 41. Aldiyarov A.U., Sokolov D.Y., Nurmukan A.Y., Ramos M.A. Refractive index at low temperature of tetrachloromethane and tetrafluoroethane cryovacuum condensates // *ACS Omega*. 2020. V. 5. N 20. P. 11671–11676. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00969>
 42. Sokolov D.Y., Yerezhep D., Vorobyova O., Ramos M.A., Shinbayeva A. Optical studies of thin films of cryocondensed
 - Fluid Phase Equilibria, 2006. vol. 244, no. 2, pp. 167–171. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2006.04.008>
 26. Wang X., Zhang F., Lipiński W. Research progress and challenges in hydrate-based carbon dioxide capture applications. *Applied Energy*, 2020, vol. 269, pp. 114928. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114928>
 27. Uchida T. Physical property measurements on CO₂ clathrate hydrates. Review of crystallography, hydration number, and mechanical properties. *Waste Management*, 1998, vol. 17, no. 5–6, pp. 343–352. [https://doi.org/10.1016/s0956-053x\(97\)10047-2](https://doi.org/10.1016/s0956-053x(97)10047-2)
 28. Lee Y.-J., Han K.W., Jang J.S., Jeon T.-I., Park J., Kawamura T., Yamamoto Y., Sugahara T., Vogt T., Lee J.-W., Lee Y., Yoon J.-H. Selective CO₂ trapping in guest-free hydroquinone clathrate prepared by gas-phase synthesis. *ChemPhysChem*, 2011, vol. 12, no. 6, pp. 1056–1059. <https://doi.org/10.1002/cphc.201001047>
 29. Arismendi-Arrieta D.J., Valdés Á., Prosmi R. A systematic protocol for benchmarking guest-host interactions by first-principles computations: capturing CO₂ in clathrate hydrates. *Chemistry — A European Journal*, 2018, vol. 24, no. 37, pp. 9353–9363. <https://doi.org/10.1002/chem.201800497>
 30. Aldiyarov A., Aryutkina M., Drobyshev A., Kurnosov V. IR spectroscopy of ethanol in nitrogen cryomatrixes with different concentration ratios. *Low Temperature Physics*, 2011, vol. 37, no. 6, pp. 524–531. <https://doi.org/10.1063/1.3622633>
 31. Sanz-Hervás A., Iborra E., Clement M., Sangrador J., Aguilar M. Influence of crystal properties on the absorption IR spectra of polycrystalline AlN thin films. *Diamond and Related Materials*, 2003, vol. 12, no. 3–7, pp. 1186–1189. [https://doi.org/10.1016/s0925-9635\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/s0925-9635(02)00228-5)
 32. Karamancheva I., Stefov V., Šoptrajanov B., Danev G., Spasova E., Assa J. FTIR spectroscopy and FTIR microscopy of vacuum-evaporated polyimide thin films. *Vibrational Spectroscopy*, 1999, vol. 19, no. 2, pp. 369–374. [https://doi.org/10.1016/s0924-2031\(99\)00011-9](https://doi.org/10.1016/s0924-2031(99)00011-9)
 33. Oancea A., Grasset O., Le Menn E., Bollengier O., Bezacier L., Le Mouélic S., Tobie G. Laboratory infrared reflection spectrum of carbon dioxide clathrate hydrates for astrophysical remote sensing applications. *Icarus*, 2012, vol. 221, no. 2, pp. 900–910. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.09.020>
 34. Myshakin E.M., Saidi W.A., Romanov V.N., Cygan R.T., Jordan K.D. Molecular dynamics simulations of carbon dioxide intercalation in hydrated na-montmorillonite. *Journal of Physical Chemistry C*, 2013, vol. 117, no. 21, pp. 11028–11039. <https://doi.org/10.1021/jp312589s>
 35. Valdés Á., Arismendi-Arrieta D.J., Prosmi R. Quantum dynamics of carbon dioxide encapsulated in the cages of the si clathrate hydrate: Structural guest distributions and cage occupation. *Journal of Physical Chemistry C*, 2015, vol. 119, no. 8, pp. 3945–3956. <https://doi.org/10.1021/jp5123745>
 36. Tylinski M., Chua Y.Z., Beasley M.S., Schick C., Ediger M.D. Vapor-deposited alcohol glasses reveal a wide range of kinetic stability. *Journal of Chemical Physics*, 2016, vol. 145, no. 17, pp. 174506. <https://doi.org/10.1063/1.4966582>
 37. Shinbayeva A., Drobyshev A., Drobyshev N. The standardization and certification procedures of cryogenic equipment in Kazakhstan. *Low Temperature Physics*, 2015, vol. 41, no. 7, pp. 571–573. <https://doi.org/10.1063/1.4927050>
 38. Aldiyarov A., Nurmukan A., Sokolov D., Korshikov E. Investigation of vapor cryodeposited glasses and glass transition of tetrachloromethane films. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 507, pp. 144857. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144857>
 39. Drobyshev A., Aldiyarov A., Nurmukan A., Sokolov D., Shinbayeva A. Structure transformations in thin films of CF₃-CFH₂ cryodeposits. Is there a glass transition and what is the value of T_g? *Applied Surface Science*, 2018, vol. 446, pp. 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.270>
 40. Drobyshev A., Aldiyarov A., Sokolov D., Shinbayeva A. Refractive indices and density of cryovacuum-deposited thin films of methane in the vicinity of the α - β -transition temperature. *Low Temperature Physics*, 2017, vol. 43, no. 6, pp. 724–727. <https://doi.org/10.1063/1.4985981>
 41. Aldiyarov A.U., Sokolov D.Y., Nurmukan A.Y., Ramos M.A. Refractive index at low temperature of tetrachloromethane and tetrafluoroethane cryovacuum condensates. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, no. 20, pp. 11671–11676. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00969>
 42. Sokolov D.Y., Yerezhep D., Vorobyova O., Ramos M.A., Shinbayeva A. Optical studies of thin films of cryocondensed

- mixtures of water and admixture of nitrogen and argon // *Materials (Basel)*, 2022, V. 15, N 21, P. 7441. <https://doi.org/10.3390/ma15217441>
43. Sokolov D.Y., Yerezhpe D., Vorobyova O., Golikov O., Aldiyarov A.U. Infrared analysis and effect of nitrogen and nitrous oxide on the glass transition of methanol cryofilms // *ACS Omega*, 2022, V. 7, N 50, P. 46402–46410. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05090>
 44. Golikov O.Y., Yerezhpe D., Sokolov D.Y. Improvement of the automatic temperature stabilisation process in the cryovacuum unit // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2023, Т. 23, № 1, С. 62–67. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-62-67>
 45. Tempelmeyer K.E., Mills D.W. Refractive index of carbon dioxide cryodeposit // *Journal of Applied Physics*, 1968, V. 39, N 6, P. 2968–2969. <https://doi.org/10.1063/1.1656707>
 46. Dartois E., Schmitt B. Carbon dioxide clathrate hydrate FTIR spectrum // *Astronomy & Astrophysics*, 2009, V. 504, N 3, P. 869–873. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200911812>
 47. Rothman L.S., Young L.D.G. Infrared energy levels and intensities of carbon dioxide—II // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1981, V. 25, N 6, P. 505–524. [https://doi.org/10.1016/0022-4073\(81\)90026-1](https://doi.org/10.1016/0022-4073(81)90026-1)
 48. Bernstein M., Cruikshank D., Sandford S. Near-infrared laboratory spectra of solid H₂O/CO₂ and CH₃OH/CO₂ ice mixtures // *Icarus*, 2005, V. 179, N 2, P. 527–534. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.07.009>
 49. Sandford S.A., Allamandola L.J. The physical and infrared spectral properties of CO₂ in astrophysical ice analogs // *Astrophysical Journal*, 1990, V. 355, P. 357. <https://doi.org/10.1086/168770>
 50. Bryson C.E., Cazcarra V., Levenson L.L. Sublimation rates and vapor pressures of water, carbon dioxide, nitrous oxide, and xenon // *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1974, V. 19, N 2, P. 107–110. <https://doi.org/10.1021/jc60061a021>

Авторы

Голиков Олег Юрьевич — младший научный сотрудник, докторант, Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, 050038, Республика Казахстан, [sc 57843805800](https://orcid.org/0000-0002-6691-8346), <https://orcid.org/0000-0002-6691-8346>, golikov@physics.kz

Ережеп Дархан Есейұлы — PhD, старший научный сотрудник, Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, 050038, Республика Казахстан, [sc 57194012596](https://orcid.org/0000-0002-2232-2911), <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>, darhan_13@physics.kz

Соколов Дмитрий Юрьевич — PhD, ассоциированный профессор, Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, 050038; Алматинский технологический университет, Алматы, 050012, Республика Казахстан, [sc 55318960400](https://orcid.org/0000-0001-7966-1140), <https://orcid.org/0000-0001-7966-1140>, yasnyisokol@gmail.com

Authors

Oleg Yu. Golikov — Doctoral Student, Junior Researcher, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050038, Kazakhstan, [sc 57843805800](https://orcid.org/0000-0002-6691-8346), <https://orcid.org/0000-0002-6691-8346>, golikov@physics.kz

Darkhan E. Yerezhpe — PhD, Senior Researcher, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050038, Kazakhstan, [sc 57194012596](https://orcid.org/0000-0002-2232-2911), <https://orcid.org/0000-0002-2232-2911>, darhan_13@physics.kz

Dmitry Yu. Sokolov — PhD, Associated Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, 050038, Kazakhstan; Almaty Technological University, Almaty/ 050012, Kazakhstan, [sc 55318960400](https://orcid.org/0000-0001-7966-1140), <https://orcid.org/0000-0001-7966-1140>, yasnyisokol@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26.01.2023

Одобрена после рецензирования 15.03.2023

Принята к печати 25.05.2023

Received 26.01.2023

Approved after reviewing 15.03.2023

Accepted 25.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ COMPUTER SCIENCE

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-493-499

УДК 004.9

Метод повышения информационной ценности видеоданных на основе фильтрации кадров и оценки энтропии

Артём Дмитриевич Обухов¹✉, Максим Сергеевич Николюкин²

^{1,2} Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, 392000, Российская Федерация

¹ obuhov.art@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3450-5213>

² Chlppyone@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1648-0136>

Аннотация

Введение. Применение современных систем видеонаблюдения сопряжено с решением задач мониторинга деятельности персонала и соблюдения технологического процесса на основе анализа и обработки больших объемов видеоданных. Это приводит к удорожанию хранилища информации, затратам временных ресурсов персонала на поиск ключевых событий на длительных временных отрезках. Рассмотрена задача повышения информационной ценности хранимых данных с камер видеонаблюдения на основе фильтрации кадров и оценки энтропии. **Метод.** Предложена реализация алгоритмов обработки и сжатия информации, направленных на снижение объема хранимых видеоданных. Применение данной реализации способствует повышению общей информационной ценности, эффективности работы систем видеонаблюдения за счет оптимизации объемов хранимой информации и увеличению соотношения полезной информации. Для повышения информационной ценности видеоданных предложен метод, включающий использование современных технологий сжатия видео, алгоритма фильтрации кадров и оценку обработанного видео по метрике энтропии Шеннона. **Основные результаты.** Выполнены анализ и сравнение существующих алгоритмов сжатия видеоданных. Проведен эксперимент, в результате которого доказана корреляция между высокими значениями энтропии и информационной ценностью кадра. Успешно апробирован алгоритм фильтрации кадров, позволивший повысить энтропию в 5,4 раза и сократить длительность видео в 8 раз. Использование методов сжатия видеоданных и эффективных кодеков, например, H.265/HEVC позволило уменьшить объем файла по сравнению с исходным в 14,57 раз. Рассмотрена апробация предложенного метода при решении задач фильтрации, передачи и хранения видеоданных для повышения информационной ценности видеоданных, производительности процессов анализа и поиска информации за счет снижения избыточных, малополезных фрагментов данных. **Обсуждение.** Преимущество представленного метода заключается в удалении избыточных кадров на основе анализа движения и оценки энтропии видеоданных, комбинации различных подходов по снижению объема передаваемой и хранимой информации. Применение метода позволит повысить эффективность хранения данных в различных системах видеонаблюдения (для логистических центров, складских комплексов, торговых помещений).

Ключевые слова

информационная энтропия, энтропия Шеннона, видеоданные, алгоритмы сжатия видео, хранение информации, системы видеонаблюдения

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации» (№ 122012100103-9).

Ссылка для цитирования: Обухов А.Д., Николюкин М.С. Метод повышения информационной ценности видеоданных на основе фильтрации кадров и оценки энтропии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 493–499. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-493-499

Method for increasing the information value of video data based on the removal of redundant frames and entropy estimation

Artyom D. Obukhov¹✉, Maxim S. Nikolyukin²

^{1,2} Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation

¹ obuhov.art@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3450-5213>

² chlppyone@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1648-0136>

Abstract

The use of modern video surveillance systems is associated with solving the tasks of monitoring the activities of personnel and compliance with the technological process based on the analysis and processing of large amounts of video data. This leads to an increase in the cost of information storage, the cost of staff time resources to search for key events over long time periods. The problem of increasing the information value of stored data from video surveillance cameras based on frame filtering and entropy estimation is considered. The implementation of algorithms for processing and compressing information aimed at reducing the volume of stored video data is proposed. The use of this implementation contributes to increasing the overall information value, the efficiency of video surveillance systems by optimizing the volume of stored information and increasing the ratio of useful information. To increase the informational value of video data, a method is proposed that includes the use of modern video compression technologies, a frame filtering algorithm, and an evaluation of the processed video by the Shannon entropy metric. The analysis and comparison of existing video data compression algorithms are performed. An experiment was carried out, as a result of which the correlation between high entropy values and the information value of the frame was proved, the frame filtering algorithm was successfully tested, which allowed to increase entropy by 5.4 times and reduce the duration of the video by 8 times. The use of video data compression methods and efficient codecs, for example, H.265/HEVC, reduced the file size by 14.57 times compared to the original one. The approbation of the proposed method is considered when solving problems of filtering, transmitting, and storing of video data to increase the information value of video data, the productivity of the analysis and information retrieval processes by reducing redundant, useless data fragments. The advantage of the presented method is to remove redundant frames based on motion analysis and entropy estimation of video data, a combination of various approaches to reduce the volume of transmitted and stored information. The application of the method will increase the efficiency of data storage in various video surveillance systems (for logistics centers, warehouse complexes, retail premises).

Keywords

information entropy, Shannon entropy, video data, video compression algorithms, information storage, video surveillance systems

Acknowledgements

The article was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project “Development of medical VR simulator systems for training, diagnosis and rehabilitation” (No. 122012100103-9).

For citation: Obukhov A.D., Nikolyukin M.S. Method for increasing the information value of video data based on the removal of redundant frames and entropy estimation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 493–499 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-493-499

Введение

При реализации современных систем видеонаблюдения важными задачами являются мониторинг деятельности персонала и соблюдение технологического процесса [1]. Полученные файлы с камер видеонаблюдения могут быть разделены на фрагменты с указанием меток времени и даты, однако при круглосуточной записи объемом хранимой информации неизбежно растет. Учитывая, что в определенное время суток активность персонала значительно падает, часть хранимой информации не несет высокой ценности. Необходимость анализа и обработки больших объемов данных неизбежно приводит к увеличению временных и материальных затрат.

В соответствии с теорией информации для оценки хранимых данных используется понятие информационного содержания или информации Шеннона — количественной оценки уровня «неожиданности» определенного результата, зависящей от вероятности некоторого конкретного события [2]. Информация Шеннона связана с понятием энтропия, которая представляет собой среднее количество информации о себе, которую на-

блюдатель ожидает получить о случайной величине при ее измерении. Таким образом, однородная информация, имеет малый уровень «неожиданности» и, следовательно, низкую энтропию [3]. Такой характеристикой может обладать длительное видео без существенных изменений, имеющее сходство со статистическим изображением.

С другой стороны, динамическое видео с множеством непредсказуемых событий фактически имеет больший уровень «неожиданности» и значение информационной энтропии. С точки зрения информационного содержания видеофайл, обладающий высокой энтропией, «ценнее» и «полезнее» для системы, так как содержит больше разнообразной информации.

В результате требуется решение задачи повышения информационной ценности видеоданных на основе оценки информационной энтропии хранимых видеоданных за счет разработки необходимых алгоритмов обработки информации. Решение позволит снизить объем «бесполезных» данных, не имеющих ценности ни в процессах управления или поддержки принятия решений, ни в задачах обработки и анализа данных.

Полученный результат может иметь высокую актуальность для областей, связанных с хранением и обработкой больших объемов видеоданных, к которым относятся логистические центры, складские комплексы, торговые помещения и др.

Многие системы наблюдения являются децентрализованными, особенно если организация имеет несколько объектов с централизованным управлением. В таком случае видеопоток, полученный на конкретном объекте, должен быть отправлен в центр обработки данных (ЦОД) для дальнейшего хранения, обработки, передачи и выдачи пользователям по запросу [4]. Вопрос эффективной передачи и хранения информации является актуальным, так как многие складские объекты, логистические центры и помещения могут быть удалены от ЦОД и используют услуги интернет-провайдера со слабым каналом передачи. При беспроводной передаче данных ограничения накладываются также и внешней средой (погода, посторонние сигналы и т. п.), которые могут прервать передачу данных в ЦОД.

Цель работы — разработка метода, направленного на минимизацию объема передаваемых данных и сокращения избыточной хранимой информации.

Использование методов сжатия для уменьшения размера файла

При передаче видеоданных по сети со слабым каналом или в условиях неблагоприятной внешней среды можно сократить объем информации, используя методы сжатия файлов. Данный подход позволит сократить время передачи данных по сети и нагрузку на канал. Существует множество методов и утилит, решающих данную задачу, среди наиболее распространенных отметим следующие: bzip2, LZMA2, Deflate, адаптивное арифметическое кодирование и др. [5].

Метод сжатия bzip2 основан на алгоритме Барроуза–Уилера. После получения потока данных метод сначала делит несжатые данные на блоки фиксированного размера, применяя к ним преобразование Барроуза–Уилера для превращения последовательностей многократно чередующихся символов в строки одинаковых символов. Затем применяется преобразование Move-To-Front и кодирование Хаффмана [6].

Цепной алгоритм Lempel–Ziv–Markov (LZMA) использует улучшенный алгоритм сжатия А. Лемпеля и Я. Зива 1977 года (LZ77), дополненный алгоритмом интервального кодирования, а также специальными процедурами для обработки двоичных файлов. Вторая версия алгоритма (LZMA2) получила ряд улучшений: поддержка многопоточности и хранение одновременно сжатых и несжатых данных для экономии бит [7].

Deflate — алгоритм сжатия без потерь и использует комбинацию алгоритмов LZ77 и Хаффмана. LZ77 заменяет повторные вхождения данных на ссылки, а кодирование Хаффмана — метод кодирования с переменной длиной, которая назначает более короткие коды к более часто повторяющимся символам [8].

Контекстно-адаптивное двоичное арифметическое кодирование (Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding, CABAC) применяется в кодеке H.265/HEVC

для сжатия видеоданных [9]. Кодирование основано на технике сжатия без потерь для получения более высокой степени сжатия, чем большинство алгоритмов, которые доступны в кодировании видеоданных. При его применении сначала конвертируются все небинарные символы в бинарные, затем для каждого бита выбирается модель предсказания. Далее используется полученная от ближайших элементов информация для оптимизации степени возможности предсказаний. Арифметическое кодирование является финальным шагом сжатия данных.

В ходе сравнительного анализа эффективности кодирования основного профиля H.265 с кодеками H.264/MPEG-4, MPEG-4 ASP, H.263 HLP и H.262/MPEG-2 получено снижение битрейта на 35,4 %, 63,7 %, 65,1 % и 70,8 % соответственно при равных показателях пикового отношения сигнал-шум и субъективно одинаковом качестве [10]. Таким образом, для хранения больших объемов видеоданных в случае круглосуточного наблюдения использование методов bzip2, LZMA2, Deflate не является предпочтительным. Предложено применение кода H.265/HEVC, основанного на кодировании CABAC, как более нового и эффективного метода сжатия видеоданных в качестве одного из инструментов повышения их информационной ценности.

Метод повышения информационной ценности видеоданных

Используя алгоритмы сжатия, можно добиться сокращения размера файла, но в большинстве случаев объем данных остается достаточно большим, особенно при хранении видеоархивов с камер наблюдения. В связи с этим, кроме использования различных технологий сжатия видео, в рамках предложенного метода повышения информационной ценности видеоданных необходимо реализовать алгоритм фильтрации избыточных кадров. Суть работы алгоритма заключается в извлечении из исходного видео кадров, на которых происходит какое-либо движение в большом объеме (для исключения реакции на шумы).

Рассмотрим шаги алгоритма фильтрации кадров предложенного метода.

Шаг 1. Из видеопотока захватывается i -й и $i + 1$ кадры. Осуществим вычитание одного кадра из другого, что позволит определить смещение объектов при условии неподвижности камеры.

Шаг 2. Разницу кадров переведем в серую градацию и для минимизации отслеживания шумов и лишних контуров применим размытие по Гауссу.

Шаг 3. Выполним фильтрацию кадра с помощью порогового значения. Если значение пиксела меньше порогового значения, оно устанавливается равным 0, в противном случае — равно максимальному значению (255). Это позволяет более четко сегментировать объекты.

Шаг 4. К кадру применим морфологический фильтр — операцию расширения, которая добавит некоторое количество пикселей к границам объектов на изображении, что позволит удалить небольшие разрывы и сгладить их.

Шаг 5. Проведем поиск массива контурных точек и их анализ. Если среди контуров обнаружен такой объект, площадь которого выше порогового значения, то его зафиксируем как объект наблюдения. Кадр отметим меткой «Движение» и сохраним в отдельный файл.

В результате выполнения шагов 1–5, после обработки видеоданных на выходе формируется отдельный видеофайл, состоящий из кадров, имеющих признаки движения объектов. Алгоритм может быть модифицирован для сохранения значительно удаленных по времени фрагментов с движением в разные файлы, что облегчит по ним навигацию.

Завершающий шаг предложенного метода — оценка информационной ценности кадра. В качестве метрики используем энтропию Шеннона, которую рассчитаем по следующей формуле для каждого кадра [11]:

$$E = - \sum_{k=0}^{255} (p_k \log(p_k)),$$

где p_k — вероятность пикселей со значением k .

Тогда в процессе обработки видео после выполнения шага 4 осуществим расчет энтропии для кадра и сохраним его. Для дальнейшего статистического анализа поставим в соответствие каждому кадру значения 0 или 1 (отсутствие или наличие метки «Движение») и суммарный размер области контуров на текущем кадре. Для расчета энтропии исходные кадры видео не использованы, чтобы не оценивать гистограммы распределения оттенков серого. В результате на сложном кадре с множеством объектов (именно таким и будет кадр с камеры наблюдения на складе) энтропия примет сравнительно одинаковые и высокие значения. Это не

позволит использовать энтропию, как некоторую объективную метрику, соответствующую «ценности» кадра, так как статичный кадр в рамках многочасового видео имеет низкую полезность.

Выполним тестирование предложенного метода. Проведем эксперимент на тестовом файле с камеры видеонаблюдения складского комплекса (кодировщик H.264/MPEG-4, разрешение 1920×1080 пикселей, битрейт 321 Кбит/с, 12 кадров/с) размером 223 МБ и длительностью 01:08:42. Пример работы алгоритма фильтрации на тестовом видео представлен на рис. 1. Рассмотрим промежуточные результаты обработки последовательности из четырех кадров, что позволит оценить, как предложенный подход для каждой пары соседних кадров преобразует исходные данные, применяет фильтры, выделяет контуры и в итоге рассчитывает энтропию. Анализ значений энтропии для исходного часового видео представлен на рис. 2. Заметны четко выраженные участки возрастания энтропии, соответствующие моментам движения на видео.

Построим корреляционную матрицу для проверки гипотезы о зависимости значения энтропии от наличия движения объектов в кадре. Проведем анализ взаимного влияния трех параметров: энтропии, наличия движения и размера области контуров (рис. 3). Наблюдается высокая корреляция между энтропией и размером области контуров, а также фактом перемещения объектов.

В итоге анализа видно, что метрика энтропии Шеннона при обработке кадров на шаге 4 предложенного метода может использоваться для оценки информационной ценности видео (которая прямо пропорциональна количеству движущихся объектов в кадре). Сравним полученные результаты (таблица).

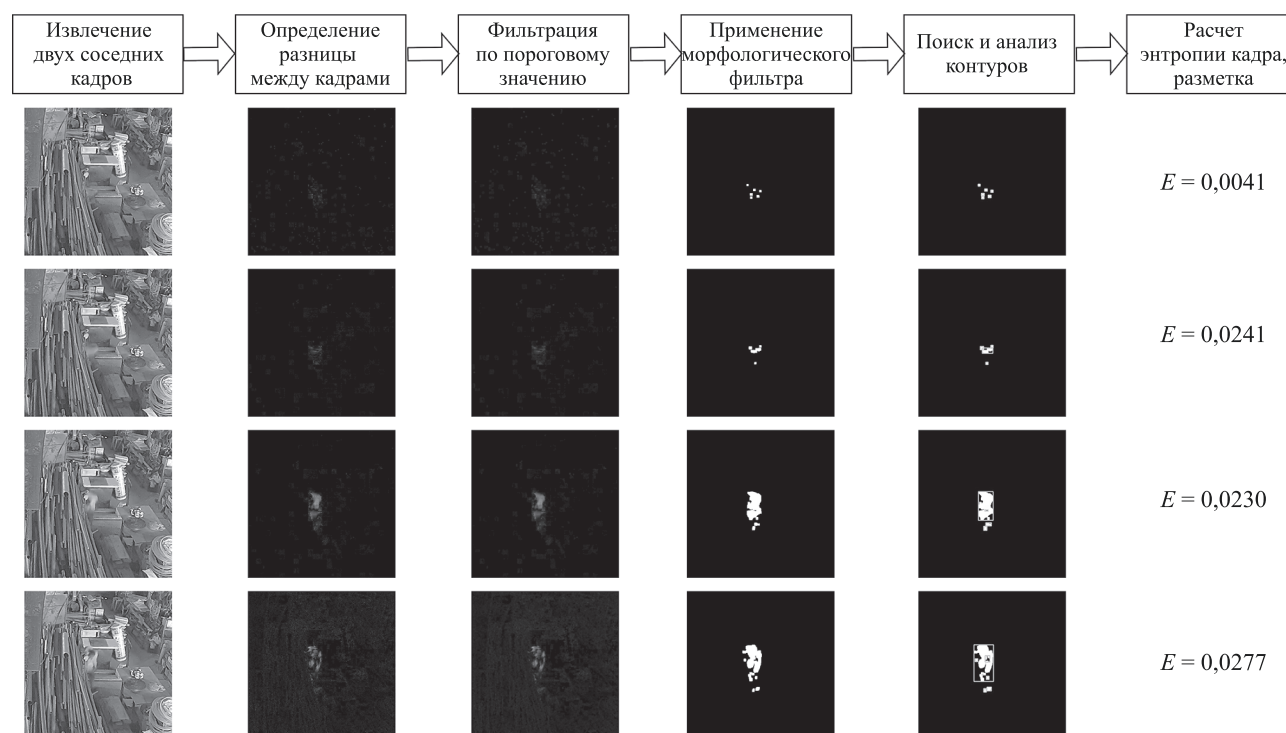


Рис. 1. Применение алгоритма фильтрации кадров и оценки энтропии

Fig. 1. Application of the frame filtering algorithm and entropy estimation

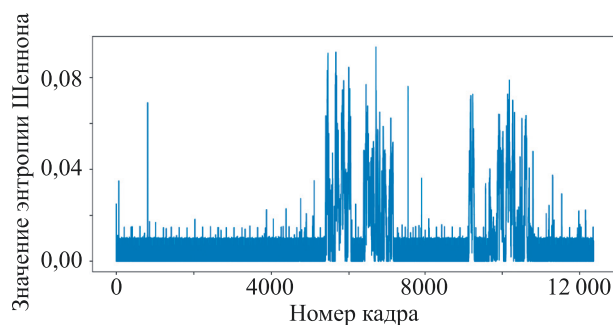


Рис. 2. Изменение значений энтропии на исходном видео

Fig. 2. Changing entropy values on the source video

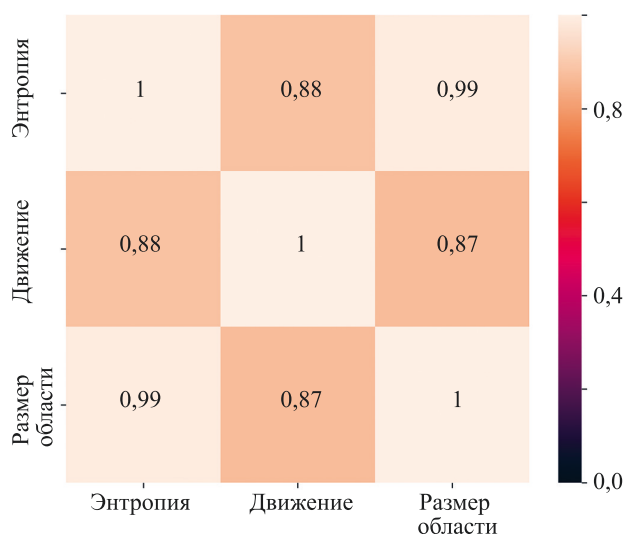


Рис. 3. Корреляционная матрица признаков

Fig. 3. Correlation matrix of features

Удаление избыточных кадров позволило значительно сократить объем хранимой информации. Применение кодера H.265/HEVC, основанного на САВАС, даже на исходном видео позволило умень-

Таблица. Сравнение исходного и фильтрованного видео

Table. Comparison of the source and filtered video

	Исходное видео	Фильтрованное видео
Количество кадров	12 364	1512
Средняя энтропия	0,00743	0,03997
Суммарная энтропия	91,925	60,443
Размер файла, МБ	223	15,3
Битрейт, Кбит/с	321	4404
Кодек	H.264/MPEG-4	H.265/HEVC

шить его размер до 86 МБ (при том же разрешении и битрейте 3,5 Мбит/с). Кодирование фильтрованного видео привело к итоговому размеру — 15,3 МБ.

В итоге, при сокращении длительности видео в 8 раз суммарная энтропия снизилась только в 1,5 раза. Средняя энтропия при этом возросла в 5,4 раза, откуда следует, что информационная ценность отфильтрованного видео возросла в 5,4 раза. Общий объем файла относительно исходного сокращен в 14,57 раз.

Практическое применение полученных результатов при организации хранения видеоданных

Рассмотрим интеграцию предложенного метода в ЦОД для решения задач фильтрации исходных видеоданных (рис. 4). Решением задачи будет обеспечение минимизации объема информации, повышение ее информационной ценности для систем видеонаблюдения в таких предметных областях, как складские комплексы, логистические центры, торговые помещения.

Осуществим получение исходного видеофайла и удаление из него избыточных кадров для повышения энтропии с использованием предложенного метода. После выполнения оценки энтропии осуществим кодировку файла с помощью кодера H.265/HEVC, обе-

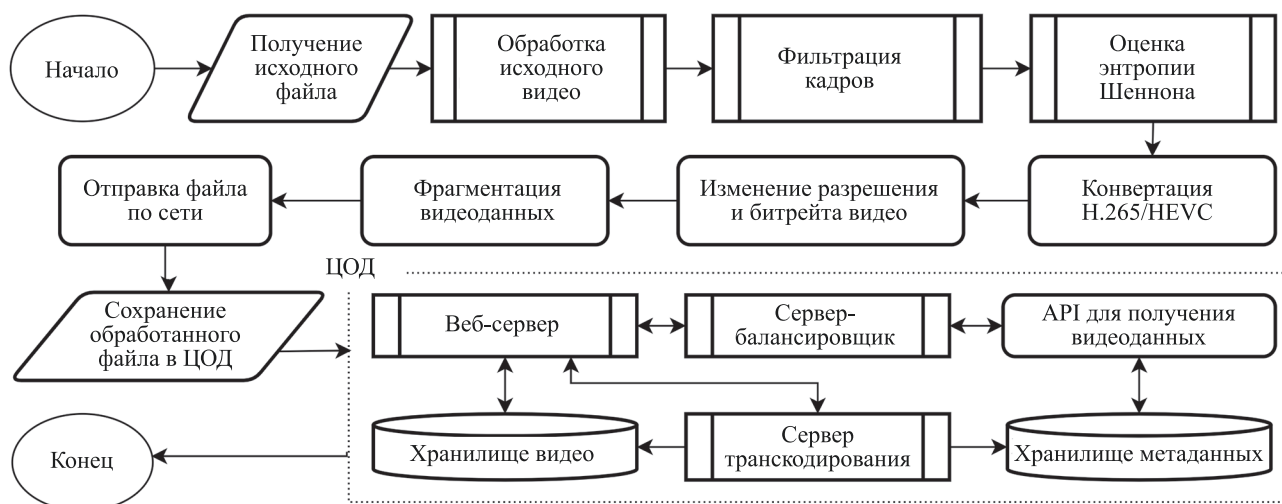


Рис. 4. Блок-схема алгоритма интеграции предложенного метода в центр обработки данных (ЦОД)

Fig. 4. Block diagram of the algorithm for integrating the proposed method into the data center

спечивающего наилучшие показатели по итоговому его размеру. Разрешение кадра и битрейт определим экспериментально в зависимости от поставленных целей: хранение, интеллектуальная обработка или применение алгоритмов распознавания объектов [12]. При необходимости исходное видео может быть фрагментировано на отдельные файлы в случае, если участки повышенной энтропии разделены значительными временными интервалами. Сжатый и обработанный видеофайлы (или несколько отдельных видео с указанием временных меток) передадим по сети в ЦОД.

Рассмотрим процедуры взаимодействия с ЦОД. Для получения данных клиент обращается к веб-серверу. В качестве клиента может выступать система управления складом или любая информационная система для обработки данных с камер видеонаблюдения. Для взаимодействия применим интерфейс программирования приложений (API), а для равномерного распределения запросов между API — сервер-балансировщик [13]. Сервер транскодирования используем для перекодирования или кодирования видео, которое преобразует исходное видео в требуемые форматы и разрешения для решения конкретных задач обработки данных или принятия решений [14]. Хранилище видео предназначено для хранения BLOB (Binary Large Object)-данных транскодированных видео. Хранилище метаданных используем для хранения всех метаданных видео, например, временных меток, размера, разрешения, формата и т. д. [15] и представляет собой табличную структуру, которая может быть реализована с использованием реляционной системой управления базой данных (СУБД), например PostgreSQL.

Литература

1. Синегубова С.В., Савельева Д.Г. Задачи, возникающие при разработке проекта системы видеонаблюдения для частного объекта охраны // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Т. 1. 2020. С. 46–49.
2. Медведев Д.С. Гносеологические аспекты информации // Социально-гуманитарные знания. 2019. № 10. С. 47–50.
3. Егорова С.Ю., Смолина С.Г. Некоторые подходы к определению информационной энтропии // Что есть жизнь?: сборник статей университетской научной конференции студентов и преподавателей. 2021. С. 25–32.
4. Бородко А.В. Классификация центров обработки данных // Информационные технологии и телекоммуникации. 2019. Т. 7. № 1. С. 1–9. <https://doi.org/10.31854/2307-1303-2019-7-1-1-9>
5. Кожемякина А.А., Буторина Н.Б. Система сжатия информации с выбором оптимального алгоритма // Материалы VII Международной молодежной научной конференции «Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем». 2019. С. 202–210.
6. Qiao W., Fang Z., Chang M.-C.F., Cong J. An FPGA-based BWT accelerator for Bzip2 data compression // Proc. of the 2019 IEEE 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM). 2019. P. 96–99. <https://doi.org/10.1109/fccm.2019.00023>
7. Görne L., Reuss H.-C., Sauerwald R. Enhancing ground truth for digital twins by complete and real-time upload of vehicle signals // 22. Internationales Stuttgarter Symposium. Proceedings. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022. P. 322–333. https://doi.org/10.1007/978-3-658-37009-1_23

Заключение

Рассмотрен вопрос оптимизации хранилища видеоданных с камер наблюдения для повышения информационной ценности. Круглосуточная запись приводит к значительным временным потерям при поиске нужных фрагментов видео, а также удорожает их хранение. С учетом, что информационная ценность таких длительных видео может быть незначительной, а интерес для пользователей, работающих с ними, могут представлять только отдельные фрагменты, задача оценки и фильтрации исходных видеофайлов является актуальной.

Предложено использование различных подходов для сжатия видеоданных, а также метод фильтрации кадров, включающий оценку информационной энтропии. В ходе экспериментальных исследований определен оптимальный вариант видеокодека, подтверждена гипотеза о зависимости между наличием движения в кадре (и, следовательно, высокой информационной ценности) и энтропией Шеннона, рассчитанной для обработанной разницы между соседними кадрами. Проведенные испытания показали возможность повышения энтропии после фильтрации избыточных (статичных) кадров до 5,4 раза и снижение объема хранимой информации до 8 раз. Применение алгоритмов сжатия позволило снизить размер итогового файла в 14,57 раз.

Рассмотренные подходы были апробированы для решения задач фильтрации, передачи и хранения видеоданных, повышения информационной ценности видеоданных, производительности процессов анализа и поиска информации за счет снижения избыточных, мало полезных фрагментов данных.

References

1. Sinegubova S.V., Saveleva D.G. Tasks that arise when developing a video surveillance system project for a private protected site. *Actual problems of the penal system units: collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. V. 1, 2020, pp. 46–49. (in Russian)
2. Medvedev D.S. Gnoseological aspects of information. *Social and humanitarian knowledge*, 2019, no. 10, pp. 47–50. (in Russian)
3. Egorova S.Yu., Smolina S.G. Some approaches to determining the entropy level. *What is Life?: Collection of articles from the University Scientific Conference of Students and Teachers*, 2021, pp. 25–32. (in Russian)
4. Borodko A. Classification of data centers. *Telecom IT*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 1–9. (in Russian). <https://doi.org/10.31854/2307-1303-2019-7-1-1-9>
5. Kozhemiakina A.A., Butorina N.B. Information compression system with the choice of the optimal algorithm. *Proc. of the VII International Youth Scientific Conference “Mathematical and software support for information, engineering and economic systems”*, 2019, pp. 202–210. (in Russian)
6. Qiao W., Fang Z., Chang M.-C.F., Cong J. An FPGA-based BWT accelerator for Bzip2 data compression. *Proc. of the 2019 IEEE 27th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)*, 2019, pp. 96–99. <https://doi.org/10.1109/fccm.2019.00023>
7. Görne L., Reuss H.-C., Sauerwald R. Enhancing ground truth for digital twins by complete and real-time upload of vehicle signals. 22. *Internationales Stuttgarter Symposium. Proceedings*. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2022, pp. 322–333. https://doi.org/10.1007/978-3-658-37009-1_23

8. Tayyeh H.K., Al-Jumaili A.S.A. A combination of least significant bit and deflate compression for image steganography // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2022. V. 12. N 1. P. 358–364. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp358-364>
9. Chen Z., Pan X. An optimized rate control for low-delay H.265/HEVC // *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019. V. 28. N 9. P. 4541–4552. <https://doi.org/10.1109/tip.2019.2911180>
10. Ohm J.R., Sullivan G.J., Schwarz H., Tan T.K., Wiegand T. Comparison of the coding efficiency of video coding standards—including high efficiency video coding (HEVC) // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012. V. 22. N 12. P. 1669–1684. <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2012.2221192>
11. Тимошенко А.В., Кошкарров А.С. Сравнительный анализ энтропийных метрик информативности оптических изображений космических объектов // *Труды МАИ*. 2020. № 112. С. 10. <https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-10>
12. Ibrahim S.K., Khamiss N.N. A new video transcoding for future wireless communication system // *Proc. of the 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, 2019. P. 544–548. <https://doi.org/10.1109/iceei47359.2019.8988900>
13. Hao Q., Qin L. The design of intelligent transportation video processing system in big data environment // *IEEE Access*, 2020. V. 8. P. 13769–13780. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2964314>
14. Бекболатова Ж.Б. Вопросы организации хранения и перемещения массивов видеоданных // *Kazakhstan Science Journal*, 2019. T. 2. № 8(9). С. 5–14.
15. Nikbakht R., Kahvazadeh S., Mangues-Bafalluy J. Video on demand streaming using RL-based edge caching in 5G networks // *Proc. of the 2022 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 2022. P. 208. <https://doi.org/10.1109/CSCN57023.2022.10051020>
8. Tayyeh H.K., Al-Jumaili A.S.A. A combination of least significant bit and deflate compression for image steganography. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 358–364. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i1.pp358-364>
9. Chen Z., Pan X. An optimized rate control for low-delay H.265/HEVC. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, vol. 28, no. 9, pp. 4541–4552. <https://doi.org/10.1109/tip.2019.2911180>
10. Ohm J.R., Sullivan G.J., Schwarz H., Tan T.K., Wiegand T. Comparison of the coding efficiency of video coding standards—including high efficiency video coding (HEVC). *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, vol. 22, no. 12, pp. 1669–1684. <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2012.2221192>
11. Timoshenko A., Koshkarov A. Comparative analysis of entropic metrics of space objects optical images informativity. *Trudy MAI*, 2020, no. 112, pp. 10. (in Russian). <https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-10>
12. Ibrahim S.K., Khamiss N.N. A new video transcoding for future wireless communication system. *Proc. of the 2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, 2019, pp. 544–548. <https://doi.org/10.1109/iceei47359.2019.8988900>
13. Hao Q., Qin L. The design of intelligent transportation video processing system in big data environment. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 13769–13780. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2964314>
14. Bekbolatova Z.B. Questions of the organization of the storage and transfer of arrays of video data. *Kazakhstan Science Journal*, 2019, vol. 2, no. 8(9), pp. 5–14. (in Russian)
15. Nikbakht R., Kahvazadeh S., Mangues-Bafalluy J. Video on demand streaming using RL-based edge caching in 5G networks. *Proc. of the 2022 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 2022, pp. 208. <https://doi.org/10.1109/CSCN57023.2022.10051020>

Авторы

Обухов Артём Дмитриевич — доктор технических наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, 392000, Российская Федерация, [sc 56104232400](https://orcid.org/0000-0002-3450-5213), <https://orcid.org/0000-0002-3450-5213>, obuhov.art@gmail.com

Николюкин Максим Сергеевич — аспирант, Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, 392000, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1648-0136>, Ch1ppyone@mail.ru

Authors

Artyom D. Obukhov — D.Sc., Associate Professor, Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation, [sc 56104232400](https://orcid.org/0000-0002-3450-5213), <https://orcid.org/0000-0002-3450-5213>, obuhov.art@gmail.com

Maxim S. Nikolyukin — PhD Student, Tambov State Technical University, Tambov, 392000, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1648-0136>, ch1ppyone@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2023
Одобрена после рецензирования 05.03.2023
Принята к печати 16.05.2023

Received 17.01.2023
Approved after reviewing 05.03.2023
Accepted 16.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-500-505

УДК 004.056

Метод выявления групп атакующих на основании анализа полезной нагрузки сетевого трафика по протоколу HTTP

Артем Валерьевич Павлов¹✉, Наталия Викторовна Волошина²

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ artempavlov1@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-8567-5469>

² nataliv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9435-9580>

Аннотация

Введение. Атаки на веб-приложения являются частым направлением атаки на информационные ресурсы злоумышленниками различного уровня подготовки. Подобные атаки возможно исследовать с помощью анализа HTTP-запросов, произведенных атакующими. В работе исследована возможность выявления групп атакующих по данным событий систем обнаружения вторжений. Выявление групп атакующих позволяет улучшить работу аналитиков безопасности, расследующих и реагирующих на инциденты, снизить влияние событийной усталости при анализе событий безопасности, а также поможет выявить шаблоны и ресурсы атак злоумышленников, что повысит качество защиты системы в целом. **Метод.** Выявление групп атакующих в рамках предложенного метода выполнено на основании последовательности этапов. Проведено разбиение запросов на токены по регулярному выражению, основанному на особенностях протокола HTTP и атак, которые часто встречаются и выявляются системами обнаружения вторжений. Выполнено взвешивание токенов алгоритмом TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency), что позволяет выделить редкие токены. На следующем этапе произведено отделение основного ядра запросов, не содержащих в себе редкие слова, совпадение по которым позволяет говорить о связанности событий. Таким образом происходит отделение использования публичных, доступных открыто от разработанных или модифицированных атакующими, инструментов атаки. Для определения расстояния применено манхэттенское расстояние. На последнем этапе проведена кластеризация методом DBSCAN (Density-based Spatial Clustering of Applications with Noise). **Основные результаты.** Показано, что данные полезной нагрузки HTTP-запросов могут использоваться для выявления групп атакующих. Предложен эффективный метод токенизации, взвешивания и кластеризации рассматриваемых данных и использование метода DBSCAN для кластеризации в рамках метода. Проведена оценка метрик: однородности, полноты и V-меры кластеризации, получаемых различными методами на наборе данных CPTC-2018. Выявлено, что предлагаемый метод позволяет получить кластеризацию событий, обладающую высокой однородностью и достаточной полнотой. Представлено комбинирование кластеризации с кластерами, образованными другими методами, с большой однородностью кластеризации для получения высокого показателя полноты и V-меры при сохранении большой однородности. **Обсуждение.** Предложенный метод может найти применение в работе аналитиков безопасности в SOC (Security Operations Center), CERT (Computer Emergency Response Team) и CSIRT (Cybersecurity Incident Response Team) как при противодействии вторжениям, так и в сборе данных о техниках и тактиках атакующих, включая атаки уровня APT (Advanced Persistent Threat). Метод позволит выявлять шаблоны следов инструментов, используемых атакующими, что даст возможность проводить атрибуцию атак.

Ключевые слова

группы атакующих, сложные атаки, обнаружение вторжений, корреляция событий безопасности, кибербезопасность

Ссылка для цитирования: Павлов А.В., Волошина Н.В. Метод выявления групп атакующих на основании анализа полезной нагрузки сетевого трафика по протоколу HTTP // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 500–505. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-500-505

Attacker group detection method based on HTTP payload analysis

Artem V. Pavlov¹✉, Natalia V. Voloshina²

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ artempavlov1@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-8567-5469>

² nataliv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9435-9580>

Abstract

Attacks on web applications are a frequent vector of attack on information resources by attackers of various skill levels. Such attacks can be investigated through analysis of HTTP requests made by the attackers. The possibility of identifying groups of attackers based on the analysis of the payload of HTTP requests marked by IDS as attack events has been studied. The identification of groups of attackers improves the work of security analysts investigating and responding to incidents, reduces the impact of alert fatigue in the analysis of security events, and also helps in identifying attack patterns and resources of intruders. Identification of groups of attackers within the framework of the proposed method is performed based on the sequence of stages. At the first stage, requests are split into tokens by a regular expression based on the features of the HTTP protocol and attacks that are often encountered and detected by intrusion detection systems. Then the tokens are weighted using the TF-IDF method, which allows to further give a greater contribution when comparing requests to the coincidence of rare words. At the next stage the main core of requests is separated based on their distance from the origin. Thus, requests not containing rare words, the coincidence of which allows us to talk about the connectedness of events, are separated. Manhattan distance is used to determine the distance. Finally, clustering is carried out using the DBSCAN method. It is shown that HTTP request payload data can be used to identify groups of attackers. An efficient method of tokenization, weighting and clustering of the considered data is proposed. The use of the DBSCAN method for clustering within the framework of the method is proposed. The homogeneity, completeness and V-measure of clustering obtained by various methods on the CPTC-2018 dataset were evaluated. The proposed method allows obtaining a clustering of events with high homogeneity and sufficient completeness. It is proposed to combine the resulting clustering with clusters obtained by other methods with high clustering homogeneity to obtain a high completeness metric and V-measure while maintaining high homogeneity. The proposed method can be used in the work of security analysts in SOC, CERT and CSIRT, both in defending against intrusions including APT and in collecting data on attackers' techniques and tactics. The method makes it possible to identify patterns of traces of tools used by attackers, which allows attribution of attacks.

Keywords

attacker groups, complex attacks, intrusion detection, alert correlation

For citation: Pavlov A.V., Voloshina N.V. Attacker group detection method based on HTTP payload analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 500–505 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-500-505

Введение

Анализ HTTP-запросов играет важную роль в обнаружении вторжений. Направления атак, которые можно в них обнаружить, включает SQL-инъекции, SSRF, XXE, инъекции команд и др. Многие из атак могут привести к удаленному выполнению кода на сервере, где размещено приложение, превращая его в плацдарм для дальнейшего продвижения злоумышленников. Согласно отчету Ростелеком-Солар¹, в 2021 году атаки на веб-приложения использовались для взлома инфраструктуры в 20 % атак группировок среднего уровня и в 50 % — высокого уровня.

Данные HTTP-запросов можно использовать не только для обнаружения вторжений, но и для последующего их анализа, в частности выделения групп атакующих. Понятие группы атакующих несколько шире сложных атак или APT (Advanced Persistent Threat), поскольку включает различные вредоносные кампании, проводимые одной группой. Таким образом, понятие группы атакующих охватывает атаки, проводимые одним злоумышленником, на одну цель (сложная атака), схожие цели (вредоносная кампания) и различные цели.

Выделение групп атакующих может улучшить работу SOC (Security Operations Center), CERT (Computer Emergency Response Team) и CSIRT (Cybersecurity Incident Response Team) благодаря преобразованию одномерного массива событий в двумерный массив действий групп. Это позволяет снизить влияние явления усталости от сигналов тревоги (alert fatigue) [1] при работе аналитиков. Выделение групп дает возможность точнее оценить уровень угрозы и глубину компрометации системы для принятия соответствующих мер реагирования. Также выделение групп и шаблонов их действий помогает при проведении форензиологических исследований, атрибуции атак, превентивном выявлении ресурсов, используемых атакующими.

Современные методы выделения групп атакующих включают подходы, основанные на атрибутах событий или на шагах, предпринимаемых атакующими при продвижении внутри системы [2]. Первая категория включает методы, основанные на свойствах событий, временных метках, статистических взаимосвязях и фильтрации, вторая — основанные на модели предпосылок-последствий и сценариях атак. Некоторые методы используют комбинированный подход с применением методов обеих категорий. Выделяемое сходство может быть основано на использовании схожего инструментария, совпадении целей и статуса атак, а также на основании обмена информацией внутри групп

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rt-solar.ru/upload/iblock/01e/Otchet-ob-instrumentarii-professionalnykh-gruppirovok_2021-god.pdf (дата обращения: 31.03.2023).

пы атакующих. Детальный обзор методов корреляции событий безопасности при решении схожих задачах представлен в работах [3–5].

Среди методов работы с данными в кибербезопасности и обнаружении вторжений отметим взвешивание токенов с использованием алгоритма TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency). Например, в работе [6] использована комбинация алгоритмов BPE (Byte Pair Encoding) и TF-IDF для обнаружения вторжений по данным HTTP-запросов. На наборе данных CSIC-2010¹ точность их метода с классификатором Isolation Forest достигла 89,48 %, а F-мера — 90,17 %. В [7] предложена система BotTokenizer, содержащая алгоритм TF-IDF. На основании URL (Uniform Resource Locator) запросов [7] с высокой точностью были определены в трафике известные семейства ботнетов. Среди других работ в области кибербезопасности и обнаружения вторжений с использованием TF-IDF можно выделить [8], в которой рассмотрена комбинация алгоритмов TF-IDF и SVM (Support Vector Machine) для обнаружения вторжений. Отметим, что проведенный анализ научных работ по теме показал, что подход TF-IDF не был изучен для решения задачи выделения групп атакующих или схожих задач.

В результате выполненного исследования предложен метод разбиения HTTP-запросов на токены и их взвешивания на основе алгоритма TF-IDF с последующей кластеризацией для выявления групп атакующих. Проведено исследование эффективности метода с применением различных методов кластеризации на наборе данных соревнований по тестированию на проникновение CPTC-2018. Представленный подход показал высокий уровень однородности получаемой кластеризации и достаточную полноту. Полученные результаты показали практическую значимость подхода и зарекомендовали его для использования в комплексных методах по выявлению групп атакующих.

Метод

Атакующие, использующие один и тот же инструмент, часто оставляют схожие следы в системе. Поскольку HTTP относится к текстовым протоколам, данные запросов, помеченных как попытка вторжения, могут использоваться для определения сходства инструментария, применяемого в рамках исследуемых атак. Также многие типы атак на веб-приложения требуют нескольких запросов для достижения цели атаки, что позволяет выявить атаку группы [9].

Известно, что многие группы атакующих используют инструменты, находящиеся в открытом доступе. Таким образом, следы данных инструментов будут схожи, однако это сходство не будет говорить о том, что атакующие представляли одну группу. Для решения задачи разделения случаев использования одного и того же непубличного и открытого инструментов подходит алгоритм TF-IDF [10]. TF-IDF работает по следующему принципу: после разбиения текста на токены, для

каждого токена (слова) вычислим отдельно показатели TF и IDF:

$$TF(t, d) = \frac{n_t}{\sum_{i=1}^k n_i}, \quad (1)$$

где n_t — количество слов t в коллекции; k — общее количество уникальных слов; $\sum_{i=1}^k n_i$ — общее количество слов в документе; d — исследуемый документ.

$$IDF(t, D) = \ln \frac{n_c}{\sum_{j=1}^m n_j}, \quad (2)$$

где n_c — количество коллекций; $\sum_{j=1}^m n_j$ — количество коллекций, содержащих требуемое слово t ; D — массив коллекций.

Рассчитаем общий показатель TF-IDF на основании выражений (1) и (2):

$$TF - IDF(t, d, D) = TF(t, d)IDF(t, D).$$

Таким образом, часто встречающиеся следы открытых инструментов будут иметь меньший вес при оценке сходства запросов, поскольку подобные артефакты будут встречаться чаще. На основании этого возможно реализовать метод, выполняющий выявление групп атакующих по содержимому запросов, помеченных системами обнаружения вторжений, как события атаки.

Предлагаемый метод разделим на три этапа.

Подготовка данных и токенизация. Для применения метода используем поле с нагрузкой (payload) HTTP-запроса событий безопасности. Приведем данные к текстовому виду: выполним, если необходимо, раскодирование из Base64, а также операцию URL-декодирования. Далее проведем токенизацию данных запросов по следующему регулярному выражению:

`[^\\s\\\"\\.\\+\\&\\?=<>\\[\\]:\\(\\)\\-\\\"\\',]+`

Данный набор символов позволяет разделить слова внутри самого запроса с использованием синтаксиса HTTP значимые составляющие внутри нагрузки таких видов атак, как SQL-инъекция или эксплуатация XSS.

После токенизации оценим слова методом TF-IDF и отбросим слова, частота в документах которых больше порогового значения. В настоящей работе выбрано значение пороговой частоты 0,7. Произведенный отбор не оказал значительного влияния на результаты последующих этапов, но позволил существенно сократить время, требуемое для вычислений. Оптимальное значение порога выберем при реализации метода в рамках конкретного окружения для сокращения времени выявления.

Отбор запросов. Для оценки расстояния между запросами применим манхэттенское расстояние. Данный выбор связан с тем, что матрица TF-IDF является разреженной и имеет большую размерность с точки зрения количества свойств. Это приводит к неэффективности использования евклидова расстояния из-за «проклятия» размерности [11].

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tic.itefi.csic.es/dataset/> (дата обращения: 20.05.2023).

Отметим, что применение методов кластеризации к получившемуся набору даст в результате низкие показатели однородности и полноты кластеризации. Это связано с тем, что многие запросы не содержат в себе редкие слова. Таким образом, существует группа запросов, близких к началу координат по совокупности весов входящих в них слов, и близость этих запросов в геометрическом смысле не отражает соответствие одной и той же группе атакующих, а говорит лишь об отсутствии в запросе редких, аномальных слов. Более того, применение кластеризации ко всем запросам может быть сильно ограничено с точки зрения выбора методов кластеризации, поскольку матрица расстояний, используемая во многих методах, является ресурсоемкой, и размер потребляемых ресурсов растет квадратично от количества элементов.

Для отбора запросов, существенно отстоящих от центра координат, выполним оценку плотности распределения суммы расстояний слов в запросах от начала координат, определим границу, на которой происходит существенное падение плотности, и выберем запросы, находящиеся справа от этой границы, для которых верно выражение

$$dist_{Manh}(x_i, 0) > \tau,$$

где $dist_{Manh}$ — манхэттенское расстояние; τ — значение координаты границы; x_i — оцениваемый элемент выборки.

Кластеризация. К отобранному данным используем различные методы кластеризации. Для определения расстояния между объектами применим манхэттенское расстояние.

Экспериментальное исследование показателей оценки метода

Для подтверждения работоспособности метода выполним эксперимент с применением различных методов кластеризации данных.

Выберем набор данных СРТС-2018 [12]. Набор был собран в рамках соревнований по тестированию на проникновение, когда перед различными командами была поставлена задача получить максимальные привилегии в сети, моделирующей реальную компанию. Такой подход имеет ряд преимуществ по сравнению с другими. Так, при сборе данных из реального трафика пришлось бы вести очень длительное наблюдение, убирать конфиденциальные данные из трафика и проводить долгую и сложную разметку данных. При искусственном моделировании атак их разнообразие было бы существенно ограничено. Более того, в современных наборах данных, построенных на этом принципе, практически отсутствуют сложные атаки. В данном случае, благодаря природе сбора данных, не требуется длительное наблюдение и удаление конфиденциальных данных. Большая инфраструктура и различия в подходах команд-участниц позволили получить различные атаки, реализованные разными инструментами. Использование копий инфраструктуры для команд дало возможность провести точную разметку данных

относительно принадлежности к командам, представляющим различные группы атакующих.

В наборе представлены данные о срабатывании системы обнаружения вторжений, статистические данные по трафику, метрики, собранные с конечных устройств и другие данные. Согласно на публикацию своих атак дали 7 команд, участвовавших в соревнованиях. Для проверки предлагаемого в данной работе метода использованы данные системы обнаружения вторжений Suricata¹. В наборе представлено более 330 тыс. срабатываний, относящихся к 225 видам и 14 категориям атак.

При обработке набора данных дополнительно произведем следующие действия: данные команд объединим в единый набор с добавлением метки команды; удалим следующие события: с IP-адресом назначения 169.254.169.254, который используется для управления инфраструктурой организаторов; из категории «Not Suspicious Traffic»; не относящиеся к протоколу HTTP.

В результате обработки осталось 89 тыс. событий безопасности. Переведем нагрузку из кодировки Base64 в текст, затем применим URL-декодирование. Для последующего исследования возьмем колонки с метками команд и HTTP-нагрузку.

После токенизации и применения TF-IDF осуществим оценку плотности распределения расстояний запросов от начала координат. Для дальнейшей работы отберем запросы вида:

$$dist_{Manh}(x_i, 0) > 5,3.$$

Полученный график плотности показан на рисунке.

Сдвиг границы вправо приводит к уменьшению числа рассматриваемых запросов, тогда как сдвиг влево ведет к уменьшению показателей оценки, получаемой в итоге кластеризации. В выборку со значением границы 5,3 попало 17 тыс. запросов.

К полученным данным применим различные методы кластеризации. Для оценки эффективности методов используем метрики: однородность, полнота и V-мера [13].

Определим однородность (h) (гомогенность), которая определяет, насколько элементы в кластерах схожи друг с другом:

$$h = 1 - \frac{H(C|K)}{H(C)},$$

где C и K — эталонная и полученная кластеризации;

$H(C)$ — энтропия; $H(C|K) = -\sum_{c,k} \frac{n_{ck}}{N} \log\left(\frac{n_{ck}}{n_k}\right)$; $H(C) = -\sum_c \frac{m_c}{N} \log\left(\frac{m_c}{N}\right)$, $H(C|K)$ — условная энтропия, N — общее количество объектов в выборке; n_k — количество объектов в кластере k ; m_c — количество объектов с меткой c ; n_{ck} — количество объектов с меткой c в кластере k .

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://suricata.io/> (дата обращения: 31.03.2023).

Таблица. Оценка различных методов кластеризации

Table. Clustering methods evaluation

Метод	Гиперпараметры	Метрики, %		
		Однородность	Полнота	V-мера
Спектральная кластеризация [14]	$N = 8$	0,7	0,45	0,55
DBSCAN (Density-based Spatial Clustering of Applications with Noise) [15]	$eps=1$, $min_samples=1$	0,98	0,04	0,08

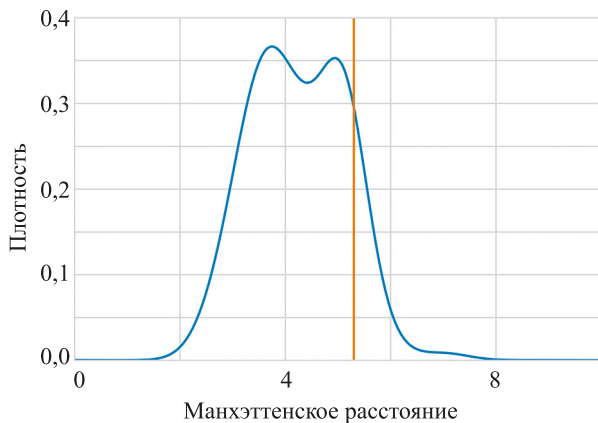


Рисунок. График плотности распределения манхэттенского расстояния запросов от начала координат с указанием границы отсечки

Figure. Density plot of the Manhattan distance of requests from the origin indicating the cutoff boundary

Таким образом, значение однородности показывает степень изменения энтропии за счет известной принадлежности объектов к выделенным алгоритмом кластерам. Лучший результат отражает значение $h = 1$, тогда каждый кластер содержит только элементы одного класса.

Рассчитаем полноту по следующей формуле:

$$c = 1 - \frac{H(C|K)}{H(K)}.$$

Полнота отражает значение доли событий с определенным меткой, которая попадает в один кластер. Лучший результат получим в том случае, если все значения с одной меткой находятся в одном кластере.

Поскольку однородность и полнота, как и точность и полнота при классификации, могут принимать значение 1 в том случае, если число кластеров равно числу событий (тогда максимальна однородность) или если число кластеров равно 1 (тогда максимальна полнота), для оценки сбалансированности этих параметров используем гармоническую V-меру, которая имеет вид

$$V = 2 \frac{h \times c}{h + c}.$$

В таблице приведены лучшие методы с точки зрения однородности получаемой кластеризации и V-меры. Выбор гиперпараметров осуществим для исследуемого

набора данных. При указанных в таблице значениях предложенный в данной работе метод показал свою эффективность. Задачу оптимизации значений гиперпараметров решим отдельно при решении практических задач.

Несмотря на то, что отсутствуют общепринятые границы показателей, при которых оцениваемые методы эффективны, исходя из особенностей решаемой задачи можно сделать предположение о том, что наибольшую практическую применимость будут иметь подходы, обладающие высокой однородностью. Это связано с тем, что наличие в полученных кластерах большого количества неверно отмеченных событий приведет к неверной оценке возможностей и глубины проникновения атакующих и, соответственно, недостаточности или избыточности предпринимаемых мер. Более того, результаты кластеризации множества методов с высокой однородностью можно объединить в комплексном методе без существенной потери однородности. Таким образом, кластеризация при помощи DBSCAN — наиболее подходящий метод кластеризации при анализе данных полезной нагрузки HTTP-запросов предложенным методом среди всех рассмотренных.

Заключение

Предложен метод выявления групп атакующих на основании токенизации данных нагрузки HTTP и применения алгоритма TF-IDF. Показано, что высокая эффективность работы метода достигается при использовании DBSCAN в качестве метода кластеризации. Улучшить результат кластеризации возможно, объединив полученные кластеры с кластерами других методов с высоким показателем однородности.

Предложенный метод может быть применен при выделении групп атакующих при анализе других текстовых протоколов, таких как FTP или LDAP. Отметим, что значение регулярного выражения, применяемого для токенизации, требует уточнения с учетом особенностей конкретного рассматриваемого протокола. Количество и разнообразие атак, проводимых через подобные протоколы, существенно меньше, чем для HTTP. Метод также применим для анализа HTTPS-трафика, при условии настройки передачи трафика в IDS через обратный прокси или файрвол.

В рамках дальнейших исследований возможна разработка комплексного метода выявления групп атакующих, включающего предложенный, а также проверка предложенного метода на данных реальных атак.

Литература

1. Hassan W., Guo S., Li D., Chen Z., Jee K., Li Z., Bates A. NoDoze: Combatting threat alert fatigue with automated provenance triage // *Proc. of the 2019 Network and Distributed System Security Symposium*. 2019. <https://doi.org/10.14722/ndss.2019.23349>
2. Pavlov A., Voloshina N. Analysis of IDS alert correlation techniques for attacker group recognition in distributed systems // *Lecture Notes in Computer Science*. 2020. V. 12525. P. 32–42. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65726-0_4
3. Kotenko I., Gaifulina D., Zelichenok I. Systematic literature review of security event correlation methods // *IEEE Access*. 2022. V. 10. P. 43387–43420. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3168976>
4. Mirheidari S.A., Arshad S., Jalili R. Alert correlation algorithms: A survey and taxonomy // *Lecture Notes in Computer Science*. 2013. V. 8300. P. 183–197. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03584-0_14
5. Navarro J., Deruyver A., Parrend P. A systematic survey on multi-step attack detection // *Computers & Security*. 2018. V. 76. P. 214–249. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.03.001>
6. Zhan J., Liao X., Bao Y., Gan L., Tan Z., Zhang M., He R., Lu J. An effective feature representation of web log data by leveraging byte pair encoding and TF-IDF // *Proc. of the ACM Turing Celebration Conference — China (ACM TURC '19)*. 2019. P. 62. <https://doi.org/10.1145/3321408.3321568>
7. Qi B., Shi Z., Wang Y., Wang J., Wang Q., Jiang J. BotTokenizer: Exploring network tokens of HTTP-based botnet using malicious network traces // *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. V. 10726. P. 383–403. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75160-3_23
8. Chen R.-C., Chen S.-P. Intrusion detection using a hybrid support vector machine based on entropy and TF-IDF // *International Journal of Innovative Computing, Information & Control (IJICIC)*. 2008. V. 4. N 2. P. 413–424.
9. Павлов А.В. Анализ сетевого взаимодействия современных эксплойтов // *Информационные технологии*. 2022. Т. 28. № 2. С. 75–80. <https://doi.org/10.17587/it.28.75-80>
10. Salton G., Buckley C. Term-weighting approaches in automatic text retrieval // *Information Processing & Management*. 1988. V. 24. N 5. P. 513–523. [https://doi.org/10.1016/0306-4573\(88\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0306-4573(88)90021-0)
11. Aggarwal C., Hinneburg A., Keim D. On the surprising behavior of distance metrics in high dimensional space // *Lecture Notes in Computer Science*. 2001. V. 1973. P. 420–434. https://doi.org/10.1007/3-540-44503-x_27
12. Muniah N., Pelletier J., Su S.-H., Yang S.J., Meneely A. A cybersecurity dataset derived from the national collegiate penetration testing competition // *Proc. of the HICSS Symposium on Cybersecurity Big Data Analytics*. 2019.
13. Rosenberg A., Hirschberg J. V-Measure: A conditional entropy-based external cluster evaluation measure // *Proc. of the 2007 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning (EMNLP-CoNLL)*. 2007. P. 410–420.
14. Shi J., Malik J. Normalized cuts and image segmentation // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. V. 22. N 8. P. 888–905. <https://doi.org/10.1109/34.868688>
15. Ester M., Kriegl H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise // *Proc. of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*. 1996. P. 226–231.

Авторы

Павлов Артем Валерьевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8567-5469>, artempavlov1@gmail.com

Волошина Наталья Викторовна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9435-9580>, nataliv@yandex.ru

References

1. Hassan W., Guo S., Li D., Chen Z., Jee K., Li Z., Bates A. NoDoze: Combatting threat alert fatigue with automated provenance triage. *Proc. of the 2019 Network and Distributed System Security Symposium*, 2019. <https://doi.org/10.14722/ndss.2019.23349>
2. Pavlov A., Voloshina N. Analysis of IDS alert correlation techniques for attacker group recognition in distributed systems. *Lecture Notes in Computer Science*, 2020, vol. 12525, pp. 32–42. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65726-0_4
3. Kotenko I., Gaifulina D., Zelichenok I. Systematic literature review of security event correlation methods. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 43387–43420. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3168976>
4. Mirheidari S.A., Arshad S., Jalili R. Alert correlation algorithms: A survey and taxonomy. *Lecture Notes in Computer Science*, 2013, vol. 8300, pp. 183–197. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03584-0_14
5. Navarro J., Deruyver A., Parrend P. A systematic survey on multi-step attack detection. *Computers & Security*, 2018, vol. 76, pp. 214–249. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.03.001>
6. Zhan J., Liao X., Bao Y., Gan L., Tan Z., Zhang M., He R., Lu J. An effective feature representation of web log data by leveraging byte pair encoding and TF-IDF. *Proc. of the ACM Turing Celebration Conference — China (ACM TURC '19)*, 2019, pp. 62. <https://doi.org/10.1145/3321408.3321568>
7. Qi B., Shi Z., Wang Y., Wang J., Wang Q., Jiang J. BotTokenizer: Exploring network tokens of HTTP-based botnet using malicious network traces. *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 10726, pp. 383–403. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75160-3_23
8. Chen R.-C., Chen S.-P. Intrusion detection using a hybrid support vector machine based on entropy and TF-IDF. *International Journal of Innovative Computing, Information & Control (IJICIC)*, 2008, vol. 4, no. 2, pp. 413–424.
9. Pavlov A.V. Analysis of network interaction of modern exploits. *Information Technologies*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 75–80. (in Russian). <https://doi.org/10.17587/it.28.75-80>
10. Salton G., Buckley C. Term-weighting approaches in automatic text retrieval. *Information Processing & Management*, 1988, vol. 24, no. 5, pp. 513–523. [https://doi.org/10.1016/0306-4573\(88\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0306-4573(88)90021-0)
11. Aggarwal C., Hinneburg A., Keim D. On the surprising behavior of distance metrics in high dimensional space. *Lecture Notes in Computer Science*, 2001, vol. 1973, pp. 420–434. https://doi.org/10.1007/3-540-44503-x_27
12. Muniah N., Pelletier J., Su S.-H., Yang S.J., Meneely A. A cybersecurity dataset derived from the national collegiate penetration testing competition. *Proc. of the HICSS Symposium on Cybersecurity Big Data Analytics*, 2019.
13. Rosenberg A., Hirschberg J. V-Measure: A conditional entropy-based external cluster evaluation measure. *Proc. of the 2007 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning (EMNLP-CoNLL)*, 2007, pp. 410–420.
14. Shi J., Malik J. Normalized cuts and image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, vol. 22, no. 8, pp. 888–905. <https://doi.org/10.1109/34.868688>
15. Ester M., Kriegl H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proc. of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*, 1996, pp. 226–231.

Authors

Artem V. Pavlov — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8567-5469>, artempavlov1@gmail.com

Natalia V. Voloshina — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9435-9580>, nataliv@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27.02.2023
Одобрена после рецензирования 31.03.2023
Принята к печати 25.05.2023

Received 27.02.2023
Approved after reviewing 31.03.2023
Accepted 25.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-506-518

УДК 004.032.26

Детекция ключевых точек лица с помощью капсульных нейронных сетей

Антон Александрович Бойцев¹✉, Дмитрий Геннадьевич Волчек²,
Егор Николаевич Магазенков³, Максим Кириллович Неваев⁴, Алексей Андреевич Романов⁵

^{1,2,3,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁴ ЗАО «Центр финансовых технологий», Санкт-Петербург, 191002, Российская Федерация

¹ boitsevanton@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3374-8256>

² dvolchek@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0310-1654>

³ egormaga04@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7563-0846>

⁴ m.nevaev@alumni.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9000-7841>

⁵ romanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6991-464X>

Аннотация

Введение. Исследована актуальная и востребованная задача детекции ключевых точек лица. Рассмотрены существующие подходы к решению задачи детекции ключевых точек лица, часто классифицируемые на параметрические и непараметрические. Определен наиболее качественный на сегодняшний день подход, основанный на методах глубокого обучения. Предложено два решения: капсульная сеть с динамической маршрутизацией и глубокая капсульная сеть. В качестве данных для проведения эксперимента выбраны 10 000 сгенерированных лиц из базы сайта Kaggle, размеченных с помощью фреймворка MediaPipe. **Метод.** Предложен метод использования капсульных архитектур нейронных сетей для решения задачи детекции ключевых точек лица. Метод включает в себя использование сегментации по распознанным с помощью фреймворка MediaPipe ключевым точкам лица. Для построения сетки лица применена триангуляция Делоне. Предложена архитектура глубокой капсульной сети с учетом семантической сегментации. **Основные результаты.** На основе размеченных данных выполнены эксперименты по детекции ключевых точек с помощью разработанных капсульных нейронных сетей. По результатам тестирования получены значения функции потерь 2,5–2,9 и точности 0,87–0,9. **Обсуждение.** Предложенная архитектура может быть использована в технологиях по сопоставлению геометрий сеток лица реального человека и трехмерной модели. Архитектура может найти применение в исследованиях капсульных нейронных сетей в области обработки и анализа изображений.

Ключевые слова

капсульные нейронные сети, детекция ключевых точек лица, распознавание изображений лиц, нейросети

Ссылка для цитирования: Бойцев А.А., Волчек Д.Г., Магазенков Е.Н., Неваев М.К., Романов А.А. Детекция ключевых точек лица с помощью капсульных нейронных сетей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 506–518. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-506-518

Facial keypoints detection using capsule neural networks

Anton A. Boitsev¹✉, Dmitry G. Volchek², Egor N. Magazhenkov³, Maxim K. Nevaev⁴,
Aleksei A. Romanov⁵

^{1,2,3,5} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

⁴ ZAO “Center of Financial Technologies”, Saint Petersburg, 191002, Russian Federation

¹ boitsevanton@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3374-8256>

² dvolchek@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0310-1654>

³ egormaga04@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7563-0846>

⁴ m.nevaev@alumni.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9000-7841>

⁵ romanov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6991-464X>

© Бойцев А.А., Волчек Д.Г., Магазенков Е.Н., Неваев М.К., Романов А.А., 2023

Abstract

The problem of detecting key points of the face is investigated. This problem is quite relevant and important. The existing approaches of solving this problem, which are usually divided into parametric and nonparametric methods, are considered. As a result of the study, it was concluded that, nowadays, the most qualitative results are demonstrated by approaches based on deep learning methods. Two solutions are proposed: a capsule network with dynamic routing and a deep capsule network. The data for the experiments are 10,000 generated faces taken from Kaggle, marked up using MediaPipe. A method of using capsule architectures in neural networks to solve the problem of detecting key points of the face is proposed. The method includes the use of segmentation based on the key points of the face recognized using MediaPipe. Delaunay triangulation was used to build the face mesh. The architecture of a deep capsule network considering semantic segmentation was proposed. Based on the marked-up data, experiments on the detection of key points using the developed capsule neural networks were performed. According to the test results, the loss function reached values in range 2.50–2.90, the accuracy reached values in range 0.87–0.9. The proposed architecture can be used in technologies for comparing the geometry of the face grid of a real person with the geometry of the face grid of a three-dimensional model as well as in further studies of capsule neural networks by researchers in the field of image processing and analysis.

Keywords

capsule neural networks, detection of key points of the face, face image recognition, neural networks

For citation: Boitsev A.A., Volchek D.G., Magazenkov E.N., Nevaev M.K., Romanov A.A. Facial keypoints detection using capsule neural networks. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 506–518 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-506-518

Введение

Задача детекции ключевых точек лица — одна из задач компьютерного зрения. Детекция ключевых точек лица находит множество применений, начиная от создания анимационных фильмов и заканчивая сложными системами биометрии и компьютерной безопасности. Существуют различные хорошо изученные подходы к решению задачи детекции ключевых точек лица, однако, появление новых архитектур нейронных сетей дает серьезный качественный скачок в этой области как с точки зрения скорости, так и точности. Тем самым рассматриваемая задача остается актуальной и по сей день. Отметим, что искусственные нейронные сети на сегодняшний день де-факто стали популярным аппаратом для решения разного рода задач. Исследователи находят все больше областей применения и развития нейронных сетей [1–3]. Каждый год разрабатывают новые архитектуры нейронных сетей, усовершенствуют алгоритмы оптимизации, за счет которых и происходит «обучение», и многое другое. Не секрет, что одна из самых востребованных областей применения нейронных сетей в настоящее время — область компьютерного зрения. Это связано с широким развитием и внедрением технологий компьютерного зрения в медицине, робототехнике, видеонаблюдении, компьютерной графике, создании автономных автомобилей.

При решении задач компьютерного зрения активно применяются сверточные нейронные сети. Особо отметим следующие яркие отраслевые представители последних: AlexNet, ResNet, YOLO, и др. [4–6]. Несмотря на активное развитие отраслевых решений, сохраняется проблема решения задач, в которых встречаются следующие особенности в данных: повороты одних и тех же объектов, разная степень освещенности, изменение взаимного расположения в пространстве отдельных частей объектов. В работе [7] предложена архитектура капсульных нейронных сетей, способная расширить область задач, поддающихся решению с привлечением аппарата искусственных нейронных сетей. Положительные результаты достигнуты с помо-

щью использования слоев, в которых применены так называемые «капсулы», которые, кроме привычных активационных карт, используют дополнительную структуру (информацию) для учета взаимосвязей отдельных частей объекта друг с другом. Еще одно преимущество капсульной архитектуры — требуется меньший объем обучающей выборки в силу большего объема извлекаемых из данных информации.

Постановка задачи

Капсульные нейронные сети обладают значительным потенциалом по работе с двумерными изображениями и извлечению из них трехмерных признаков [8]. Появляющиеся возможности вызывают огромный интерес в исследованиях областей применения данной архитектуры, особенно применительно к области компьютерной графики. В настоящее время компьютерная графика затрагивает такие аспекты нашей жизни как: фильмы, игры, компьютерное моделирование реальных физических систем; тренажеры для водителей, пилотов и военных; трехмерное моделирование органов человека для детекции аномалий; моделирование протезов; наглядные обучающие материалы, и многое другое. Несмотря на серьезное развитие вычислительных устройств и программного обеспечения по работе с трехмерным моделированием, сам процесс часто может требовать использования дорогих технических решений и высококвалифицированных специалистов. Перечисленные аспекты еще раз мотивируют интерес изучения применимости архитектуры капсульных нейронных сетей к трехмерному моделированию, а также к анализу выгод и проблем.

Основная причина выполнения настоящей работы — факт, что большинство современных решений распознавания ключевых точек лица используются в коммерческих проектах. В связи с этим исследователи в своих работах не предоставляют подробную архитектуру своего решения и размеченные данные, на которых проводились исследования. Цель работы — разработка решения, сопоставимого по качеству с аналогами, но

полностью открытого и прозрачного для других исследователей.

Достижения в области детекции ключевых точек лиц

Определение ключевых точек лица является актуальной и востребованной задачей на протяжении последних десятилетий. Процесс детекции ключевых точек лица (Facial Feature Point Detection, FFPD) обычно рассматривается как задача обучения с учителем, для решения которой используются наборы данных, размеченные вручную. Существует широкий спектр методов, позволяющих выявлять ключевые точки на изображениях человеческих лиц. В работе [9] разделены существующие подходы на две глобальные категории: параметрические (в которых данные подчинены известным вероятностным распределениям с настраиваемыми параметрами) и непараметрические (которые непосредственно строят зависимости) (рис. 1).

FFPD-методы по критерию категоризации «модель формы» (Categorization criterion: Shape model) делятся на:

- методы на основе параметрической модели формы (Parametric Shape Model-based Methods);
- методы на основе непараметрических моделей формы (Non-parametric Shape Model-based Methods).

Методы на основе параметрической модели формы по критерию категоризации «модель внешности» (Categorization criterion: Appearance model) делятся на:

- локальные методы на основе частей (Local Part-based Methods);
- холистические методы (Holistic Methods).

Методы на основе непараметрической модели формы по критерию категоризации «связь между формой и внешним видом» (Categorization criterion: Connection between Shape and Appearance) делятся на:

- образцовые методы (Exemplar-based Methods);
- методы на основе графических моделей (Graphical Model-based Methods);
- методы каскадной регрессии (Cascaded Regression-based Methods);

— методы, основанные на глубоком обучении (Deep Learning-based Methods).

Параметрические модели основаны на двух предположениях: части лица людей (глаза, нос, губы, и т. д.) представляют собой локальные области, в рамках границ которых находятся ключевые точки конкретного лица (Local Part-based Methods); целое лицо рассматривается, как отдельный признак, игнорируя отдельные черты, такие как глаза, рот, нос и т. д. (Holistic Methods). На рис. 2 показаны ключевые точки для 600 изображений лиц (черные крестики); красными точками выделены средние значения для соответствующих ключевых точек. Видно, что ключевые точки действительно образуют некоторые области-кластеры, привычные для описания русским языком: глаза, брови, контуры лица, и др.

Примером холистического метода служит преобразование пикселей изображения лица в векторы признаков (рис. 3) или использование метода главных компонент для разложения изображения на «собственные лица» (eigenfaces) (рис. 4) для последующего их анализа [10].

Непараметрические методы основаны только лишь на данных, не предполагают построение статистических моделей и представлены широким набором различных подходов. Образцовые методы используют каждое изображение в качестве отдельного признака, при этом образцовые изображения содержат полные (все, встречающиеся при тесте) признаки.

Например, в работе [11] описанный подход использован для решения задачи детекции лица. Процесс обнаружения детектором лиц на основе образцов состоит в следующем: каждый образец обрабатывает тестовое изображение для получения карты достоверности (рис. 5, а); карты достоверности, полученные на уровне образцов, суммируются для построения окончательной карты достоверности (рис. 5, б). Далее становится возможным найти лица, ссылаясь на пики на окончательной карте достоверности (рис. 5, в).

Методы FFPD, работающие на базе графической модели, основаны на древовидной структуре и на марковских случайных полях. В методах на основе древовидной структуры каждая точка черты лица рассматривается как узел, а совокупность точек — как

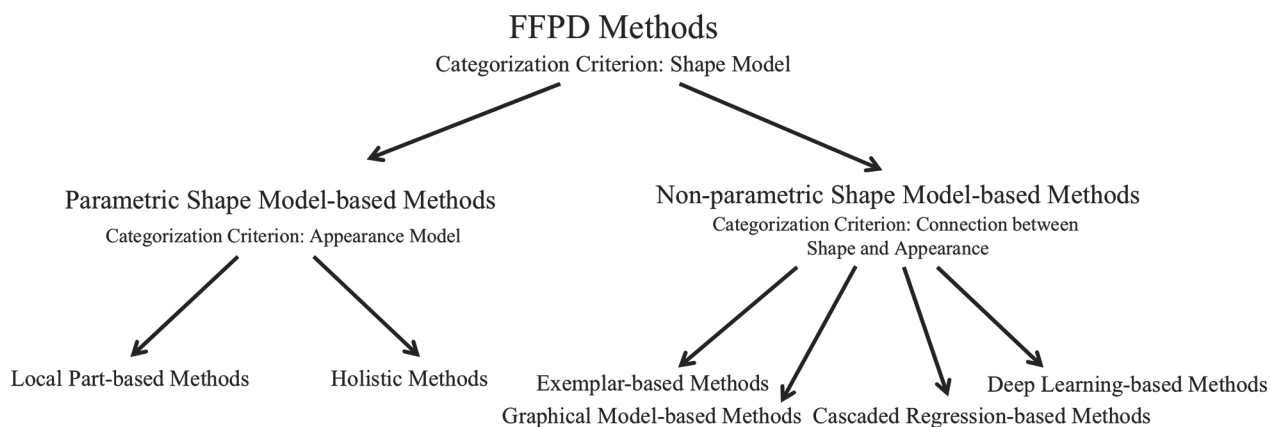


Рис. 1. Классификация методов FFPD [9]

Fig. 1. Classification of FFPD methods [9]

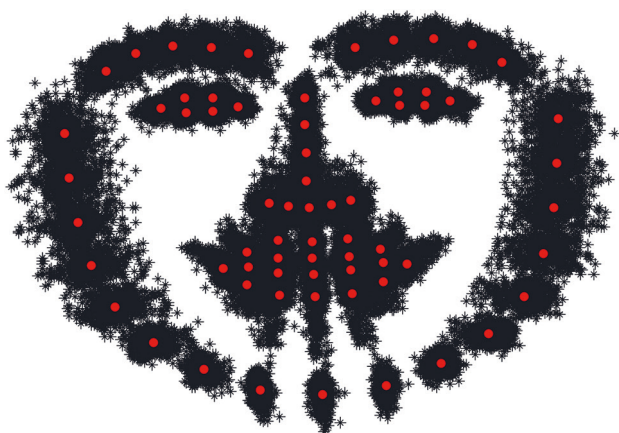


Рис. 2. Распределение ключевых точек для 600 изображений [9]
Fig. 2. Key points distribution for 600 images [9]

дерево. Расположение характерных точек лица можно оптимально определить с помощью динамического программирования. Наиболее популярный метод основан на каскадной регрессии. Этот метод подразумевает обучение серии регрессоров каскадным образом. При этом каждый из регрессоров уточняет значения предыдущих до получения истинных значений (рис. 6).

Развитие непараметрических методов во многом произошло благодаря применению методов на основе глубокого обучения. В работе [12] впервые рассмотрена комбинация сверточного подхода и принципа каскада регрессоров. Дальнейшее развитие, как, например, в работе [13], позволило кроме ключевых точек распознать и какие-то дополнительные детали. В [14] разработаны оптимизационные алгоритмы, предназначенные для решения задач компьютерного зрения, впоследствии усовершенствованные при помощи рекуррентных ней-

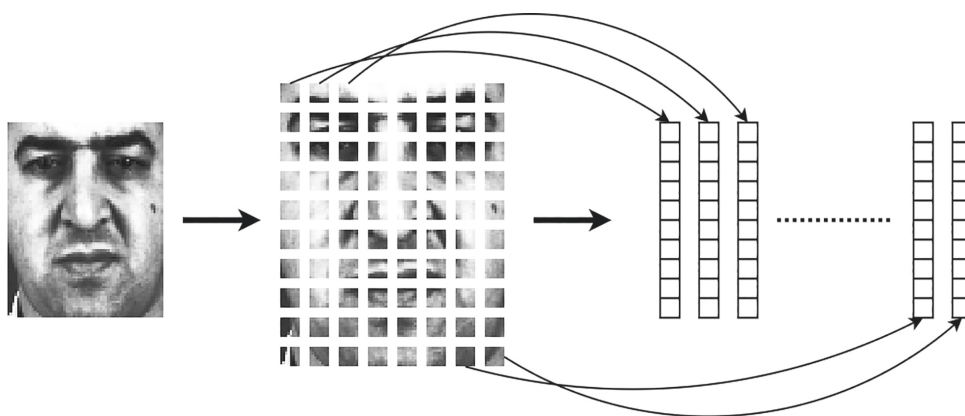


Рис. 3. Лицо представлено небольшим количеством признаков [10]
Fig. 3. Face is represented by a sufficiently small number of features [10]

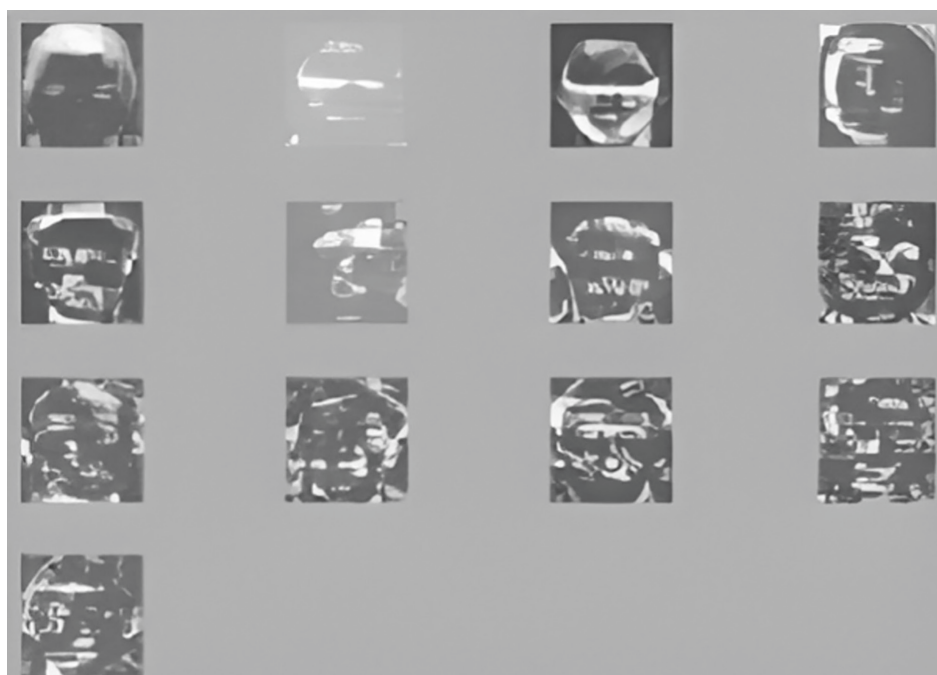


Рис. 4. Собственные лица [10]
Fig. 4. The eigenfaces [10]

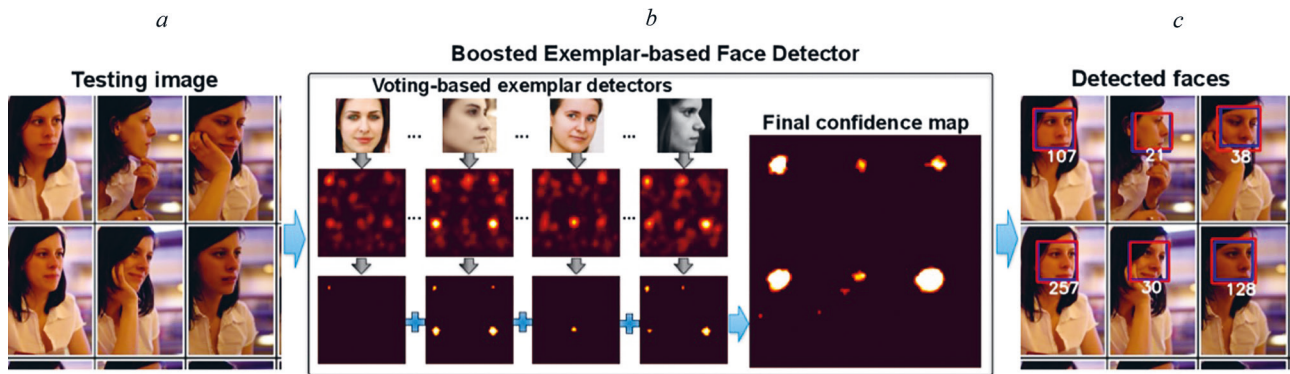


Рис. 5. Процесс обнаружения детектором лиц на основе образцов: тестовые изображения (a); карты достоверности на уровне образцов (b); поиск лиц по окончательной карте достоверности (c)

Fig. 5. The face-detection process: testing image (a); exemplar-level confidence maps (b); detection of faces based on the final confidence map (c)

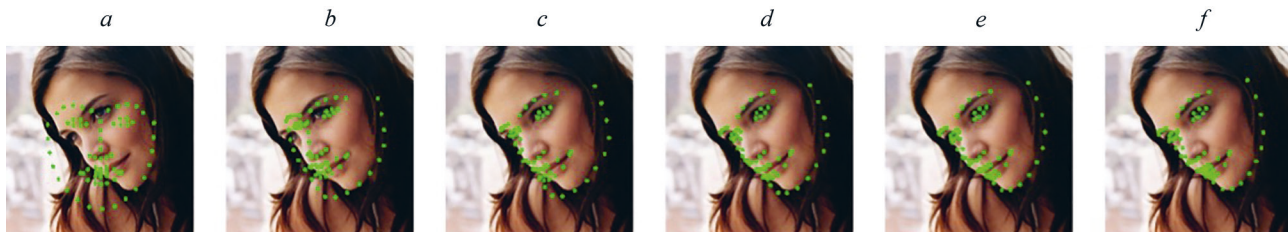


Рис. 6. Результат прогнозирования для набора данных 300W с использованием технологии обработки изображений cGPRT.

Оценка контура лица инициализируется и итеративно обновляется через каскад деревьев регрессии: начальная оценка контура (a), оценки контура на разных этапах cGPRT (b–f)

Fig. 6. The result for 300W dataset using cGPRT technology. The face contour is initialized and updated using the regression trees cascade: initialization (a), contour correction using cGPRT (b–f)

ронных сетей. В работах [15, 16] описаны предсказания позы и ключевых точек лица в 3D и использовано сопоставление трехмерных морфируемых моделей с двумерным изображением лица. В работе [12] сопоставляются плотные морфируемые модели с помощью каскада сверточных сетей. В [13] итеративно сопоставляется морфируемая модель одной сверточной сетью, расширенной с помощью дополнительных каналов, с формами признаков на каждой итерации. Самое быстрое современное решение обработки изображений предложено в работе [17] от инженеров корпорации Google. Решение позволило на мобильном графическом процессоре обнаруживать 468 трехмерных точек

лица со скоростью до 1000 кадров/с (рис. 7). Самые впечатляющие на данный момент результаты представлены в работе [18] от авторов из компании Microsoft. Предложенное решение способно с производительностью более 150 кадров/с на одном ядре CPU предсказывать плотную сетку лица из более 700 трехмерных точек с последующей трехмерной реконструкцией (рис. 8).

Мотивация введения капсульных архитектур

Так как сверточные архитектуры имеют недостатки, то для их устранения разработаны капсульные архитектуры. Рассмотрим основные недостатки.

1. **Угасание признаков при использовании субдискретизации.** Несмотря на то, что Max Pooling и Average Pooling слои призваны уменьшать объем вычислений и увеличивать скорость обучения сети, они же приводят к потере информации при осуществлении прямого прохода. Например, на рис. 9 на вход подается карта признака, после этого к ней применяются алгоритмы Max Pooling и Average Pooling. Видно, что после обработки изображений алгоритмы приводят к угасанию сигнала. С учетом того, что первые слои сверточных сетей состоят из подобных кривых, происходит серьезная потеря информации из данных.
2. **Неспособность к извлечению информации о пространственных отношениях между объектами.**



Рис. 7. Примеры предсказания сетки лица [17]

Fig. 7. Examples of facial keypoints prediction [17]



Рис. 8. Примеры предсказания сетки лица и последующая 3D-реконструкция [18]

Fig. 8. Examples of facial keypoints prediction and 3-D reconstruction [18]

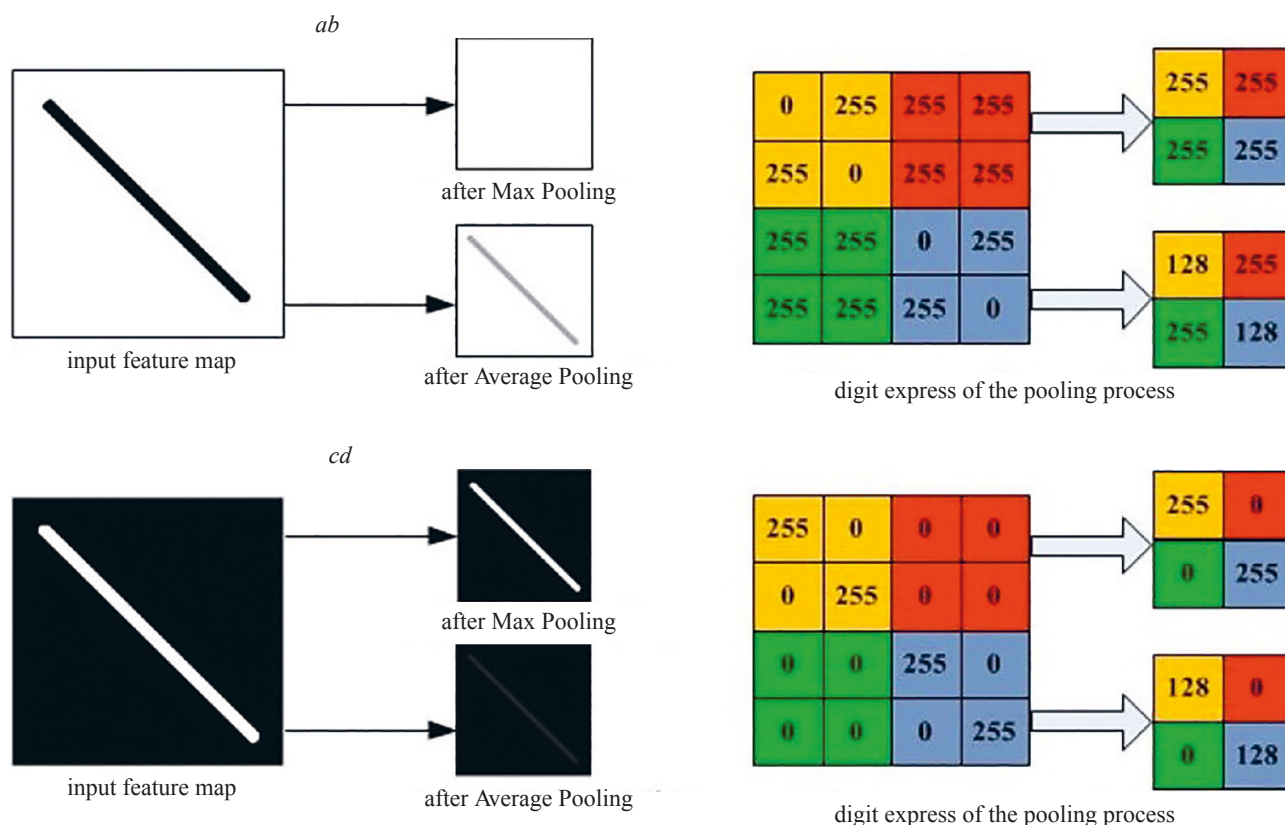


Рис. 9. Примеры затухания информации в слоях субдискретизации [7] для алгоритмов Max Pooling (a, b) и Average Pooling (c, d), в графическом (a, c) и цифровом (b, d) режимах

Fig. 9. Examples of information vanishing in pooling layers [7] in case of Max Pooling (a, b) and Average Pooling (c, d). In graphical (a, c) and digital (b, d) cases, correspondingly

Операция свертки, используемая в классических сверточных архитектурах, способна обнаруживать в данных определенные признаки, но не способна отслеживать их взаимное расположение друг относительно друга. Это может приводить (и приводит) к ошибкам и неточностям в работе моделей [19].

Пример показан на рис. 10. Сверточная нейронная сеть в обоих случаях классифицирует объект как лицо, но второй случай лицом не является.

3. Отсутствие свойства пространственной инвариантности. Для формирования представления о том, как объект выглядит «с разных сторон», свер-

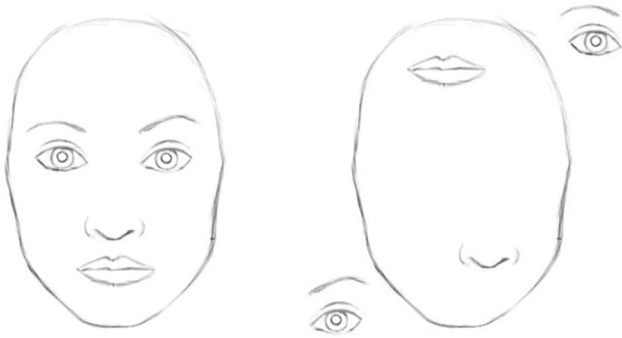


Рис. 10. Пример ошибочного определения наличия лица [19]
Fig. 10. An example of incorrect face detection [19]

точным архитектурам обычно необходимо огромное количество данных. Это приводит к необходимости сбора большого объема данных одной природы, и к длительному обучению модели. То, что понятно человеку, оказывается совершенной новинкой для классических сверток. На рис. 11 изображена статуя Свободы, которая легко узнаваема с разных углов обзора и с разным уровнем освещения для человека. Но для распознавания данного объекта сверточной нейронной сетью при обучении потребуется своя подвыборка данных для каждого из вариантов изображений.

Перечисленные проблемы возможно исключить при помощи капсульных архитектур. Работа [7] является одной из первых, в которой рассмотрены идеи капсульных архитектур.

Модификация капсульной архитектуры DeepCaps

Рассмотрим модификацию архитектуры, предназначенной для решения поставленной цели работы и по совместительству являющейся одной из самых популярных на данный момент — архитектуры DeepCaps [20].

Архитектура состоит из одного классического сверточного слоя, 16 капсульных слоев (четыре из которых — слои со Skip Connections), а также одного полносвязного слоя, используемого для определения координат ключевых точек лица (решения задачи регрессии относительно координат этих точек).

Модификация архитектуры DeepCaps состоит в следующем.

1. В работе [20] выполнено тестирование архитектуры DeepCaps в задаче классификации на наборах данных MNIST, FashionMNIST и SVHN. Размеры входных данных (ширина × высота в пикселах, число каналов) для черно-белых изображений равны $(64 \times 64, 1)$, для цветных изображений — $(64 \times 64, 3)$. В настоящей работе использован размер данных $(128 \times 128, 3)$. Изменение размера связано с тем, что для данных меньшего размера значительно уменьшалось качество работы обученной модели, а для данных большего размера — возрастала вычислительная сложность при обучении и использовании модели, а также ухудшалась способность модели обобщать признаки.
2. На вход предлагаемой архитектуры поступали не только исходные изображения, но и изображения, полученные в результате их семантической сегментации. Сегментация получена при помощи заранее предобученной сети U-net. Такой подход позволил извлечь дополнительные признаки из исходного изображения и повысить способность сети к обобщению.
3. В результате сеть на вход получила данные, размер которых равен $(128 \times 128, 6)$ — склейка исходных трехканальных изображений и их сегментированных трехканальных копий.
4. В исходной архитектуре, решающей задачу классификации, выходы нейронов выходного слоя, количество которых равно количеству классов, нормировались, чтобы на выходе было получено совместное



Рис. 11. Примеры видов изображений при распознавании статуи Свободы [19]
Fig. 11. Examples of images types when recognizing the Statue of Liberty [19]

вероятностное распределение (сеть может определять несколько объектов на изображении и относить их к разным классам). В настоящей работе такой подход не годится: для каждой точки необходимо предсказывать сразу три координаты, причем связь предсказаний в рамках одного контекста оказывается крайне нежелательной. Это означает, что нерационально использовать три капсулы для каждой точки, поэтому задействовано по капсуле на точку, т. е. 468 капсул, каждая из которых выдает три координаты.

5. В качестве функции потерь берется евклидово расстояние между истинными и предсказанными координатами соответствующих точек. В качестве функции, показывающей точность предсказаний, выбрана индикаторная функция (весовая), которая за каждую попавшую в 0,01 шаровую окрестность точку добавляла 1/468 к точности.

Полученные результаты

Проверка работоспособности капсульной нейронной сети выполнена в два этапа. Это связано с тем, что детекция трехмерной сетки лица является сложной задачей. Исходя из этого, сначала проведено предсказание небольшого количества ключевых точек лица в пространстве 2D. Для этого выполнена разработка простой архитектуры (рис. 12) на основании архитектуры,

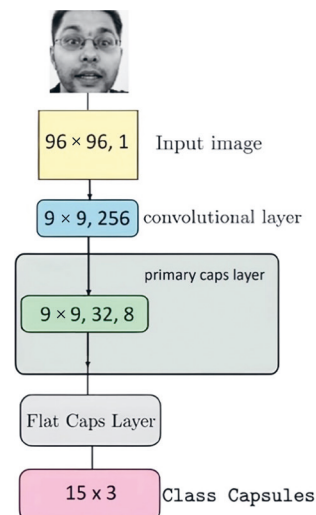


Рис. 12. Архитектура для детекции 15 точек лица

Fig. 12. 15 face-points detection architecture

описанной в работе [7]. На данном этапе использован датасет, состоящий из изображений в градациях серого лиц людей, размеченный 15 ключевыми точками лица: уголки губ, центры верхней и нижней губ, нос, зрачки, уголки глаз, начало и конец бровных дуг. Примеры данных представлены на рис. 13, а. Решение оптими-

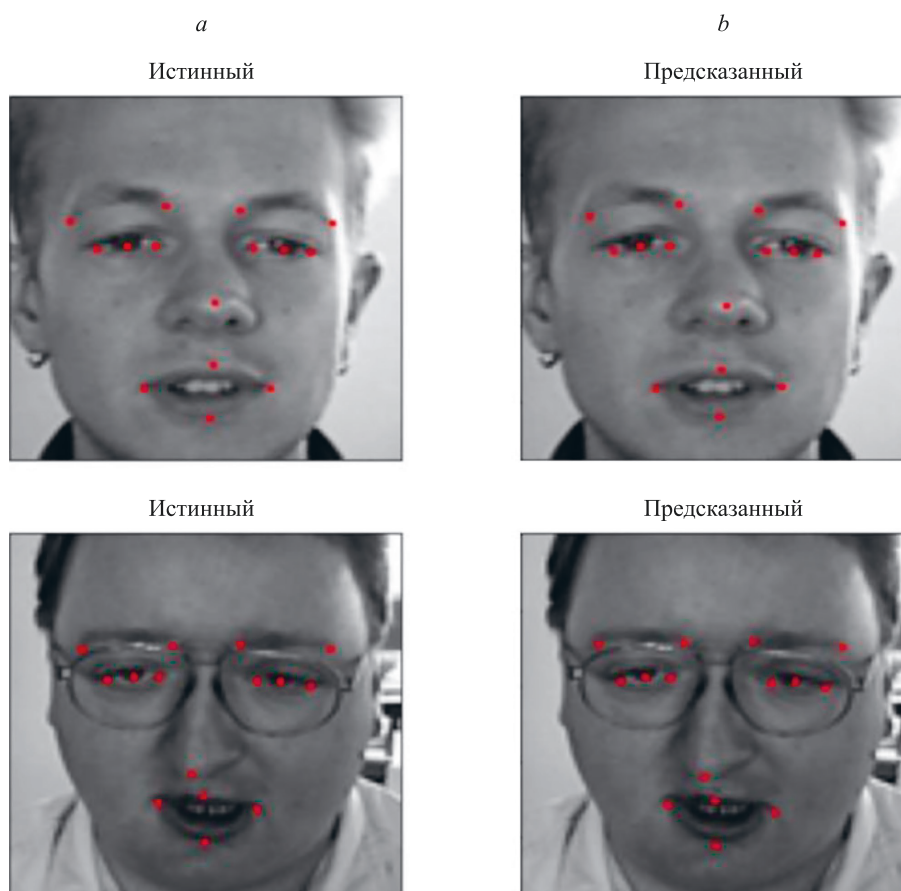


Рис. 13. Примеры работы обученной модели: истинное (а) и предсказанное (б) изображения

Fig. 13. Examples of model application: initial image (a) and model's prediction (b)

зационной задачи для модели выполнено на видеокарте GeForce RTX 3070. Обучение заняло 20 эпох, а общее время обучения — 54 мин. Значение функции потерь на тестовой выборке равно 0,2618, а функция точности на тестовой выборке достигла значения в среднем 0,8601. Данные значения не являются показательными, поэтому продемонстрируем результаты работы обученной модели на случайных данных из тестовой выборки (рис. 13, *b*) — расположение красных точек на предсказанных изображениях сопоставимо с точками на исходных изображениях.

Выполним проверку работоспособности архитектуры с помощью распознавания трехмерной сетки лица с относительно большим числом ключевых точек (468 точек). Используем данные, состоящие из 10 000 сгенерированных лиц (рис. 14, *a*), размеченные с помощью фреймворка MediaPipe (рис. 14, *b*).

На основе полученных данных осуществим сегментирование по распознанным с помощью MediaPipe ключевым точкам лица. Для построения сетки лица

используем триангуляцию Делоне. Сегментацию проведем по отдельным сегментам: овал лица, левый и правый глаза, нос и рот (рис. 14, *c*).

Полученную сегментацию используем в процессе обучения нейронной сети U-net [21] для решения задачи семантической сегментации (рис. 15).

Используем вторую нейронную архитектуру (DeepCaps) глубоких капсульных сетей. На рис. 16 показана схема разработанной архитектуры.

Предлагаемая архитектура с учетом семантической сегментации и предсказания сетки лица показана на рис. 17.

Обучение заняло 20 эпох, всего в выборке было 10 000 изображений, 1000 из них была отложена на тест. По результатам обучения и тестирования функция потерь во время обучения варьировалась в пределах 2,30–2,60, а точность — 0,9–0,94. Во время тестирования функция потерь достигла значений 2,50–2,90, а точность — 0,87–0,90. Пример работы обученной сети на тестовых данных представлен на рис. 18.

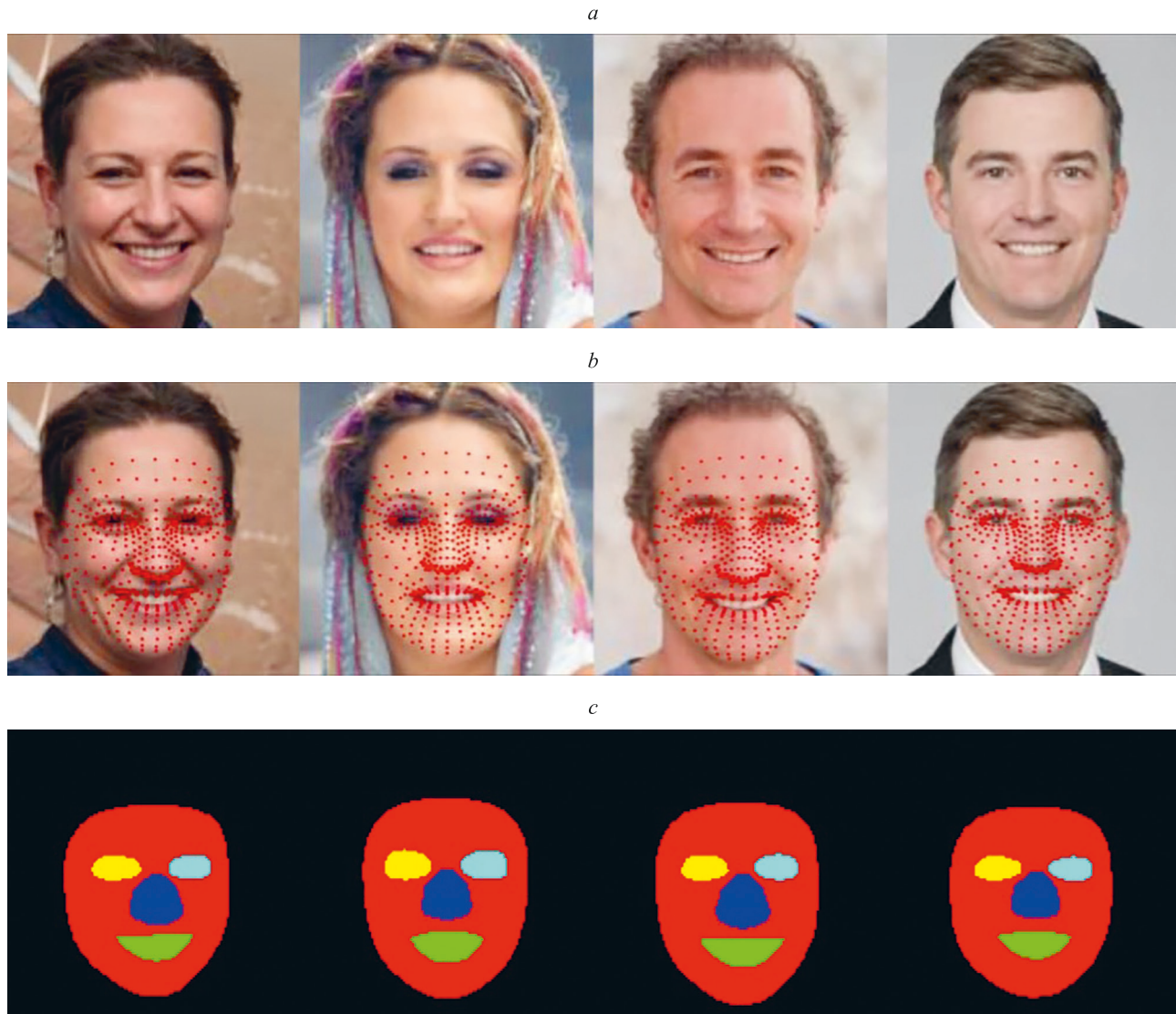


Рис. 14. Примеры: лиц из набора данных (*a*); разметки фреймворка MediaPipe (*b*) и двумерной сегментации (*c*)

Fig. 14. Examples: faces from the dataset (*a*); MediaPipe application (*b*) and 2D segmentation (*c*)

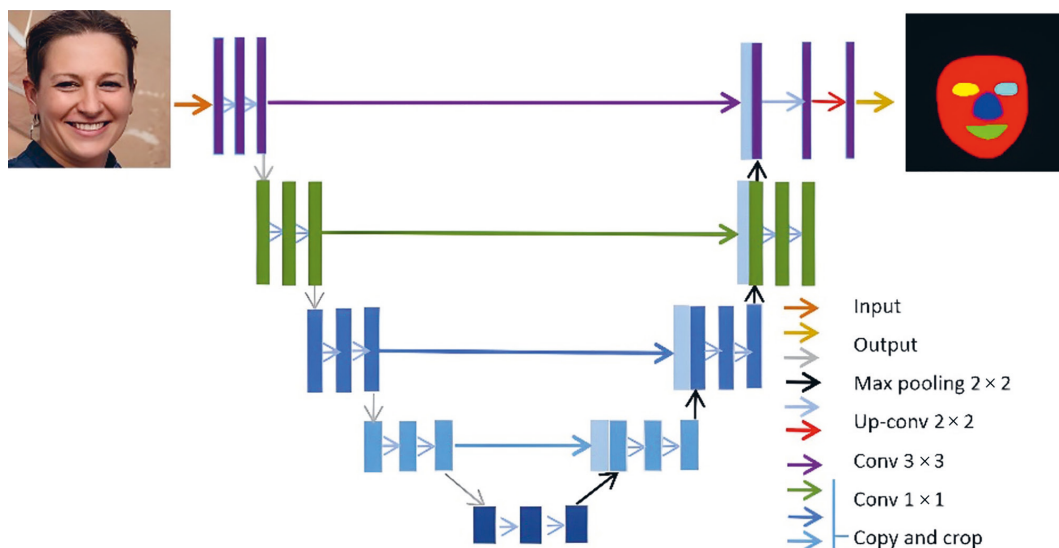


Рис. 15. Архитектура нейронной сети U-net [21]

Fig. 15. U-net architecture [21]

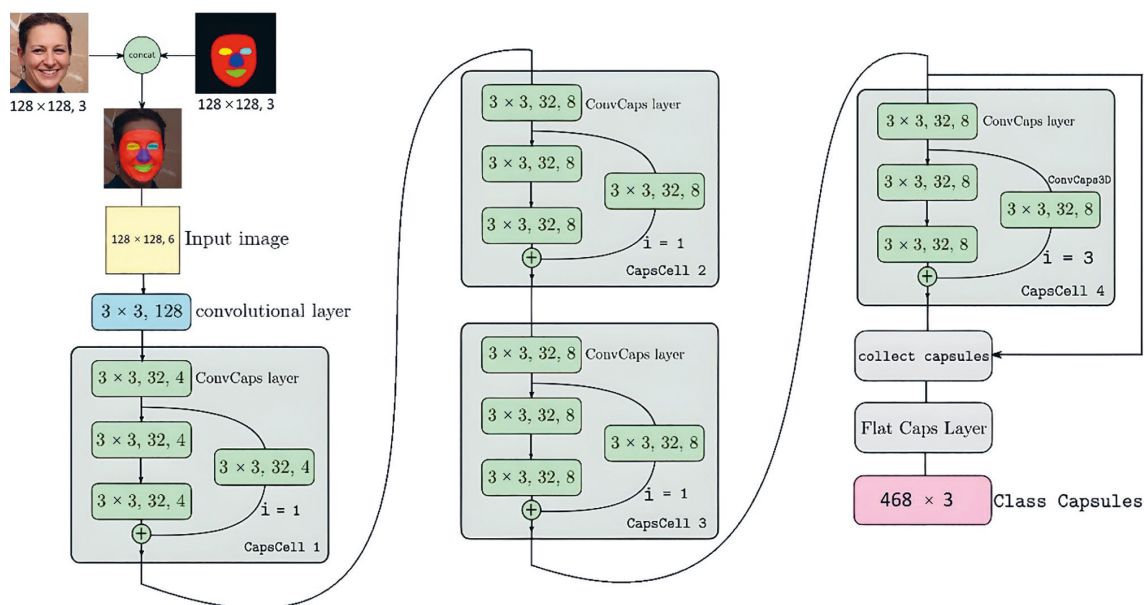


Рис. 16. Схема разработанной архитектуры предсказания сетки лица глубокой капсульной сетью

Fig. 16. Developed deep capsule network architecture for the facial keypoints detection

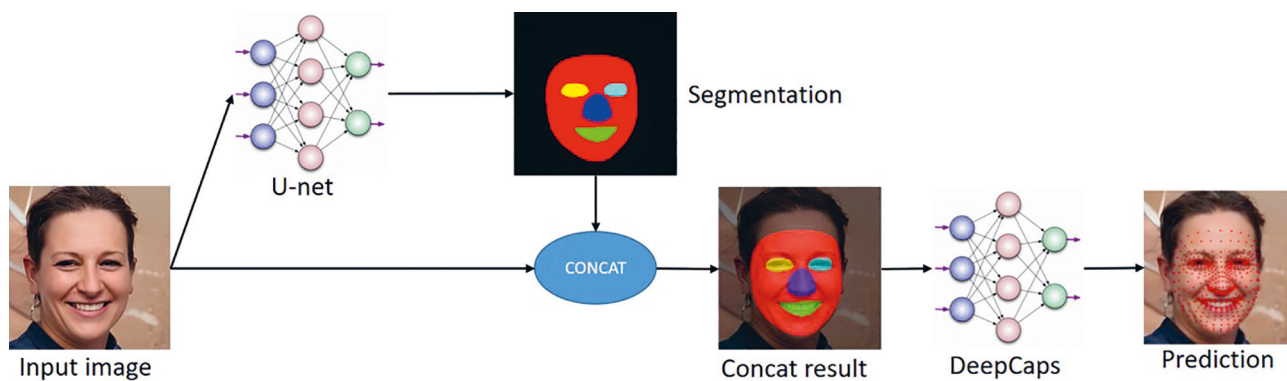


Рис. 17. Схема разработанной архитектуры с учетом сегментации и предсказания сетки лица глубокой капсульной сетью

Fig. 17. Developed deep capsule network architecture with additional segmentation for the facial keypoints detection



Рис. 18. Предсказание сетки лица глубокой капсульной сетью

Fig. 18. Deep capsule network's predictions

Дискуссия

В связи с тем, что большинство современных решений по распознаванию ключевых точек лица используются в коммерческих проектах, исследователи, их создающие, не предоставляют подробной архитектуры своего решения и размеченных данных. В настоящей работе предложена архитектура, качественно сопоставимая с закрытыми решениями, однако являющаяся полностью открытой и доступной для других исследователей.

Заключение

В результате работы сформирован набор данных для обучения и обучены две нейронные сети: капсульная сеть с динамической маршрутизацией и глубокая капсульная сеть. Обе сети показали высокие результаты в задаче детекции ключевых точек лица. Первая нейросеть распознавала 15 двумерных ключевых точек

лица по набору данных, взятого из базы сайта Kaggle. Получена точность равная 0,86, что не является идеальным показателем, но при визуальном сравнении примеров, не входящих в обучающую выборку, результат оказался высоким. Вторая нейросеть распознавала 468 трехмерных ключевых точек лица. В открытом доступе отсутствуют наборы данных для решения такой задачи, поэтому был использован набор данных без разметки. Далее выполнена разметка с помощью решения корпорации Google — фреймворк MediaPipe, которая использована в обучении. В результате получена точность 0,90, что при визуальном сравнении дает крайне высокий результат, почти не отличимый от решений MediaPipe. Капсульные нейронные сети показали высокие результаты в решении задачи по детекции ключевых точек лица. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что разработанное решение может быть использовано в технологиях по сопоставлению геометрии сетки лица реального человека с геометрией сетки лица трехмерной модели.

Литература

1. Волкова С.С., Матвеев Ю.Н. Применение сверточных нейронных сетей для решения задачи противодействия атаке спуфинга в системах лицевой биометрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 702–710. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-702-710>
2. Дикий Д.И., Артемьева В.Д. Исследование применимости искусственных нейронных сетей для верификации пользователей по динамике почерка // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 677–684. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-677-684>
3. Abiodun O.I., Kiru M.U., Jantan A., Omolara A.E., Dada K.V., Umar A.M., Linus O.U., Arshad H., Kazaure A.A., Gana U. Comprehensive review of artificial neural network applications to pattern recognition // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 158820–158846. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2945545>
4. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Communications of the ACM. 2017. V. 60. N 6. P. 84–90. <https://doi.org/10.1145/3065386>
5. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 770–778. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>
6. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 779–788. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.91>

References

1. Volkova S.S., Matveev Yu.N. Convolutional neural networks for face anti-spoofing. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 702–710. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-702-710>
2. Dikiy D.I., Artemeva V.D. Research of artificial neural network applicability for user's online handwritten signature verification. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 677–684. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-677-684>
3. Abiodun O.I., Kiru M.U., Jantan A., Omolara A.E., Dada K.V., Umar A.M., Linus O.U., Arshad H., Kazaure A.A., Gana U. Comprehensive review of artificial neural network applications to pattern recognition. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 158820–158846. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2945545>
4. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 2017, vol. 60, no. 6, pp. 84–90. <https://doi.org/10.1145/3065386>
5. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 770–778. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>
6. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection. *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 779–788. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.91>

7. Sabour S., Frosst N., Hinton G.E. Dynamic routing between capsules // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. V. 30. P. 3856–3866.
8. Nguyen H.H., Yamagishi J., Echizen I. Capsule-forensics: Using capsule networks to detect forged images and videos // *Proc. of the ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2019. P. 2307–2311. <https://doi.org/10.1109/icassp.2019.8682602>
9. Wang N., Gao X., Tao D., Yang H., Li X. Facial feature point detection: A comprehensive survey // *Neurocomputing*. 2018. V. 275. P. 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.05.013>
10. Beham M.P., Roomi S.M.M. A review of face recognition methods // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 2013. V. 27. N. 4. P. 1356005. <https://doi.org/10.1142/S0218001413560053>
11. Li H., Lin Z.L., Brandt J., Shen X., Hua G. Efficient boosted exemplar-based face detection // *Proc. of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2014. P. 1843–1850. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2014.238>
12. Sun Y., Wang X., Tang X. Deep convolutional network cascade for facial point detection // *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2013. P. 3476–3483. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2013.446>
13. Zhang Z., Luo P., Loy C.C., Tang X. Facial landmark detection by deep multi-task learning // *Lecture Notes in Computer Science*. 2014. V. 8694. P. 94–108. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10599-4_7
14. Trigeorgis G., Snape P., Nicolaou M.A., Antonakos E., Zafeiriou S. Mnemonic descent method: A recurrent process applied for end-to-end face alignment // *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 4177–4187. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.453>
15. Zhu X., Lei Z., Liu X., Shi H., Li S.Z. Face alignment across large poses: A 3D solution // *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 146–155. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.23>
16. Jourabloo A., Liu X. Large-pose face alignment via CNN-based dense 3D model fitting // *Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 4188–4196. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.454>
17. Kartynnik Y., Ablavatski A., Grishchenko I., Grundmann M. Real-time facial surface geometry from monocular video on mobile GPUs // *arXiv*. 2019. arXiv:1907.06724. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.06724>
18. Wood E., Baltrušaitis T., Hewitt Ch., Johnson M., Shen J., Milosavljević N., Wilde D., Garbin S., Sharp T., Stojiljković I., Cashman T., Valentin J. 3D face reconstruction with dense landmarks // *Lecture Notes in Computer Science*. 2022. V. 13673. P. 160–177. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19778-9_10
19. Pechyonkin M. Understanding Hinton's Capsule Networks. Part I: Intuition. Medium. 2018, December 18 [Электронный ресурс]. URL: <https://medium.com/ai%C2%B3-theory-practice-business/understanding-hintons-capsule-networks-part-i-intuition-b4b559d1159b> (дата обращения: 12.12.2022).
20. Yu D., Wang H., Chen P., Wei Z. Mixed pooling for convolutional neural networks // *Lecture Notes in Computer Science*. 2014. V. 8818. P. 364–375. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11740-9_34
21. Ding Y., Chen F., Zhao Y., Wu Z., Zhang C., Wu D. A stacked multi-connection simple reducing net for brain tumor segmentation // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 104011–104024. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2926448>

Авторы

Бойцев Антон Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3374-8256>, boitsevanton@gmail.com

Волчек Дмитрий Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0310-1654>, dvolchek@itmo.ru

Магазенков Егор Николаевич — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7563-0846>, egormaga04@mail.ru

Authors

Anton A. Boitsev — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3374-8256>, boitsevanton@gmail.com

Dmitry G. Volchek — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0310-1654>, dvolchek@itmo.ru

Egor N. Magazenkov — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7563-0846>, egormaga04@mail.ru

Неваев Максим Кириллович — системный проектировщик, ЗАО «Центр финансовых технологий», Санкт-Петербург, 191002, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9000-7841>, m.nevaev@alumni.nsu.ru

Романов Алексей Андреевич — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57194976341](https://orcid.org/0000-0002-6991-464X), <https://orcid.org/0000-0002-6991-464X>, romanov@itmo.ru

Maxim K. Nevaev — Systems Designer, ZAO “Center of Financial Technologies”, Saint Petersburg, 191002, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9000-7841>, m.nevaev@alumni.nsu.ru

Aleksei A. Romanov — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57194976341](https://orcid.org/0000-0002-6991-464X), <https://orcid.org/0000-0002-6991-464X>, romanov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 25.01.2023
Одобрена после рецензирования 22.02.2023
Принята к печати 16.05.2023

Received 25.01.2023
Approved after reviewing 22.02.2023
Accepted 16.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-519-529

УДК 004.056

Обзор национальных и международных стандартов для категорирования объектов критической информационной инфраструктуры

Илья Иосифович Лившиц✉

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
livshitz.il@yandex.ru✉, <http://orcid.org/0000-0003-0651-8591>

Аннотация

Обеспечение безопасности объектов критической информационной инфраструктуры — активно развивающееся направление в сфере информационной безопасности на национальном и мировом уровне. Категорирование объектов критической инфраструктуры является составной частью общего процесса обеспечения безопасности. При динамично изменяющемся уровне угроз процесс определения категории объекта все еще недостаточно оптимален. На основе существующих требований российских и международных стандартов оценивание объектов критической инфраструктуры проводится не всегда оперативно и корректно. Также не формируются численные оценки, не обеспечивается объективность оценки и последующей переоценки со стороны независимых экспертов. В работе представлен анализ актуальных требований в области категорирования объектов критической инфраструктуры, применяемых в Российской Федерации. Выполнен сравнительный анализ национальных нормативных правовых актов Российской Федерации и системы международных стандартов в области информационной безопасности. Рассмотрено регулирование процессов категорирования объектов критической инфраструктуры. Обоснована необходимость формирования численных значений критериев значимости для корректного определения и последующей независимой оценки (переоценки) категории объектов критической инфраструктуры. Представлены рекомендации по совершенствованию процесса категорирования объектов критической инфраструктуры и формированию численных оценок. Реализация приложенных рекомендаций позволит повысить точность, объективность и достоверность процесса создания современных систем обеспечения информационной безопасности.

Ключевые слова

критическая информационная инфраструктура, категорирование объектов критической информационной инфраструктуры, критерии значимости, информационная безопасность, система управления информационной безопасностью, риски, остаточные риски

Ссылка для цитирования: Лившиц И.И. Обзор национальных и международных стандартов для категорирования объектов критической информационной инфраструктуры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 519–529. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-519-529

Review of national and international standards for categorizing of critical information infrastructure objects

Ilya I. Livshitz✉

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
livshitz.il@yandex.ru✉, <http://orcid.org/0000-0003-0651-8591>

Abstract

Ensuring the security of critical information infrastructure facilities is an actual developing area of information security both at the national and global level. Categorization of critical infrastructure objects is an integral part of the common and holistic security process. With a dynamically changing threats level, the process of determining the category of an object is still not optimal enough. Based on the existing requirements both of Russian and International standards, the assessment of critical infrastructure facilities not always be carried out promptly and correctly, in addition, numerical

© Лившиц И.И., 2023

estimates are not formed, the objectivity of the assessment and subsequent reassessment by independent experts is not ensured. This article presents an analysis of the current requirements in the field of categorization of critical infrastructure objects used in the Russian Federation. A comparative analysis of the national regulatory legal acts of the Russian Federation and the system of International standards in the field of IT-security is presented. Regulation of categorization processes of critical infrastructure objects is considered. The necessity of forming numerical values of significance criteria for the correct determination and subsequent independent evaluation (reassessment) of the category of critical infrastructure objects is substantiated. Recommendations for improving the process of categorizing critical infrastructure objects and the formation of numerical estimates are presented. The implementation of the recommendations made will improve the accuracy, objectivity and reliability of the process of creating modern information security systems.

Keywords

critical information infrastructure, categorization of critical information infrastructure objects, significance criteria, information security, information security management system, risks, residual risks

For citation: Livshitz I.I. Review of national and international standards for categorizing of critical information infrastructure objects. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 519–529 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-519-529

Введение

Значимым результатом отражения существенных изменений в процессах обеспечения информационной безопасности (ИБ) в Российской Федерации стала Доктрина информационной безопасности¹ 2016 г. С помощью доктрины были обновлены концепция и задачи обеспечения защиты информации, а также уточнены важные понятия, например, «критическая информационная инфраструктура» (КИИ). В результате были приняты Федеральный закон от 26.07.2017 N 187-ФЗ² «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» (187-ФЗ) и Постановление Правительства РФ от 08.02.2018 N 127³ «Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений» (ПП-127). Указанная система требований, во-первых, ввела в Российской Федерации понятие КИИ, которое заменило ранее применявшееся устаревшее понятие — «ключевые системы информационной инфраструктуры», предложенные в 2014 г. ФСТЭК России, и определила новые требования по защите: Приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России от 21 декабря 2017 г. N 235⁴ «Об утверждении требований к созданию систем безопасности значимых объектов крити-

ческой информационной инфраструктуры Российской Федерации и обеспечению их функционирования» и Приказ ФСТЭК от 25 декабря 2017 г. N 239⁵ «Об утверждении требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (в ред. Приказов ФСТЭК России от 9 августа 2018 г. N 138, от 26 марта 2019 г. N 60, от 20 февраля 2020 г. N 35).

Для объектов КИИ важно оперативно и корректно выполнить оценку критерия значимости информационной системы (ИС) в зависимости от обрабатываемых типов информации [1, 2]. Определение критерия значимости ИС зависит от применяемых категорий информации и регламентируется формальным процессом категорирования. С учетом последующей «стоимости» ошибок при создании некорректной системы обеспечения информационной безопасности (СОИБ) при неточном (неполном) категорировании, можно обоснованно полагать, что этап категорирования является ключевым, поскольку безопасность объектов КИИ крайне важна практически для всех сфер современной экономики и государственного управления [3, 4]. Актуальность рассматриваемой проблемы точного численного и корректного категорирования объектов КИИ с учетом новых рисков и требования повышения уровня обеспечения ИБ для стратегически важных отраслей подтверждена дополнительно в Указе Президента Российской Федерации от 01.05.2022 № 250⁶ «О дополнительных мерах по обеспечению информационной безопасности Российской Федерации».

Непринятие мер по защите на объектах КИИ может привести к серьезным инцидентам, например, в области топливно-энергетического комплекса: нефтяной терминал SaudiAramco⁷, нефтяной завод Oil

¹ Указ Президента Российской Федерации от 05.12.2016 г. № 646 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41460>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

² Федеральный закон от 26.07.2017 г. N 187 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/?ysclid=l8d73e934i5010228, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

³ Постановление Правительства РФ от 08.02.2018 г. N 127 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/71876120/?ysclid=l8d7511svw618900114>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁴ Приказ ФСТЭК России от 21 декабря 2017 г. N 235 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/1589-?ysclid=l8d7t834hy284363961>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁵ Приказ ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. N 239 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fstec.ru/en/53-normotvorcheskaya/akty/prikazy/1592-prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239?ysclid=l8d7u36shh579968999>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁶ Указ Президента Российской Федерации от 01.05.2022 г. № 250 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47796>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁷ Хуситы зажигают нефть ракетами [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4584906?>, сво-

India¹, нефтеперерабатывающий завод Petro Rabigh², трубопровод Colonial Pipeline³ и др. Актуальность проблемы защиты объектов КИИ не вызывает сомнения, и для снижения ущерба и минимизации рисков возникает необходимость создания корректного СОИБ для объектов КИИ. Известно, что каждая ИС, работающая с определенной «чувствительной» информацией, требует применения определенного набора мер и средств защиты (иногда называемых «контролями», *IT-security controls*), обеспечивающих поддержание безопасного функционирования на заданном уровне (степень результативности, *effectiveness*) в соответствии с определенным множеством требований или критериев (*criteria*). В качестве критериев могут быть приняты известные национальные и международные стандарты, которые предоставляют рекомендации по выполнению процессов оценки соответствия (*conformity assessment*). Соответственно, корректный процесс категорирования позволяет рационально установить критерии, далее выбрать оптимальный набор средств и мер защиты (*controls*) и обеспечить заданный результат — создание, внедрение и развитие СОИБ для конкретного объекта КИИ [5, 6]. В развитие новизны данной темы примем во внимание еще один параметр — экономическую эффективность СОИБ применительно к оптимальной совокупности средств и мер защиты, позволяющих обеспечить заданный результат в определенных граничных условиях (время, деньги, персонал и прочее). Пример расчета оптимальности различных наборов средств и мер защиты и сопоставления их по показателю чистого дисконтированного дохода (Net Present Value, NPV), полученный автором при проведении курсов в Университете ИТМО, представлен на рис. 1.

На рисунке показано наглядное сопоставление двух и более вариантов набора мер и средств обеспечения безопасности, дающих различные экономические расчетные значения по показателю NPV. Видно, что вариант 2 выглядит более предпочтительным, поскольку проходит точку окупаемости раньше, чем вариант 1 при одинаковых граничных условиях (лабораторные расчетные условия) [7, 8].

Анализ российского законодательства для категорирования объектов КИИ

Как было показано в разделе «Введение», в Российской Федерации в законодательство введено понятие КИИ, к обязательной области применения которого

бодный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

¹ Хакеры потребовали \$7,5 млн у индийского нефтяного завода Oil India [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/news/531297.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

² Аварийная ситуация: как противостоять атакующему системе ПАЗ вредоносу Trisis [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/analytics/523661.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

³ Colonial Pipeline предупреждает клиентов об утечке данных в результате атаки DarkSide [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/news/523424.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

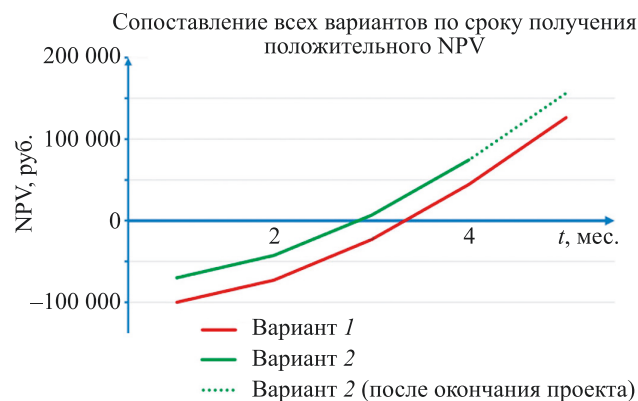


Рис. 1. Пример сопоставления вариантов мер и средств обеспечения безопасности [7]

Fig. 1. An example of comparing various security controls combinations [7]

относятся организации, функционирующие в закрытом перечне 14 сфер деятельности (ст. 2 п.8 187-ФЗ) и имеющие ИС, информационно-телекоммуникационные сети или автоматизированные системы управления технологическими процессами, являющиеся объектами КИИ. Основные юридические схемы обеспечения процесса защиты объектов КИИ регламентирует 187-ФЗ. Обобщенно, процесс категорирования объектов КИИ, в соответствии со ст. 7 187-ФЗ, заключается в установлении эквивалентности конкретного объекта КИИ критериям значимости (всего определено 14 критериев по 5 группам) и показателям их значений, которые определены в ПП-127. Указанный этап обязывает субъектов КИИ объективно определить критичные процессы организации, и на их основе обоснованно выделить конкретные объекты, относящиеся к КИИ.

Существующей нормативной правовой базой в Российской Федерации в сфере обеспечения безопасности КИИ не определены «целевые» конкретные показатели для критериев ключевых процессов, ответственность за их определение полностью ложится на субъекты КИИ. Показатели критериев значимости 3-х категорий значимости, от 1-й (наивысшей) до 3-й (наименьшей), определены конкретными диапазонами исчисляемых единиц и показателями нарушений штатной работоспособности относительно установленного официального фиксированного значения. Строгие фиксированные ограничения могут приводить к определению категории значимости, не отражающей в полной мере реальность функционирования и (или) непрерывные процессы технической модернизации, функционального развития и (или) переконфигурирования. Например, в настоящее время не в полной мере определен порядок проведения категорирования сложных современных объектов, оснащенных блоками электроники под управлением микропроцессоров — станков с числовым программным управлением⁴, меди-

⁴ Автоматический или автоматизированный? Все равно ОКИИ! Транспорт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/blog/personal/valerykomarov/349793.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

цинских информационных мониторинговых системы¹, тепловозов, судов с цифровыми блоками управления². Отметим, что процесс обеспечения безопасности объектов КИИ в Российской Федерации был существенно модернизирован в 2018 г., как в рамках соответствия определенным важным задачам «Стратегии национальной безопасности Российской Федерации»³, так и при смене применявшегося еще в 2014 г. подхода защиты ключевой системы информационной инфраструктуры, предложенного ФСТЭК России⁴ и отмененного в 2018 г. В существующем варианте жесткие установленные нормативы не допускают вариации исходя из актуальных (или планируемых при последующей модернизации) изменений технических характеристик и (или) технологических изменений объектов КИИ. В отличие от известного подхода управления рисками в технических системах (ГОСТ Р ИСО серии 31000⁵, ГОСТ Р МЭК серии 31010⁶), в существующих условиях владельцы объектов КИИ не выполняют переоценку показателей по ПП-127, не поддерживают и не обновляют файлы рисков (не учитываются остаточные риски) и не пересматривают состав мер и средств защиты, применяемых в каждый конкретный момент.

Анализ международной законодательной базы для категорирования объектов КИИ

Анализ международной нормативной базы начнем с рассмотрения наиболее известного, практически применяемого и периодически обновляемого стандарта ISO/IEC 27005:2018 Information technology — Security

techniques — Information security risk management⁷. Данный стандарт считается во всем мире ключевым для расчета рисков (остаточных рисков) ИБ и формирования системы для точно определяемых требований при категорировании защищаемых активов различного назначения. Заметим, что в октябре 2022 г. вышла новая версия стандарта ISO/IEC 27005:2022 — Information security, cybersecurity and privacy protection — Guidance on managing information security risks⁸.

Рассмотрим наиболее важные требования, установленные в ISO/IEC 27005:2022:

- определение критериев воздействия (*Impact criteria*). Критерии разработаны и конкретизированы с точки зрения степени ущерба или затрат для организации, вызванных событием ИБ, с учетом уровня классификации затронутого информационного ресурса;
- оценка последствий (*Assessment of consequences*). Оценка активов начинается с классификации активов в соответствии с их критичностью с точки зрения их важности для достижения бизнес-целей организации. Далее оценка определяется с использованием двух показателей: восстановительная стоимость актива (стоимость восстановления, очистки и замены информации, если это возможно); деловые последствия потери или компрометации актива, такие как потенциальные неблагоприятные деловые и (или) правовые или нормативные последствия раскрытия, модификации, отсутствия и (или) уничтожения информации и других информационных активов.

Отметим, что в ПП-127 четко указано, что исходными данными для категорирования являются угрозы безопасности информации (УБИ) в отношении объекта КИИ, а также имеющиеся данные, в том числе статистические, о компьютерных инцидентах, произошедших ранее на объектах КИИ соответствующего типа. В результате виден общий методический подход для определения объективных свидетельств (статистики), на базе которой возможно выполнение оценки рисков и выбора наиболее эффективных мер противодействия актуальным УБИ. В качестве примера рассмотрим отчет «Анализ мошеннических звонков с территории Украины. Участники и цифры (ноябрь 2022)»⁹, в котором приведены данные статистики Сбера за 2022 г. В отчете отмечено, что мошенники сделали 1,5 млрд попыток позвонить клиентам банков с целью похитить денежные средства. Также приведены данные по опе-

¹ Краткий обзор новой методики оценки угроз ФСТЭК [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.securitylab.ru/blog/personal/Business_without_danger/350381.php, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

² Сегодня АСУ ТП не защищают ни воздушный зазор, ни проприетарные протоколы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/blog/company/solarsecurity/347320.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

³ Указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021 г. № 400 О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47046>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁴ Информационное сообщение ФСТЭК России от 4 мая 2018 г. N 240/22/2339 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/1585-informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-4-maya-2018-g-n-240-22-2339>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁵ ГОСТ Р ИСО 31000-2019 Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Принципы и руководство. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200170125?ysclid=lgxkri97tj944205707>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁶ ГОСТ Р ИСО 31010-2021 Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Методы оценки риска. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200180987?ysclid=lgxkvbc8ut371018586>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁷ ISO/IEC 27005:2018 Information technology — Security techniques — Information security risk management [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.iso.org/standard/75281.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁸ ISO/IEC 27005:2022 — Information security, cybersecurity and privacy protection — Guidance on managing information security risks [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/80585.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁹ Анализ мошеннических звонков с территории Украины. Участники и цифры [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://promo.sber.ru/kibrary>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

раторам, которые безнаказанно пропускают мошеннический трафик с установочными данными.

Важно обратить внимание на логику стандарта ISO/IEC 27005:2018, в котором особое внимание отдано на определение бизнес-целей. Далее выполнена классификация необходимых активов исходя из их уровня критичности по отношению к определенным ранее бизнес-целям, и выбран наиболее оптимальный состав мер для противодействия с учетом важной экономической оценки «восстановительной стоимости» (*replacement value of the asset*), насколько это практически возможно. В Приложении В (Annex B) дано описание состава первичной информации, которое включает: жизненно важную информацию (*vital information*) для осуществления миссии или бизнеса организации; личную информацию (*personal information*), в соответствии с национальными законами о конфиденциальности; стратегическую информацию (*strategic information*), необходимую для достижения целей, определенных стратегическими целями; дорогостоящую информацию (*high-cost information*), сбор, хранение, обработка и передача которой требует длительного времени и (или) сопряжена с высокой стоимостью приобретения.

Примем во внимание, что информация, которая не была идентифицирована как «чувствительная» (*sensitive*) после проведения общей оценочной процедуры в первом цикле, может не иметь классификации, следовательно, даже если такая информация будет скомпрометирована, организация все равно сможет успешно выполнить свою миссию. С другой стороны, необходимо принять во внимание, что в случае ошибочной и (или) неполной классификации первичной информации, возможны серьезные инциденты ИБ в случае компрометации, поскольку для ошибочно пропущенной информации для конкретного объекта (ИС) в СОИБ не были предусмотрены соответствующие меры защиты. В результате необходимо учесть, что исключительно важно выполнение последующего обязательного цикла переоценки с учетом остаточных рисков в отношении объекта защиты (ИС) [9–12].

Анализ федерального законодательства ФРГ для категорирования объектов КИИ

Рассмотрим два актуальных стандарта (BSI-Standard 200-2 IT-Grundschutz Methodology (BSI 200-2¹ и BSI 200-3²) в системе федеральных стандартов BSI (ФРГ), которые определяют процесс управления рисками ИБ, в том числе порядок работы с активами применительно к объектам КИИ. Перед началом фактического анализа рисков ИБ по BSI 200-3 выполним процедуру в соответствии с BSI 200-2, включающую: регламентацию

и внедрение процесса обеспечения ИБ в организации, в том числе путем утверждения концепции безопасности; определение области применения концепции безопасности и формирование соответствующего перечня ценных информационных активов; определение и внедрение базовых и стандартных мер по обеспечению ИБ определенных активов.

В результате данного оценивания (по аналогии со стандартом ISO/IEC 27005) получим перечень информационных активов, в отношении которых необходимо выполнить анализ рисков. Стандарт BSI 200-2 допускает объединение активов в группы с целью сохранения разумности при выполнении оценки значительного количества типовых активов (однотипных программируемых промышленных контроллеров, рабочих станций и др.) и определение в дальнейшем приоритетов для такой оценки: «стандартная защита» — приоритет отдается высокоуровневой оценке бизнес-процессов и всей ИТ-инфраструктуры. Полученная оценка выступает как ориентир для управления рисками в отношении активов более низких уровней; «защита ядра» — приоритет отдается оценке ключевых активов, которым должны быть предъявлены самые высокие требования к внедряемым мерам защиты; «базовая защита» — сначала выполняются обязательные базовые требования из BSI 200-2, затем — мероприятия по оценке рисков.

Заметим, что стандарт BSI 200-2 при реализации варианта «базовой защиты» требует сначала выполнить базовые требования и затем «включить» данный состав информационных активов в контекст общего процесса управления рисками с последующей оптимизацией состава применяемых мер защиты. В п. 8.2.1 «Определение категорий потребностей в защите» определено, что «потребности в защите обычно не поддаются количественной оценке». Следует полагать данное ограничение существенным недостатком, негативно влияющим на возможность применения различных шкал (дискретных оценок) и иных численных показателей в отношении конкретного объекта оценивания. По этой причине BSI 200-2 ограничивается только квалифицированным заявлением, подразделяя потребности в защите на три категории последствий ущерба: «нормальная» (*normal*) — ограничены и поддаются управлению; «высокие» (*high*) — могут быть значительными; «очень высокие» (*very high*) — могут достигать катастрофического уровня.

Рассмотрим в качестве примера одну из категорий — «нормальную» защиту, определенную в стандарте BSI 200-2. Для рассматриваемой категории потребность в защите определяется при следующих факторах: нарушение законов (нормативных актов) с незначительными последствиями; незначительные нарушения контракта (*Minor breaches of contract*) с максимально низкими штрафными санкциями; нарушение прав (*Impairment of the right*) обработки персональных данных с неблагоприятными последствиями; ухудшение способности (*Impairment of the ability*) выполнять задачи (оцениваемое как приемлемое, максимально допустимое время простоя составляет от 24 до 72 ч); финансовые последствия (*Financial consequences*) признаются приемлемыми.

¹ BSI-Standard 200-2 [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Grundschutz/International/bsi-standard-2002_en_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=2, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

² Немецкое качество или как оценивать риски ИБ по BSI-Standard 200-3 [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.securitylab.ru/blog/company/USSC/352337.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

Анализ федеральных стандартов NIST по категорированию

На международном уровне для категорирования объектов КИИ, кроме ISO (IEC), наиболее известными являются стандарты:

- FIPS (Federal Information Processing Standards, Федеральные стандарты обработки информации) серии 199 «Standards for Security Categorization of Federal Information and Information Systems» (Стандарты категорирования безопасности информации и информационных систем) (FIPS 199¹);
- NIST (National Institute of Standards and Technology, Национальный институт стандартов и технологий) серии SP 800-60 «Guide for Mapping Types of Information and Information Systems to Security Categories Special Publication» (Специальное издание. Руководство по сопоставлению типов информации и информационных систем с категориями безопасности);
- FISMA (Federal Information Security Management Act, Федеральный закон США об управлении информационной безопасностью), 2002 г.

В стандартах NIST предложено осуществлять как категорирование обрабатываемой (и защищаемой) информации, так и ИС в целом [13]. Категорирование ИС является первым шагом для создания СОИБ, последующие этапы создания которой описаны в цикле RFM² (Risk Management Framework, Структура управления рисками) [14, 15]. Подробное описание процесса категорирования, которое относится к этапу планирования СОИБ, в соответствии с требованиями NIST SP 800-53³, представлено на рис. 2.

Корректное определение категории значимости ИС — результат адекватно установленной категории критичности различных типов информации, обрабатываемой в рассматриваемой ИС [16, 17]. В соответствии с FIPS 199, категория безопасности ИС — наивысшее значение критичности из всех типов информации, функционирующей в рассматриваемой ИС. Таким образом, изначально рассматриваются и оцениваются все типы информации, которые есть в ИС [18, 19]. Следующим этапом оценивается уровень потенциального воздействия на каждый тип информации и определяется лишь качественное значение: низкое, среднее, высокое или отсутствует.

К сожалению, в рассматриваемых федеральных стандартах NIST допускаются только качественные оценки, и этот недостаток, отчасти, нивелирует приме-

нимость предлагаемого аппарата для современного использования в процессе создания эффективной СОИБ. Потенциальное воздействие определяется оценкой ущерба для каждого объекта по свойствам безопасности (конфиденциальность, целостность, доступность). И в данном случае — фиксированная «триада» свойств ИБ, и этот недостаток, также не дает основания применения методического аппарата для современного практического использования. На последнем шаге для оценки воздействия на каждый объект ИБ для ИС выбирается максимальное воздействие из всех типов информации в ИС [16, 17]. В публичных ресурсах доступны примеры применения методики FIPS 199, что позволяет строить простейшие записи для оценивания категории безопасности (КБ) для ИС:

$$КБ_{ИС} = \{(К, \text{воздействие}); (Ц, \text{воздействие}); (Д, \text{воздействие})\}, \quad (1)$$

где К — конфиденциальность; Ц — целостность; Д — доступность.

При данном наборе «триады» свойств ИБ критичность ИС — КБ_{ИС} определяется в соответствии с FIPS 199 следующим образом (табл. 1).

В развитии новизны по данной теме учтем несколько дополнительных свойств ИБ, например: подотчетность, неотказуемость, аутентичность (в соответствии с требованиями п. 3.28). Тогда запись (1) обеспечит более расширенный перечень свойств ИБ, например:

$$КБ_{ИС} = \{(К, \text{воздействие}); (Ц, \text{воздействие}); (Д, \text{воздействие}); (П, \text{воздействие}); (Н, \text{воздействие}); (А, \text{воздействие})\}, \quad (2)$$

где П — подотчетность; Н — неотказуемость; А — аутентичность.

При расширенном, по сравнению с базовым набором свойств ИБ (FIPS 199) на основании записи (2) КБ_{ИС}, определим критичность ИС в соответствии с новой комбинацией FIPS 199 и ISO/IEC 27001⁴ (табл. 2). Видно, что расширенный метод обеспечивает явное улучшение точности КБИС (по расширенному набору свойств, но все же оценки по-прежнему применяются только качественные, не формируются численные оценки и не обеспечивается объективность оценки и переоценки со стороны независимых экспертов. Напомним, что рассматриваемые недостатки объективно могут повлечь негативные и необратимые последствия при создании СОИБ и в открытых источниках, только за 2022 г. приведены примеры противодействия для современных векторов атак и конкретных уязвимостей промышленных систем⁵.

⁴ ISO/IEC 27001 Системы менеджмента информационной безопасности [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.iso.org/ru/standard/27001>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁵ Уязвимости в CodeMeter позволяют атаковать промышленные системы [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.securitylab.ru/news/511888.php?ysclid=la87gkvxjw783700363>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

¹ Промышленные компании: векторы атак [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/ics-attacks-2018/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

² Risk Management Framework for Information Systems and Organizations [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-37r2.pdf>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

³ Обзор NIST SP 800-53 [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.altx-soft.ru/upload/iblock/d76/%D0%9E%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80%20SP%20800-53_v4.pdf?ysclid=l8eiqe5gxr92836019, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).



Рис. 2. Схема этапа планирования системы обеспечения безопасности [14, 15]

Fig. 2. Scheme of IT-Security planning stage [14, 15]

Таблица 1. Пример определения критичности информационной системы (базовый метод FIPS 199)

Table 1. Example of determining the Information system criticality (FIPS 199 basic method)

Объект	К	Ц	Д	Критичность
База данных	Среднее	Среднее	Низкое	—
Системная информация	Низкое	Среднее	Низкое	—
Оцениваемая система	Среднее	Среднее	Низкое	Средняя

Таблица 2. Пример определения критичности ИС (расширенный метод)

Table 2. Example of determining the Information system criticality (enchased method)

Объект	К	Ц	Д	П	А	Н	Критичность
База данных	Среднее	Среднее	Низкое	Среднее	Низкое	Низкое	—
Системная информация	Низкое	Среднее	Низкое	Среднее	Среднее	Низкое	—
Оцениваемая система	Среднее	Среднее	Низкое	Низкое	Среднее	Низкое	Средняя

Принцип определения $KB_{ИС}$ в табл. 1 и табл. 2 простой — по достижении более высокого значения ($KB_{Значение}$) для конкретного свойства ИБ ($KB_{Свойство}$) вся оцениваемая ИС соответствует автоматически данному значению [18, 19]. Следует отметить, что и ранее действующий защиты ключевой системы информационной инфраструктуры и актуальное ПП-127 придерживаются такого же правила — по достижении высшего значения (ущерба, показателя и др.) вся оцениваемая система (объект оценки) автоматически «наследует» это значение. Например, конкретное свойство ИБ можно определить по факту объективного оценивания текущего значения ($KB_{Значение}$) и выбранного критерия ($KB_{Критерий}$):

$$\begin{cases} KB_{Свойство} = 1; KB_{Значение} \geq KB_{Критерий} \\ KB_{Свойство} = 0; KB_{Значение} < KB_{Критерий} \end{cases}$$

При этом $KB_{Значение}$ и $KB_{Критерий}$ предполагаются численными дискретными в некотором фиксированном и удобном для практического применения в диапазоне, например $\{0; \frac{1}{4}; \frac{1}{2}; \frac{3}{4}; 1\}$. Заметим, что такие дискретные шкалы могут применяться в соответствии с ГОСТ Р серии 57580¹. Также в новом методе допускается для повышения скорости формирования оценки $KB_{ИС}$ дополнительное условие — значение критерия ($KB_{Критерий}$) может быть одинаковым для некоторого свойства ИБ или для всей совокупности свойств ИБ для конкретного объекта.

¹ ГОСТ Р 57580.1-2017 Национальный стандарт Российской Федерации. Безопасность финансовых (банковских) операций. Базовый состав организационных и технических средств [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://docs.cntd.ru/document/1200146534?ysclid=lgxlyqwei299336614> свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

Тогда оценка $KB_{ИС}$ примет следующий вид по совокупности множества свойств ($KB_{Свойство}$):

$$KB_{ИС} = \frac{1}{n} \sum_i^n KB_{Свойство_i}$$

В результате задача оптимизации оценки $KB_{ИС}$ имеет вид (в условиях неравенства $KB_{Значение}$ и $KB_{Критерий}$):

$$KB_{ИС} \xrightarrow{KB_{Значение} \neq KB_{Критерий}} \max.$$

Оптимизацию $KB \xrightarrow{KB_{Критерий}} \max$ выполним в граничных условиях совокупности свойств ИБ («триада» — в базовом варианте и «шести» — в расширенном варианте) и дискретности шкалы оценки. Обратим внимание на актуальный пример — в современных условиях расширение «дискретности» свойств ИБ при оценивании критичности обрабатываемой информации в конкретном объекте может иметь исключительно важное значение — например, для СМ¹ (в отношении доступности, целостности и подотчетности). Дополнительно рассмотрим дальнейшее совершенствование нового метода категорирования объектов, а именно — как может быть реализована комплексная оценка $KB_{ИС}$ с учетом не только оценки собственных экспертов, но и оценки независимых экспертов (например, в рамках аудитов различных типов — внутренних, внешних 2-й стороной или внешних 3-й стороной).

$$KB_{Комплексный} = \frac{1}{k} \sum_i^k KB_{ИС_j} R_j,$$

где граничные условия для весовых коэффициентов определяются как:

$$\sum_j^k R_j = 1.$$

Индекс j в общем случае имеет значения от 1 (только внутренний аудит или иногда еще говорят «самооценка») до 3 (добавляется внешний аудит 2-й стороной, например, аттестованной лабораторией ФСТЭК, и внешний аудит 3-й стороной, например, органом по сертификации с необходимой аккредитацией). Безусловно, новый метод нуждается в серьезном контроле беспристрастности (*impartiality*), что является крайне важным в процессе оценки соответствия и занимает первую позицию в перечне принципов, обеспечивающих доверие (ISO/IEC 17021²).

Для поддержания доверия необходимо, чтобы решения органа по сертификации основывались на объективных свидетельствах соответствия, и чтобы на

его решения не влияли другие интересы или стороны. Дополнительно рассмотрим явное указание угроз сохранения беспристрастности, в частности, финансовый интерес. Необходимо рассмотреть еще один факт, когда сертификат соответствия требованиям международных стандартов ISO одной из крупнейших в Российской Федерации компаний был отозван одним из британских органов по сертификации на основании того, что в составе учредителей есть представитель королевской семьи. В данной ситуации говорить о сохранении беспристрастности не приходится, но данный инцидент в не меньшей степени говорит о важности применения в регулярной практике процедур управления рисками (остаточными рисками). В Российской Федерации регуляторы предпринимают определенные меры для решения данной известной проблемы (например, на уровне Банка России³ и на уровне экспертного сообщества⁴).

Сравнительный анализ методических подходов для категорирования объектов КИИ

При определении соответствия объектов КИИ установленным критериям значимости, примем во внимание, что существуют ИС, которые в автономном режиме функционирования не будут иметь высокой степени критичности. В то же время на практике в коммерческих и государственных организациях применяется множество ИС, работоспособность которых исходно взаимосвязана — информация различных типов хранится, передается, зашифровывается/расшифровывается и обрабатывается в сложном технологическом «конвейере». Ситуация может значительно усложняться при территориальном (трансграничном) разнесении компонентов КИИ и обеспечения безопасности сложных иерархических систем — например, компоненты автоматизированной системы управления технологическими процессами, работающие в режиме жесткого реального времени. В этом случае потребуется обеспечить анализ соответствия нескольких типов объектов КИИ, функционирующих в разных юрисдикциях, часовых поясах и нормативно-правовом поле трансграничного обмена данными.

В этой связи очень важно определить степень критичности всех типов информации, циркулирующей в технологическом «конвейере». В результате возрастет важность корректной и независимой оценки степени влияния факторов при категорировании объектов КИИ. Другими словами, наиболее существенной задачей является точное и корректное категорирование объекта КИИ для обоснованного отнесения его к категории значимых объектов (или иного решения), поскольку создание СОИБ в последующем опирается именно на

¹ Минцифры планирует повысить кибербезопасность СМ¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.securitylab.ru/news/534728.php>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

² ГОСТ Р ИСО/МЭК 17021-1-2017. Оценка соответствия. Требования к органам, проводящим аудит и сертификацию систем менеджмента. Часть 1. Требования [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://docs.cntd.ru/document/1200146130?ysclid=la6law30im515354401>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

³ Банк России не верит «комфортным» аудиторам [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.banki.ru/news/bankpress/?id=3184616&ysclid=la8fhp2o5w364374416>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

⁴ 16 аудиторов, которые проглядели больше всего проблемных банков [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.rbc.ru/finances/16/12/2015/566edbf69a7947200e4430a6?ysclid=la8fikciyz21018617>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

Таблица 3. Пример оценивания рисков без определения соответствующих активов

Table 3. Example of risk assessment without identifying the relevant assets

Актив	Риск	Вероятность	Последствия	Значимость риска
Не применимо	Запрет производителя в отношении программного обеспечения и оборудования	5	4	20
Не применимо	Прерывание сервисов коммуникаций с контрагентами	3	4	12
Не применимо	Недостаток ключевого ИТ-персонала	2	5	10
Не применимо	Сбои и отказы сетевой инфраструктуры	2	4	8
Не применимо	Внешние атаки к критичным активам	2	4	8
Не применимо	Снижение качества управления ИТ-инфраструктурой	4	2	8

результаты корректного категорирования субъектом своего множества объектов КИИ. Объектами КИИ в нормативной правовой базе Российской Федерации и некоторых международных (федеральных) стандартах называются разные сущности, соответственно, применяются различные подходы к обеспечению безопасности и защите информации объектов, рассматриваются различные критерии при оценке объектов категорирования. В качестве «сущностей» в ряде международных стандартов ISO (IEC) и, соответственно, ГОСТ Р ИСО (ГОСТ Р ИСО/МЭК) признаются активы с соответствующим методическим сопровождением — идентификацией, оцениванием имеющихся уязвимостей, выявлением актуальных УБИ, категорированием, и в качестве хорошего примера здесь можно отметить ГОСТ серии 13335-1¹. В практике автора был пример (табл. 3), в котором для определенного объекта были сформированы риски без определения соответствующих активов (поле имело пометку «не применимо»).

При оценивании степени критичности объекта осуществив анализ игнорирования логики выполнения стандартных процедур (не определены активы, следовательно, не исследованы их свойства, соответственно, не определены присущие уязвимости, поэтому не могут быть корректно определены УБИ, и, в свою очередь, риски ИБ) может привести к серьезным ошибкам при проектировании СОИБ. В международном законодательстве осуществляется процесс категорирования, исходя из предопределенных целей безопасности (*security objectives*). Таким образом, предполагается, что ИС уже содержит определенную встроенную систему защиты (*by design*), и необходимо оперативно оценить ее достаточность, провести анализ влияния ИС и обрабатываемой информации на зависимые ИС в рамках конкретной (информационно-технологической) — экосистемы. Хорошим примером в данном контексте — учет атак по каналам поставщиков (*Supply chain attacks*), хотя и в «классическом» ISO/IEC серии 27001 (ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001) и в ряде публикаций по прикладным аспектам обеспечения ИБ [20, 21] отра-

жены эти базовые требования. К сожалению, примеры успешных атак говорят о том, что высший менеджмент «не видит» данных рисков и, скорее всего, причина кроется в недостаточно корректной и точной процедуре идентификации и категорирования объектов КИИ до начала построения СОИБ и обоснованного выбора множества конкретных мер защиты.

Соответственно, в международных и федеральных стандартах рассмотрено категорирование объектов КИИ как базовая процедура на этапе создания и модернизации самой ИС, а в нормативной правовой базе Российской Федерации предусматривается создание СОИБ также для уже существующего объекта (ИС, информационно-телекоммуникационная сеть или автоматизированная система управления технологическими процессами). При необходимости этот процесс может быть итерационным — последовательно оценивается существующая ИС (например, только собственная встроенная подсистема противоаварийной защиты, *Safety Instrumented System* в соответствии с ГОСТ Р МЭК серии 61508²), далее анализируются при необходимости дополнительные меры и средства защиты СОИБ. Критерии оптимальности для КБИС могут меняться на разных стадиях итерационного процесса в зависимости от изменения ландшафта УБИ, новых требований, оценки остаточных рисков и нормативных требований.

Заключение

Показана важность выполнения корректной и оперативной оценки требований к обеспечению безопасности объектов на стадии создания, как это предлагается в федеральных стандартах FIPS и BSI. Отмечена необходимость введения для субъектов Российской Федерации понятия «критическая информационная инфраструктура», и в настоящий момент процедуры категорирования являются технологическими и правовыми новациями. Итерационная процедура категорирования позволяет выявлять недостатки при обеспечении информационной безопасности и для созданных

¹ ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335-1-2006 Национальный стандарт Российской Федерации. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200048398?ysclid=lgxlr50yxq617100645>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

² ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 Национальный стандарт Российской Федерации. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200103191?ysclid=lgxlr50yxq617100645>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.10.2022).

ранее компонентов в составе объектов критической информационной инфраструктуры в постоянно изменяющихся условиях функционирования и изменения технологических процессов. Именно по этой причине крайне важно реализовать полную процедуру оценки рисков и переоценки остаточных рисков. Это относится как к составу уже внедренных мер защиты (которые тоже требуется переоценивать с течением времени), так и постоянно изменяющегося «ландшафта» угроз безопасности.

Создание систем обеспечения информационной безопасности для существующих объектов критической информационной инфраструктуры позволяет быстро и достаточно эффективно пройти этап категорирования для тех субъектов, которые ввели свои объекты в эксплуатацию до вступления в силу Федерального закона N 187. В положительном аспекте необходимо отметить, что в Постановлении Правительства РФ указаны требования сбора и анализа статистики инцидентов и иные

процедуры, описанные ранее в различных международных стандартах, что позволяет в перспективе перейти к современным методикам управления рисками информационной безопасности. Представляется рациональным продолжить дальнейшую оптимизацию процедуры категорирования объектов критической информационной инфраструктуры, совершенствование показателей критериев для сокращения времени, повышения достоверности и объективности получения финального результата. Практическая значимость выполненного исследования заключается в предложении численных оценок для категорирования объектов критической информационной инфраструктуры, что позволит повысить точность, объективность и достоверность всего процесса создания современных систем обеспечения информационной безопасности. Полученные результаты могут быть применены для современных предприятий, в том числе для объектов топливно-энергетического комплекса.

Литература

1. Смирнов Е.В. Методика оценки политической значимости угроз объекту критической информационной инфраструктуры на примере объекта инфокоммуникаций // Экономика и качество систем связи. 2020. № 2. С. 49–56.
2. Новикова Е.Ф., Хализев В.Н. Разработка модели угроз для объектов критической информационной инфраструктуры с учетом методов социальной инженерии // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2019. № 4. С. 127–135. <https://doi.org/10.21672/2074-1707.2019.48.4.127-135>
3. Щелкин К.Е., Звягинцева П.А., Селифанов В.В. Возможные подходы к категорированию объектов критической информационной инфраструктуры // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 6. № 1. С. 128–133. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-6-1-128-133>
4. Ерохин С.Д., Петухов А.Н., Пилугин П.Л. Принципы и задачи асимптотического управления безопасностью критических информационных инфраструктур // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 12. С. 29–35. <https://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10330>
5. Горелик В.Ю., Безус М.Ю. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». 2020. Т. 3. № 9. С. 1438–1448.
6. Оюн Ч.О., Попантонопуло Е.В. Объекты критической информационной инфраструктуры // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. № 9. С. 45–49.
7. Лившиц И.И. Экономическое обеспечение информационной безопасности: учебно-методическое пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 69 с.
8. Лившиц И.И. Нормативно-методическое обеспечение информационной безопасности: учебно-методическое пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 68 с.
9. Konyukhov V.Y., Livshitz I.I., Oparina T.A. Improving the quality of electricity in electrical supply networks of industrial enterprises // Proc. of the 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). 2021. P. 156–160. <https://doi.org/10.1109/itm53292.2021.9642875>
10. Livshitz I.I., Lontsikh P.A., Lontsikh N.P., Golovina E.Y., Safonova O.M. Industrial Systems Security Assessments study // Proc. of the 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). 2021. P. 161–164. <https://doi.org/10.1109/itm53292.2021.9642828>
11. Livshitz I.I., Lontsikh P.A., Lontsikh N.P., Golovina E.Y., Safonova O.M. A study of modern risk management methods for industrial safety assurance in the fuel and energy industry // Proc. of

References

1. Smirnov E. Methodology for assessing the political significance of threats to a CII object on the example of an infocommunication object. *Jekonomika i kachestvo sistem svyazi*, 2020, no. 2, pp. 49–56. (in Russian)
2. Novikova E.F., Khalizev V.N. The development of a threat model for critical information infrastructure facilities considering social engineering methods. *Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2019, no. 4, pp. 127–135. (in Russian). <https://doi.org/10.21672/2074-1707.2019.48.4.127-135>
3. Shchelkin K.E., Zvyagintseva P.A., Selifanov V.V. Possible approaches to categorization of critical information infrastructure objects. *Interexpo GEO-Siberia*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. 128–133. (in Russian). <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-6-1-128-133>
4. Erokhin S.D., Petukhov A.N., Pilyugin P.L. Principles and tasks of asymptotic security management of critical information infrastructures. *T-Comm: Telecommunications in Transport Industry*, 2019, vol. 13, no. 12, pp. 29–35. (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10330>
5. Gorelik V.Yu., Bezus M.Iu. About security of critical information infrastructure of the Russian Federation. *StudNet*, 2020, vol. 3, no. 9, pp. 1438–1448. (in Russian)
6. Oyun Ch.O., Popantonopulo E.V. Objects of critical information infrastructure. *Interexpo GEO-Siberia*, 2018, no. 9, pp. 45–49. (in Russian)
7. Livshitz I.I. *Economic Support of Information Security*. St. Petersburg, ITMO University, 2021, 69 p. (in Russian)
8. Livshitz I.I. *Regulatory and Procedural Support of Information Security*. St. Petersburg, ITMO University, 2021, 68 p. (in Russian)
9. Konyukhov V.Y., Livshitz I.I., Oparina T.A. Improving the quality of electricity in electrical supply networks of industrial enterprises. *Proc. of the 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, 2021, pp. 156–160. <https://doi.org/10.1109/itm53292.2021.9642875>
10. Livshitz I.I., Lontsikh P.A., Lontsikh N.P., Golovina E.Y., Safonova O.M. Industrial Systems Security Assessments study. *Proc. of the 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, 2021, pp. 161–164. <https://doi.org/10.1109/itm53292.2021.9642828>
11. Livshitz I.I., Lontsikh P.A., Lontsikh N.P., Golovina E.Y., Safonova O.M. A study of modern risk management methods for industrial safety assurance in the fuel and energy industry. *Proc. of the 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, 2021, pp. 165–167. <https://doi.org/10.1109/itm53292.2021.9642791>

- the 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). 2021. P. 165–167. <https://doi.org/10.1109/itm53292.2021.9642791>
12. Lontsikh P.A., Gulov A.E., Livshitz I.I., Koksharov A.V., Golovina E.Y. System-oriented analysis and classification of process control methods for software development // Proc. of the 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS). 2021. P. 174–177. <https://doi.org/10.1109/itm53292.2021.9642850>
 13. Breaux T.D., Gordon D.G., Papanikolaou N., Pearson S. Mapping legal requirements to IT controls // Proc. of the 6th International Workshop on Requirements Engineering and Law (RELAW). 2013. P. 11–20. <https://doi.org/10.1109/RELAW.2013.6671341>
 14. Hale G., Lenzner R. Introducing the National Security Cyber Assistance Program (NSCAP) // Journal of Information Warfare. 2014. V. 13. N 2. P. 39–45.
 15. Lam D.D., Carayannis E.G. Standard insecurity: How, why and when standards can be a part of the problem // Journal of the Knowledge Economy. 2011. V. 2. N 2. P. 234–248. <https://doi.org/10.1007/s13132-010-0029-0>
 16. Gandhi R.A., Crosby K., Siy H., Mandal S. Gauging the impact of FISMA on software security // Computer. 2014. V. 47. N 9. P. 103–107. <https://doi.org/10.1109/MC.2014.248>
 17. Murray A.T., Grubescic T.H. Overview of reliability and vulnerability in critical infrastructure // Critical Infrastructure: Reliability and Vulnerability. Berlin: Springer, 2007. P. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68056-7_1
 18. Taylor L.P. Categorizing data sensitivity // FISMA Compliance Handbook (Second Edition). 2013. P. 63–78. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405871-2.00008-7>
 19. Calder A. NIST Cybersecurity Framework: A Pocket Guide. IT Governance Publishing, 2018. 78 p. <https://doi.org/10.2307/j.ctv4cbhfx>
 20. Лившиц И.И., Соколов Е.О. Проектирование международного значимого электронного документооборота для компаний холдингового типа // Вопросы кибербезопасности. 2020. № 5(39). С. 61–68. <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2020-05-61-68>
 21. Басырова А.А., Лившиц И.И. Анализ методики аудита информационной безопасности предприятия с помощью аутсорсинговых компаний // Автоматизация в промышленности. 2020. № 7. С. 6–9. <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.07.02>
 12. Lontsikh P.A., Gulov A.E., Livshitz I.I., Koksharov A.V., Golovina E.Y. System-oriented analysis and classification of process control methods for software development. *Proc. of the 2021 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)*, 2021, pp. 174–177. <https://doi.org/10.1109/itm53292.2021.9642850>
 13. Breaux T.D., Gordon D.G., Papanikolaou N., Pearson S. Mapping legal requirements to IT controls. *Proc. of the 6th International Workshop on Requirements Engineering and Law (RELAW)*, 2013, pp. 11–20. <https://doi.org/10.1109/RELAW.2013.6671341>
 14. Hale G., Lenzner R. Introducing the National Security Cyber Assistance Program (NSCAP). *Journal of Information Warfare*, 2014, vol. 13, no. 2, pp. 39–45.
 15. Lam D.D., Carayannis E.G. Standard insecurity: How, why and when standards can be a part of the problem. *Journal of the Knowledge Economy*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 234–248. <https://doi.org/10.1007/s13132-010-0029-0>
 16. Gandhi R.A., Crosby K., Siy H., Mandal S. Gauging the impact of FISMA on software security. *Computer*, 2014, vol. 47, no. 9, pp. 103–107. <https://doi.org/10.1109/MC.2014.248>
 17. Murray A.T., Grubescic T.H. Overview of reliability and vulnerability in critical infrastructure. *Critical Infrastructure: Reliability and Vulnerability*. Berlin, Springer, 2007, pp. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68056-7_1
 18. Taylor L.P. Categorizing data sensitivity. *FISMA Compliance Handbook (Second Edition)*, 2013, pp. 63–78. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405871-2.00008-7>
 19. Calder A. *NIST Cybersecurity Framework: A Pocket Guide*. IT Governance Publishing, 2018, 78 p. <https://doi.org/10.2307/j.ctv4cbhfx>
 20. Livshitz I., Sokolov E. Designing an internationally significant electronic document flow for holding companies. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2020, no. 5(39), pp. 61–68. (in Russian). <https://doi.org/10.21681/2311-3456-2020-05-61-68>
 21. Basyrova A.A., Livshits I.I. Analyzing the methodology of enterprise cybersecurity audit with the help of outsourcing companies. *Journal Automation in Industry*, 2020, no. 7, pp. 6–9. (in Russian). <https://doi.org/10.25728/avtprom.2020.07.02>

Автор

Лившиц Илья Иосифович — доктор технических наук, профессор практики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191569306](https://orcid.org/0000-0003-0651-8591), <http://orcid.org/0000-0003-0651-8591>, livshitz.il@yandex.ru

Author

Ilya I. Livshitz — D.Sc., Professor of Practice, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191569306](https://orcid.org/0000-0003-0651-8591), <http://orcid.org/0000-0003-0651-8591>, livshitz.il@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15.10.2022
Одобрена после рецензирования 14.02.2023
Принята к печати 23.05.2023

Received 15.10.2022
Approved after reviewing 14.02.2023
Accepted 23.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-530-537

УДК 004.056

Критерий безопасности сетевой инфраструктуры

Анастасия Дмитриевна Шилова✉

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

bondareva.ad@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7271-8343>

Аннотация

Введение. Рассмотрена задача оценки безопасности сетевой инфраструктуры. Разработаны и формализованы быстро вычисляемые метрики безопасности сети. Метрики предназначены для оценки уровня информационной безопасности сети и применимы для использования в оптимизационных задачах, направленных на перестроение сети по требованиям безопасности. **Метод.** Разработано три метрики безопасности с различной степенью детализации. Сформирован набор важных параметров сетевой инфраструктуры, которые важны для каждого узла с точки зрения продвижения по сети. Набор параметров учитывает актуальные методы бокового перемещения (lateral movement), формализованные в матрице MITRE ATT&CK. Степень детализации метрики позволила учесть наличие в сети терминального доступа, а также фактическую структуру сетевого пути от субъекта к объекту доступа. **Основные результаты.** Произведено сопоставление результатов предложенной базовой метрики с аналогичными метриками других авторов. Показано, что метрика чувствительна к изменениям существенных параметров сети, а результаты ее вычисления согласуются с результатами вычисления других метрик. Выполнена оценка предложенного метода сегментации сети, основанного на группировке субъектов и объектов. Метод позволил значительно повысить защищенность сети за счет объединения схожих субъектов и объектов в группы даже при отсутствии правил межсетевого экранирования. **Обсуждение.** Предложенные метрики могут быть использованы в качестве основы для методов сегментации сетевой инфраструктуры и перестроения существующей сети по требованиям безопасности. При этом они не зависят от параметров, для которых необходима субъективная оценка, а также не учитывают наличие известных уязвимостей, закрытие которых влияет на безопасность в целом, но не отражает защищенность сетевого взаимодействия. Наиболее существенным преимуществом можно считать значительно более быстрое вычисление по сравнению с аналогами.

Ключевые слова

информационная безопасность, сетевая инфраструктура, критерий безопасности, субъект доступа, объект доступа, сегментация сети

Ссылка для цитирования: Шилова А.Д. Критерий безопасности сетевой инфраструктуры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 530–537. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-530-537

Criterion of the network infrastructure security

Anastasia D. Shilova✉

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

bondareva.ad@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7271-8343>

Abstract

The problem of assessing the security of a network infrastructure is considered. The aim of the work is to formalize a fast computable network security metric intended for use in optimization problems aimed at rebuilding the network according to security requirements. Three metrics with varying degrees of detail are proposed to achieve this goal. To do this, a set of essential features of the network infrastructure has been formed. The level of detail of the metric allows taking into account the terminal access as well as the actual structure of the network path from the subject to the access object. The

proposed base metric was compared with previously published metrics by other authors. It is shown that the metric is sensitive to changes in essential network parameters, and the results of its calculation are consistent with the results of calculation of other metrics. Using the metric, the network segmentation method based on the grouping of subjects and objects was evaluated. It is shown that this method can significantly increase the security of the network by combining similar subjects and objects into groups even in the absence of firewall rules. The proposed metrics can be used as a basis for methods of segmenting the network infrastructure and rebuilding the existing network according to security requirements. They do not depend on a subjective assessment, and also do not take into account the presence of known vulnerabilities the closing of which affect security in general, but does not reflect the security of the network interaction. The most significant advantage can be considered as much faster calculation in comparison with analogues.

Keywords

information security, network infrastructure, security criterion, access subject, access object, network segmentation

For citation: Shilova A.D. Criterion of the network infrastructure security. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 530–537 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-530-537

Введение

Оценка безопасности сетевой инфраструктуры давно исследуется в научных работах. В настоящее время используется множество метрик, имеющих собственные достоинства и недостатки, тем не менее не существует единого подхода к определению безопасности сетевой инфраструктуры. Большинство существующих методов определения защищенности сети основаны на моделировании деятельности атакующих и построении графов сетевых атак. В связи с этим оценка защищенности информационных систем осуществляется с использованием многоэтапных алгоритмов, требующих значительных трудозатрат.

Несмотря на теоретическую возможность использования метрик безопасности для принятия решения о внедрении защитных механизмов, на практике решения чаще всего принимаются исходя из опыта администраторов безопасности. Это связано с тем, что данные метрики достаточно сложны. Часто дорогостоящие защитные средства внедряются, даже если значительное повышение безопасности возможно с использованием штатных средств.

Цель работы — решение проблемы количественной оценки безопасности сетевой инфраструктуры. Для решения проблемы необходимо сформулировать критерий безопасности сетевой инфраструктуры, на основании которого может быть произведено сопоставление защищенности различных сетей и разработать метрики безопасности сетевой инфраструктуры, предназначенные для решения оптимизационной задачи минимизации рисков в сети. Разработанные метрики должны не только учитывать критичность информационных ресурсов и возможности атакующего, но и быть простыми и быстро вычислимыми для возможности применения в качестве минимизируемой функции в задаче оптимизации.

Анализ предметной области

В работах [1–8] рассмотрена проблема определения уровня защищенности сетевой инфраструктуры. В [2] исследован метод оценки безопасности сети с использованием графа атак. При вычислении метрик применены таблицы, подобные используемым в методиках, утверждаемых Федеральной службой по техническо-

му и экспортному контролю (ФСТЭК)¹. Отметим, что применение метода оценки можно считать одним из недостатков, так как он не учитывает специфику функционирования информационных систем. В работе [3] метод оценки был усовершенствован за счет использования метрик Common Vulnerability Scoring System (CVSS). В отличие от [2] данный подход не подразумевает использование упрощенных табличных оценок и в большей степени отражает особенности функционирования сетевой инфраструктуры. Схожий метод оценки защищенности исследован в работе [4]. Он основан на определении слабости хостов к потенциальным атакам. При этом учитываются только критичные уязвимости со значением Common Weakness Scoring System (CWSS) более 60, что не позволяет полноценно оценить защищенность от полного спектра атак.

В [4] представлена методика оценки рисков, основанная на полученных в [2, 3] результатах. Метрика модифицирована для оценки риска и составлена с помощью модели действий злоумышленника, основанная на графах. Метрика зависит от экспертного подхода: например, вероятность атаки зависит от сложности, что часто не может быть оценено объективно. Также не учтены некоторые факторы, влияющие на безопасность сети, в частности наличие прав локального администратора или ошибки пользователей. В работах [7–9] произведено построение графа действий атакующих. Отличительной особенностью подхода является использование вероятностного описания для каждого ребра, что позволяет вычислить вероятностную оценку безопасности сети.

В описанных работах осуществлено построение графа возможных действий злоумышленника. Создание исчерпывающего графа и сбор данных представляют собой трудноразрешимую задачу. По этой причине большинство алгоритмов не учитывает существенную часть атак. Кроме того, построение графа и расчет метрик безопасности требуют значимых затрат времени и ресурсов. Математическая оптимизация таких метрик не представляется возможной. Отметим, что данные методы в большинстве случаев используют метрики CVSS, в которых присутствуют субъективно настрои-

¹ Методика оценки угроз безопасности информации. Методический документ. Утвержден ФСТЭК России, 5 февраля 2021 г.

ваемые параметры, а ценность активов определяется ранжированием по ограниченному числу уровней. Еще одной особенностью данных работ может считаться то, что в них учитываются заведомо осуществимые атаки. При построении же защищенной сети отсутствие устаревшего программного обеспечения (ПО) или заведомо некорректных настроек должно являться обязательным условием.

Обзор альтернативных метрик защищенности сетевой инфраструктуры приведен в работе [6], где проведено разделение метрик, предназначенных для контроля безопасности узла и безопасности сети, учитывающие и не учитывающие путь проникновения в сеть. Недостатком метрик, не учитывающих порядок действий злоумышленников, является их нацеленность на защищенность узлов: безопасность сети рассмотрена как доля уязвимых узлов.

Заметим, что все рассмотренные работы не учитывают уязвимости нулевого дня и уязвимости, связанные с ошибками в работе персонала. Отсутствие логической сетевой связности между сегментами сети позволяет значительно снизить вероятность компрометации даже при использовании подобных уязвимостей.

Модель сетевой инфраструктуры

Для построения метрики оценки безопасности сети необходимо представить математическое описание (модель) сетевого взаимодействия. В качестве основы для его построения рассмотрим ориентированный граф сетевых взаимодействий, в узлах которого расположены используемые маршрутизаторы и конечные устройства. Субъектами взаимодействия будем считать пользовательские устройства (автоматизированные рабочие места), а объектами — вычислительные устройства, на которых размещены применяемые информационные системы, доступные посредством сетевых протоколов.

Основой модели служит понятие пути. Каждому ребру соответствует матрица, состоящая из переменных, отражающих запрещающие правила межсетевого экранирования на узле, расположенном в начале ребра:

$$\mathbf{X}^{(r)} = \|x_{ij}^{(r)}\|,$$

где x_{ij} — переменная, принимающая значение 0 или 1 и отражающая запрещающее правило для соответствующих субъекта и объекта. Путь от каждого субъекта S_i до каждого объекта O_j представляет собой последовательность ребер ориентированного графа.

Наличие пути выразим соотношением:

$$P_{ij} = \prod_{r \in P} (1 - x_{ij}^{(r)}),$$

где P — множество ребер в пути от субъекта S_i до объекта O_j . Отметим, что полученная модель не накладывает ограничений на количество путей от субъекта до объекта. При этом, если в сети существует несколько путей между субъектом и объектом доступа (при использовании балансировки трафика или протоколов, осуществляющих перестроение таблиц маршрутизации), то получим следующие обобщения сети:

$$P_{ij} = 1 - \prod_n P_{ij}^{(n)},$$

где $P_{ij}^{(n)}$ — частный путь от субъекта до объекта.

Полученная модель предназначена, в первую очередь, для определения возможности получения доступа субъекта к объекту. Рассмотрим метрики, основанные на матрице MITRE ATT&CK и включающие в себя важные характеристики с точки зрения продвижения по сети и атаки на информационные системы. В качестве угрозы в данной модели рассмотрим несанкционированный доступ любого рода со стороны субъекта к объекту на сетевом уровне. Поставим условие, что разрабатываемые метрики должны отражать повышение защищенности при устранении избыточных путей, которые могут быть использованы потенциальными злоумышленниками.

Предлагаемые метрики

Предложенная метрика основана на модели сетевой инфраструктуры. Под критичностью каждого пути будем понимать величину, зависящую от уровня возможностей потенциального атакующего, значимости обрабатываемой информации, возможности использования объекта для продвижения по сети, а также от применяемых средств защиты. Данные характеристики в значительной степени заимствованы из матрицы MITRE ATT&CK, отражающей современные процедуры, тактики и техники, применяемые злоумышленниками.

Отметим, что рассматриваемые далее метрики аналогичны общепринятому методу вычисления уровня риска с единственным отличием, что введен формальный механизм вычисления вероятности реализации угрозы.

Обобщенная метрика безопасности. Для каждого субъекта определим набор характеристик, существенных с точки зрения проведения субъектом атак на сетевую инфраструктуру. Пусть Y_i — уровень возможностей субъекта S_i . Данная величина является порядковой и принимает следующие значения: 1 — обычные пользовательские привилегии, 2 — наличие средств администрирования, 3 — наличие средств разработки, 4 — права локального администратора, 5 — права доменного администратора. С точки зрения атак на информационную инфраструктуру данные уровни отражают возможности, которыми обладает потенциальный злоумышленник для проведения атак на информационные ресурсы, бокового перемещения и доставки инструментов для выполнения несанкционированных действий. Данная величина определена по аналогии с установлением уровня возможностей нарушителя информационной безопасности, используемыми в различных методиках и моделях угроз ФСТЭК^{1,2}.

¹ Методика оценки угроз безопасности информации. Методический документ. Утвержден ФСТЭК России, 5 февраля 2021 г.

² Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. Утвержден ФСТЭК России, 15 февраля 2008 г.

Пусть Z_i — величина, которая отражает наличие средств защиты субъекта (на вычислительном устройстве) и принимает значение 0 или 1. В различных организациях могут использоваться различные механизмы противодействия угрозам, например, подключение к системам мониторинга Security Operations Center (SOC) или средства обнаружения целевых атак, имеющим в зависимости от контекста и условий применения различную эффективность. Тем не менее, любые средства защиты затрудняют продвижение по сети и осуществление атак в соответствии с тактиками и техниками.

Пусть I_i — величина, которая отражает наличие доступа субъекта в сеть Интернет и приобретает значения 0 и 1. С точки зрения тактик и техник данная характеристика важна, поскольку упрощает доставку инструментария для проведения атак.

Определим характеристики объекта. Пусть L_j — значимость машины с точки зрения продвижения по сети. Возможность использования сервиса для дальнейшего продвижения по сети и атак на другие сервисы должна быть учтена при оценке безопасности сети. Порядок действий при компрометации информационной инфраструктуры формализуем в форме так называемых cyber-killchain (CKC) [10], которые в дальнейшем расширим до полноценной матрицы — ATT&CK, разработанной MITRE. На ее основе определим возможные сценарии использования устройств, поддерживающих следующие сервисы:

- 1) наличие средства удаленного управления (Lateral Movement: Remote Services);
- 2) наличие доступных для машины подсетей (Lateral Movement: Exploitation of Remote Services, Privilege Escalation: Escape to Host);
- 3) наличие машин, управляемых с использованием данной машины (Privilege Escalation: Escape to Host; Lateral Movement: Software Deployment Tools);
- 4) наличие учетной записи с возможностью делегирования (Credential Access: Steal of Forge of Kerberos Tickets; Privilege Escalation: Access Token Manipulation);
- 5) необходимость периодического создания сессии учетной записи с высокими привилегиями (Lateral Movement: Use Alternate Authentication Material);
- 6) наличие сохраненных паролей (Credential Access: Credentials from Password Stores);
- 7) наличие общих хранилищ (Lateral Movement: Taint Shared Content);
- 8) наличие сведений о структуре сети (Discovery).

Поскольку структура сети при ее перестроении может изменяться, параметр значимости L_j вычислим, исходя из наихудшего варианта развития событий. В перспективе данный параметр может быть заменен на число атакующих «трасс» [2, 11], однако для этого требуются более быстрые методы вычисления по сравнению с существующими.

Величина V_j отражает степень критичности активов. Предположим, что это неотрицательное число, полученное путем порядковой оценки критичности активов. Величина W_j принимает значение 0 или 1 и отражает наличие средств защиты объекта. Ее назначение совпадает с аналогичной величиной для субъекта. Величина

G_j отражает источник ПО. Она принимает следующие значения: 1 — собственная разработка, 2 — приложение с открытым кодом, 3 — коммерческое приложение. Величина G_j введена в соответствии с предположением, что приложения собственной разработки в большинстве организаций не проходят процедуру верификации и поиска уязвимостей, тогда как для приложений с открытым исходным кодом осуществляется поиск уязвимостей свободными исследователями. Коммерческое приложение, используемое в организациях, чаще проходит процедуру сертификации, тестируется отделами безопасности, а также исследуется в рамках программ поиска уязвимостей и при тестированиях на проникновение, потому в них менее вероятно наличие критических уязвимостей.

Определим общую критичность пути от субъекта до объекта:

$$C_{ij} = V_j \left(\frac{3 + Y_i}{8} \right) \left(\frac{8 + L_j}{16} \right) \left(1 - \frac{W_j}{2} \right) \left(1 - \frac{Z_i}{2} \right) \times \left(\frac{5 - G_j}{4} \right) \left(\frac{1 + I_i}{2} \right) \quad (1)$$

Формула (1) представляет собой мультипликативный критерий, который формируется за счет умножения отдельных характеристик объекта. Коэффициенты для характеристик выбраны таким образом, чтобы в наиболее благоприятной ситуации соответствующий множитель был равен 0,5, а в наименее благоприятной — 1. Данные значения выбраны, исходя из ограничений модели и решаемой задачи: наиболее благоприятная ситуация не исключает угрозу, однако снижает вероятность ее реализации. Фактически формула (1) подобна формуле вычисления риска [12], в которой вероятность атаки заменена на эквивалентную величину, отражающую возможности потенциального атакующего и степень защищенности объекта.

Получим расчет аддитивного критерия безопасности:

$$R = \sum_{i=1}^{N_O} \sum_{j=1}^{N_S} C_{ij} P_{ij},$$

где N_O и N_S — числа объектов и субъектов.

Метрика с учетом терминального доступа. Рассмотрим подход, при котором в инфраструктуре организации присутствуют терминалы (T_i), которые используются при организации доступа к изолированным сетевым сегментам. При наличии в пути терминалов рассматривается не только исходная машина, но и последний в пути терминал. Все пути могут быть разделены на несколько групп: путь от терминала к объекту, путь от субъекта к терминалу, путь от субъекта к объекту. Для каждого терминала характерно множество пользователей (субъектов), для каждого из которых характерен уровень возможностей $Y_i^{(T)}$. Уровень возможностей терминала может отличаться от уровня возможностей на используемом субъектом устройстве (вследствие наличия средств защиты и мониторинга на границе сети). Аналогично для терминала могут использоваться средства защиты, что определяет величину $Z_i^{(T)}$.

Критичность пути от пользователя терминала к объекту имеет вид:

$$C_{ij} = V_j \left(\frac{3 + Y_i^{(T)}}{8} \right) \left(\frac{8 + L_j^{(T)}}{16} \right) \left(1 - \frac{W_j}{2} \right) \times \left(1 - \frac{Z_i^{(T)}}{2} \right) \left(\frac{5 - G_j}{4} \right) \left(\frac{1 + I_i}{2} \right) \quad (2)$$

Вычислим аддитивный критерий безопасности:

$$R = \sum_{i=1}^{N_O} \sum_{j=1}^{N_S} C_{ij} P_{ij} + \sum_{i=1}^{N_O} \sum_{j=1}^{N_S} \sum_{t=1}^{N_T} P_{it} P_{tj} C_{ij},$$

где N_T — число терминалов.

Достоинствами метрик являются скорость вычисления (параметры для пар могут быть вычислены заранее), возможность оптимизации (функция дифференцируема) и учет структуры сети. При этом присутствует одна (условно) экспертная метрика — критичность.

Основной недостаток метрики — большое число параметров, что усложняет задачу оптимизации.

Анализ предложенных подходов

Перечисленные метрики являются частными случаями обобщенной метрики. Для оценки ее применимости при определении степени защищенности сети продемонстрируем ее достаточность и реакцию на изменение сети.

Синтетический пример. Для оценки реакции на изменение сети рассмотрим варианты сети из 7 узлов с различными конфигурациями и применяемыми мерами защиты (рисунок). Во всех сетях используем идентичные субъекты S и объекты O . Для субъектов и объектов установим следующие характеристики (табл. 1).

В табл. 2 представлены результаты оценки безопасности исследованных сетей.

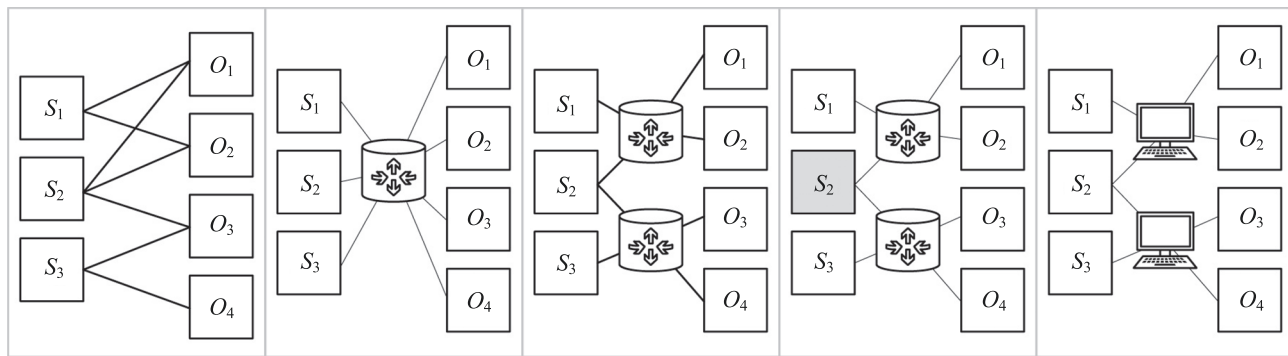


Рисунок. Сопоставляемые сети: эталон (a); связь «все со всеми» (b); сегментация (c); сегментация + мониторинг (d); терминальный доступ (e)

Figure. Comparable networks: optimal (a); connection “all to all” (b); segmentation (c); segmentation + monitoring (d); terminal access (e)

Таблица 1. Характеристики субъектов и объектов

Table 1. Characteristics of subjects and objects

Субъект	Параметры	Объект	Параметры	Терминал	Параметры
S_1	$Y: 1, Z: 0, I: 0$	O_1	$L: 4, V: 1, W: 0, G: 3$	$T_1 (S_1)$	$Y: 1$
S_2	$Y: 2, Z: 0, I: 0$	O_2	$L: 3, V: 2, W: 0, G: 1$	$T_1 (S_2)$	$Y: 1$
S_3	$Y: 3, Z: 0, I: 0$	O_3	$L: 5, V: 3, W: 1, G: 2$	$T_2 (S_2)$	$Y: 2$
$S_2 + SOC$	$Y: 2, Z: 1, I: 0$	O_4	$L: 2, V: 4, W: 1, G: 1$	$T_3 (S_2)$	$Y: 1$

Таблица 2. Метрики безопасности для сопоставляемых сетей

Table 2. Security metrics for compared networks

Сеть	Структура сети	Метрика безопасности
эталон	целевая реализация — каждый пользователь (субъект) имеет доступ только к подмножеству объектов, необходимых для работы	2,082
связь «все со всеми»	плоский вариант — все субъекты имеют сетевой доступ ко всем объектам	3,669
сегментация	сегментация с использованием двух узлов маршрутизации — эквивалентна одному роутеру с правилами разграничения доступа	2,472
сегментация + мониторинг	сегментация с использованием двух узлов маршрутизации — наличие настроенных средств мониторинга на компьютере S2	1,861
терминальный доступ	использование двух терминалов	2,092

Наименьшее значение метрики безопасности достигнуто при использовании терминалов (сеть «терминальный доступ») или мониторинга силами SOC (сеть «сегментация + мониторинг»), что согласуется с установленными во многих организациях правилами работы. При этом снижение количества избыточных связей или увеличение количества мер защиты влечет изменение предложенной метрики. На практике защитные механизмы при осуществлении сегментации могут не учитываться, благодаря чему формула (2) значительно упрощается:

$$C_{ij} = V_j \left(\frac{3 + Y_i}{8} \right) \left(\frac{8 + L_j}{16} \right).$$

Сопоставление с аналогами. До настоящего времени наборы данных для сегментации сети не были собраны (за редким исключением¹). Для оценки достаточности предложенной метрики допустимо рассмотреть ее согласованность с ранее предложенными подходами к анализу безопасности сетей. Во многих случаях прямое сопоставление результатов не представляется возможным, поскольку во многих работах: исходная информация — граф атак, а не сетевая топология; в качестве исходных данных используется перечень устаревшего ПО, а план мероприятий сводится к его обновлению (в результате сетевая топология фактически не изменяется); используются неприменимые к предлагаемой параметры, например, сложность атаки или исходная квалификация злоумышленника.

В работе [2] рассмотрен подход, основанный на качественных метриках защищенности. Предложенный в [6] метод нацелен на приоритезацию устранения уязвимостей. При этом учитывается не только критичность, но и требуемые на внедрение средства. В [13, 14] анализ безопасности осуществляется как для сетевой топологии, так и для ее поведения в условиях различных атак. В соответствии с предложенной метрикой была рассчитана величина метрики при устранении одной из связей. Рассмотрим результаты данных подходов в сопоставлении с метрикой, разработанной в настоящей работе (табл. 3).

¹ Dataset for research on services and users grouping [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/Shtrikh17/datasets>, свободный, (дата обращения: 27.05.2022).

Таким образом, созданная метрика реагирует на изменения топологии сети, согласуется с результатами, полученными в других работах, и отражает повышение защищенности при уменьшении поверхности атаки. В сравнении с аналогами она включает в себя меньше параметров и может быть оптимизирована. Отметим, что метрика не учитывает реакцию на защиту от конкретных типов атак (например, перебора паролей ssh), поэтому для точной оценки рисков должны применяться другие метрики, например, рассмотренные в разделе «Предлагаемые метрики».

Метод группировки субъектов и объектов

Рассмотрим работу метрики для рассмотренного в [15] метода группировки субъектов и объектов. Одним из его применений может быть сегментация: все рабочие станции и серверные приложения разделяются на подсети, между которыми разграничивается доступ. Тогда снижается количество рассматриваемых сущностей.

Для рассмотренного в разделе «Анализ предложенных подходов» набора данных реальной организации создана матрица доступа «субъекты-объекты». В соответствии с этими данными осуществлен расчет метрики защищенности для эталонной (рисунок, а), плоской (рисунок, б) и сегментированной (рисунок, в) сетей. При этом в качестве параметров субъектов (объектов) рассмотрены максимальные параметры для каждого субъекта (объекта) в выделенной группе. В результате получены следующие значения метрики для сетей: исходной — 2545,913; идеальной — 629,276 и сегментированной — 1670,479.

Следовательно, предложенный в [15] метод может быть использован для первичной сегментации сети. Дальнейшее повышение безопасности сетевого взаимодействия должно осуществляться с использованием правил межсетевого экранирования.

Обсуждение результатов

Достоинствами предложенной метрики можно считать.

1. Предположение о гарантированном наличии уязвимостей в ПО. При формировании метрики не делается предположений о вероятности их наличия.

Таблица 3. Сравнение результатов аналогичных подходов и предложенной метрики

Table 3. Comparison of the results of similar approaches and the proposed metric

Ссылка на аналогичную работу	Аналогичные подходы		Предложенная метрика
	Принцип сети	Используемая метрика	
[2] (качественная величина)	Пример 1	SecurityLevel=Red	3,996
	Пример 2	SecurityLevel=Yellow	3,586
[6] (больше — лучше)	До внедрения защитных мер	622	2,857
	После внедрения защитных мер	2571,9	2,174
[14] (меньше — лучше)	Сеть до запрета соединения с частью узлов	5,637	0,531
	Сеть после запрета соединения с частью узлов	4,581	0,350

2. Использование в качестве входных данных простых величин, выраженных в порядковых шкалах. Построение исчерпывающего графа атак представляется крайне трудоемкой задачей по аудиту, которую практически невозможно провести в кратчайшие сроки.
3. Использование тактик и техник, выделенных в MITRE ATT&CK. В результате повышается скорость вычисления характеристики, снижается сложность ее оценки, а также учитывается возможность использования устройства в качестве промежуточного звена атаки.
4. Возможность оптимизации и скорость вычисления. Однако у метрики есть несколько недостатков, которые необходимо учитывать при ее выборе для анализа безопасности сети.
 1. В отличие от альтернативных подходов данная метрика не учитывает возможность проведения цепочек атак, когда скомпрометированные машины используются в качестве промежуточных звеньев при атаке на другие элементы инфраструктуры.
 2. В отличие от данной метрики многие альтернативные метрики позволяют построить цепочку мероприятий, направленных на снижение рисков.
 Первый недостаток может быть устранен, если рассмотреть объекты одновременно в качестве субъектов. Однако при этом необходимо дополнительно решить проблему циклов в полученном графе. Кроме того, в перспективе цепочки атак могут использовать-

ся в качестве замены для параметра значимости узла при продвижении по сети. Второй недостаток может быть скорректирован за счет применения других метрик, заимствующих механизмы в аналогичных работах.

Заключение

В работе предложена метрика оценки защищенности сетевой инфраструктуры от потенциальных атак. Она может быть использована в качестве основы для критерия безопасности при построении (перестроении) сетевой инфраструктуры. Оценка данной метрики показывает ее чувствительность к изменению параметров, а также демонстрирует согласованность с результатами, полученными другими исследователями. Выполнено сопоставление с существующими аналогами, предназначенными для оценки защищенности сети. В качестве примера использования данного критерия рассмотрен подход к сегментации на основе группировки субъектов и объектов сетевого доступа [15].

Целью дальнейших исследований является модификация метрики для учета цепочек атак, а также ее практическое применение для перестроения сетевой инфраструктуры с использованием теории графов и методов оптимизации. При этом возможно ее дальнейшее расширение для учета более сложных атак, зависящих от сетевой топологии, но на данный момент не использованных при построении метрики.

Литература

1. Li G., Fu Y., Hao W. Quantifiable network security measurement: A study based on an index system // *Lecture Notes in Computer Science*. 2019. V. 11806. P. 47–62. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30619-9_5
2. Котенко И.В., Степашкин М.В., Богданов В.С. Оценка безопасности компьютерных сетей на основе графов атак и качественных метрик защищенности // *Труды СПИИРАН*. 2006. Т. 2. N 3. С. 30–49. <https://doi.org/10.15622/sp.3.2>
3. Дойникова Е.В., Чечулин А.А., Котенко И.В. Оценка защищенности компьютерных сетей на основе метрик CVSS // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 6(91). С. 76–87. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.6.76>
4. Шинкаренко А.Ф. Методика оценивания защищенности информационно-телекоммуникационных узлов // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2016. № 1(5). С. 16–19 [Электронный ресурс]. URL: http://itt-pgups.ru/index.php/itt_pgups/article/view/3322, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 12.06.2022).
5. Дойникова Е.В., Котенко И.В. Методики и программный компонент оценки рисков на основе графов атак для систем управления информацией и событиями безопасности // *Информационно-управляющие системы*. 2016. № 5(84). С. 54–65. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2016.5.54>
6. Poolsappasit N., Dewri R., Ray I. Dynamic security risk management using bayesian attack graphs // *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. 2012. V. 9. N 1. P. 61–74. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2011.34>
7. Dantu R., Kolan P. Risk management using behavior based bayesian networks // *Lecture Notes in Computer Science*. 2005. V. 3495. P. 115–126. https://doi.org/10.1007/11427995_10
8. Котенко И.В., Дойникова Е.В. Методика выбора контрмер в системах управления информацией и событиями безопасности // *Информационно-управляющие системы*. 2015. № 3(76). С. 60–69. <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.3.60>

References

1. Li G., Fu Y., Hao W. Quantifiable network security measurement: A study based on an index system. *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol. 11806, pp. 47–62. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30619-9_5
2. Kotenko I.V., Stepashkin M.V., Bogdanov V.S. Evaluating security of computer networks based on attack graphs and qualitative security metrics. *SPIIRAS Proceedings*, 2006, vol. 2, no. 3, pp. 30–49. (in Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.3.2>
3. Doynikova E.V., Chechulin A.A., Kotenko I.V. Computer network security evaluation based on CVSS metrics. *Information and Control Systems*, 2017, no. 6(91), pp. 76–87. (in Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.6.76>
4. Shinkarenko A.F. The method of estimation of the security of information and telecommunication. *Intellectual Technologies on Transport*, 2016, no. 1(5), pp. 16–20. Available at: http://itt-pgups.ru/index.php/itt_pgups/article/view/3322 (accessed: 12.06.2022). (in Russian)
5. Doynikova E.V., Kotenko I.V. Techniques and software tool for risk assessment on the base of attack graphs in information and security event management systems. *Information and Control Systems*, 2016, no. 5(84), pp. 54–65. (in Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2016.5.54>
6. Poolsappasit N., Dewri R., Ray I. Dynamic security risk management using bayesian attack graphs. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 61–74. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2011.34>
7. Dantu R., Kolan P. Risk management using behavior based bayesian networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, vol. 3495, pp. 115–126. https://doi.org/10.1007/11427995_10
8. Kotenko I.V., Doynikova E.V. Countermeasure selection in security management systems. *Information and Control Systems*, 2015, № 3(76), pp. 60–69. (in Russian). <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.3.60>

9. Wing J.M. Scenario graphs applied to network security // *Information Assurance*. Elsevier, 2008. P. 247–277. <https://doi.org/10.1016/B978-012373566-9.50011-2>
10. Mihai I., Prună S., Barbu I.-D. Cyber kill chain analysis // *International Journal of Information Security and Cybercrime*. 2014. V. 3. N 2. P. 37–42. <https://doi.org/10.19107/IJISC.2014.02.04>
11. Lin W., Yang C., Zhang Z., Xue X., Haga R. A quantitative assessment method of network information security vulnerability detection risk based on the meta feature system of network security data // *KSII Transactions on Internet and Information Systems*. 2021. V. 15. N 12. P. 4531–4544. <https://doi.org/10.3837/tiis.2021.12.015>
12. Крылова Ю.В. Оценка рисков и угроз информационной безопасности в организации // МСФО в современной экономике России: модели, схемы и способы практической реализации: материалы Международной студенческой научно-практической конференции. М., 2019. С. 142–146.
13. Zhao X., Pei M., Wu M., Liang Y., Peng H. A method of network security risk measurement based on improved D-S evidence theory // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1626. P. 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1626/1/012035>
14. Zhao X., Zhang Y., Xue J., Shan C., Liu Z. Research on network risk evaluation method based on a differential manifold // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 66315–66326. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985547>
15. Bondareva A., Shilov I. Method of grouping subjects and objects in information systems // *Proc. of the 30th Conference of Open Innovations Association FRUCT*. 2021. P. 10–15. <https://doi.org/10.23919/FRUCT53335.2021.9599989>

Автор

Шилова Анастасия Дмитриевна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7271-8343>, bondareva.ad@yandex.ru

Author

Anastasia D. Shilova — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7271-8343>, bondareva.ad@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10.10.2022
Одобрена после рецензирования 13.02.2023
Принята к печати 16.05.2023

Received 10.10.2022
Approved after reviewing 13.02.2023
Accepted 16.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-538-546

A novel approach to feature collection for anomaly detection in Kubernetes environment and agent for metrics collection from Kubernetes nodes

Ghadeer Darwesh¹, Jaafar Hammoud², Alisa A. Vorobeve³✉

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ ghadeerdarwesh32@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1116-9410>

² hammoudgj@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2033-0838>

³ alice_w@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6691-6167>

Abstract

Kubernetes is a widely adopted open-source platform for managing containerized workloads and deploying applications in a microservices architecture. Despite its popularity, Kubernetes has faced numerous security challenges; deployments using Kubernetes are vulnerable to security risks. The current solutions for detecting anomalous behavior within a Kubernetes cluster lack real-time detection capabilities allowing hackers to exploit vulnerabilities and cause damage to production assets. This study aims to address these security concerns by proposing a new approach and novel agent to feature collection for anomaly detection in Kubernetes environment. It is proposed to use metrics (related to disk usage, CPU and network) collected by node exporter (Prometheus) directly from Kubernetes nodes. The simulation was conducted in a real-world production Kubernetes environment hosted on the Microsoft Azure, with results indicating the agent success in collecting 24 security metrics in a short amount of time. These metrics can be used to create a labeled time-series dataset of anomalies produced by microservices, enabling real-time detection of attacks based on the behavior of compromised nodes within the Kubernetes cluster. The proposed approach and developed agent for monitoring can be used to generate datasets for training anomaly detection models in the Kubernetes environment, based on artificial intelligence technologies, in real-time mode. The obtained results will be useful for researchers and specialists in the field of Kubernetes cybersecurity.

Keywords

Kubernetes, security, Kubernetes monitoring, attack detection, anomalies detection

For citation: Darwesh G., Hammoud J., Vorobeve A.A. A novel approach to feature collection for anomaly detection in Kubernetes environment and agent for metrics collection from Kubernetes nodes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 538–546. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-538-546

УДК 004.056

Новый способ сбора данных для обнаружения аномального поведения в среде Kubernetes и агент для сбора метрик с узлов

Гадир Дарвиш¹, Жаафар Хаммуд², Алиса Андреевна Воробьева³✉

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ ghadeerdarwesh32@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1116-9410>

² hammoudgj@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2033-0838>

³ alice_w@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6691-6167>

Аннотация

Введение. Kubernetes — широко используемая платформа с открытым исходным кодом для управления контейнеризованными нагрузками и развертывания приложений в микросервисной архитектуре. Несмотря на популярность, платформа Kubernetes имеет многочисленные проблемы, связанные с безопасностью. Существующие решения для обнаружения аномального поведения в среде Kubernetes не позволяют детектировать аномальную активность, связанную с атаками злоумышленников, в режиме реального времени. **Метод.** Представлен новый способ сбора характеристик с узлов платформы Kubernetes для обнаружения

© Darwesh G., Hammoud J., Vorobeve A.A., 2023

аномалий. Предложен новый агент мониторинга с собственными экстракторами и настраиваемыми правилами, которые собирают важные метрики с узлов реальной системы Kubernetes и экспортируют их в центральный набор данных. Применены метрики (связанные с использованием диска, процессора и сети), полученные от экспортеров Prometheus. **Основные результаты.** Выполнена симуляция в реальной среде Kubernetes на облачной платформе Microsoft Azure. Полученные результаты показали, что предложенный агент успешно собрал 24 метрики в централизованную базу данных за короткое время. Отобранные метрики могут быть использованы для создания размеченного набора данных временных рядов с аномалиями, создаваемыми микросервисом. Данное решение позволит обнаруживать атаки в реальном времени в среде Kubernetes на основе поведения скомпрометированных узлов в ее кластере. **Обсуждение.** Предложенный способ и разработанный агент мониторинга могут быть применены для формирования наборов данных для обучения моделей детектирования аномалий в среде Kubernetes, основанных на технологиях искусственного интеллекта, в режиме реального времени. Полученные результаты будут полезны исследователям и специалистам в области кибербезопасности приложения Kubernetes.

Ключевые слова

Kubernetes, безопасность, мониторинг Kubernetes, обнаружение атак, выявление аномалий

Ссылка для цитирования: Дарвиш Г., Хаммуд Ж., Воробьева А.А. Новый способ сбора данных для обнаружения аномального поведения в среде Kubernetes и агент для сбора метрик с узлов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 538–546 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-538-546

Introduction

The popularity of containerization technology has increased in recent years, with developers adopting it to address various real-world challenges, such as optimizing fetched, virtual machines auto-scaling, stack adjusting, performance misfortune issues, and various others [1]. Kubernetes has emerged as a popular platform for managing containerized workloads and deploying applications in a microservices architecture. However, Kubernetes deployments are vulnerable to security risks and existing solutions for detecting anomalous behavior within the system lack real-time detection capabilities.

In this study, we present a new monitoring agent for the Kubernetes system that collects important security and performance metrics from nodes in real-time. The agent features custom extractors and rules to ensure the collection of relevant security metrics, and exports them to a centralized database. The collected dataset will be used in future research to develop a machine learning module for anomaly detection.

The study begins with a background section that clarifies the significance of the proposed work. This section covers several topics including the current state of monitoring solutions in Kubernetes, the importance of the node exporter project, and the security challenges within the system. The study also includes a discussion of recent security challenges and threats in the Kubernetes environment to provide context for the proposed work and explain why it is necessary to address these security issues. The next section highlights the recent security challenges and threats in the Kubernetes environment. Finally, we describe the main contribution of this work, the new monitoring service that we have developed, and its ability to collect security metrics and export them to a central database provisioned as a Postgres deployment in the Kubernetes system.

Background

Kubernetes is a widely adopted open-source platform for the orchestration of containerized services across a

dispersed cluster of nodes. It offers a robust infrastructure with the capability for zero-downtime deployment, scaling, automatic rollback, self-healing, load balancing, and service discovery [2]. This platform is utilized for the deployment, management, scaling, and composition of application containers over a cluster of hosts.

At a high level, a Kubernetes environment consists of a control plane (master), a distributed storage system for maintaining the stability of the cluster state (etcd), and multiple cluster nodes (Kubelets)¹. Fig. 1 describes the Kubernetes architecture overview.

The control plane is comprised of various components to manage object states, including the Kube-apiserver which implements a RESTful interface to interact with libraries and tools for cluster administration, the Kube-controller-manager which maintains the state of the cluster, and the Kube-scheduler which plans and schedules workloads across nodes in the cluster [3].

Cluster nodes are machines managed by the master nodes and are equipped with the Kubelet and Kube-proxy components on top of Docker.

The fundamental Kubernetes objects are¹:

- The Services used to characterize policies and logical set of Pods accessed by these policies.
- Volume is a directory accessible to all containers running inside the Pod.
- The pod is the smallest execution unit in the Kubernetes environment. It presents a single application that can consist of multiple storage volumes and containers. There are different sorts of pods [4]:
 - ReplicaSet, the default, is a simple type relatively. It guarantees the required number of pods are running.
 - Deployment is an explanatory way of managing pods through ReplicaSets. Incorporates rollback and rolling update mechanisms.
 - Daemonset guarantees that each node will run an instance of a pod. Utilized for cluster services like log forwarding and monitoring.

¹ Kubernetes Documentation | Kubernetes. Available at: <https://kubernetes.io/docs/home/> (accessed: 31.08.2022).

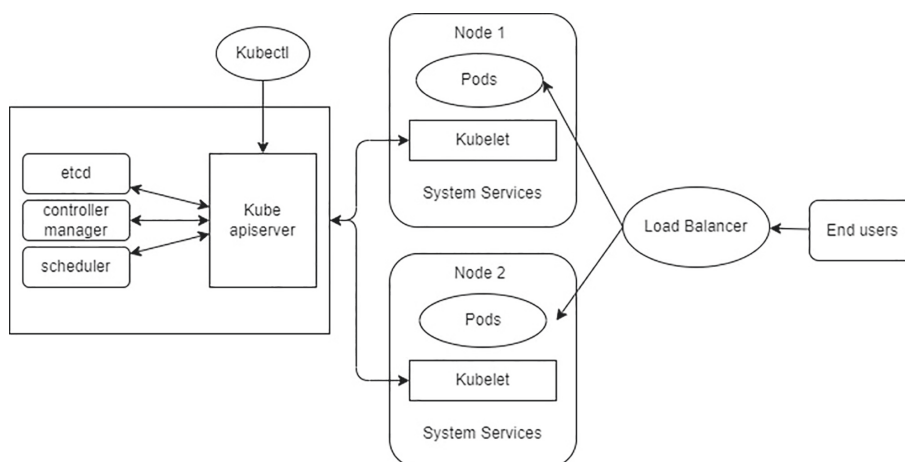


Fig. 1. Kubernetes Architecture Overview

- StatefulSet is custom fitted to managing pods that must hold on or maintain state.
- CronJob and Job run short-lived jobs as a one-off or on a schedule.

Kubernetes Monitoring

The application of containerization in a Kubernetes environment presents a unique challenge for monitoring. Monitoring the performance and resolving issues in a system that consists of hundreds of microservices deployed across thousands, or even millions, of ephemeral containers, requires a robust approach.

Kubernetes is a highly decentralized system comprised of various nested components. Monitoring in a Kubernetes environment involves monitoring the application and hosts as well as the containers and clusters. Additionally, the use of automated scheduling in Kubernetes introduces an additional layer of complexity, as the workloads and resources are managed optimally and dynamically, making it difficult to determine the identity or number of nodes running on the pods. To address this, a robust tagging system can be employed alongside logging to collect information from the clusters, which can then be exposed to an endpoint for a service to collect and analyze the metrics.

A comprehensive monitoring solution for Kubernetes must meet certain critical requirements, including:

- monitoring of all layers of the technology stack, including the host infrastructure on which Kubernetes runs, core components, pods, nodes, and containers within the cluster as well as all applications and services running in Kubernetes containers;
- dynamic identification and monitoring of services as they arise;
- providing a means of connecting relevant information for grouping and analysis of related logs, metrics, and other observability data.

In the Kubernetes environment, the provision of all required tools for monitoring resources, such as the collection of metrics from nodes within the cluster, is not natively supported. To address this requirement, the use of an external node-exporter service is proposed. We used the Prometheus Exporter designed specifically for collecting

metrics and monitoring the host system. It is a widely used service for exposing hardware and operating system metrics from *NIX-based Bits¹, and can also be used for tagging and exporting metrics in the Kubernetes environment.

As depicted in Fig. 2, the Node Exporter component is integrated into the Prometheus Operator which is responsible for the Kubernetes-native deployment and management of Prometheus and related monitoring components. The Node Exporter operates as an agent on each node within the cluster which may also host the Kubernetes cluster. Its function is to gather monitoring data, such as memory usage, CPU utilization, disk space, inodes, and network statistics, from each node and forward it to the Prometheus server². The Prometheus server stores this data as time-series data in the form of (timestamp, metric) pairs which can then be visualized using tools such as Grafana.

Kubernetes security

The deployment of Kubernetes can be performed in various settings, including on-premises, on bare metal, and within public clouds (either by creating a custom Kubernetes construct on virtual machines or by utilizing a managed service). Kubernetes was designed to be highly portable enabling users to effectively switch between these environments and move their workloads.

This high level of customization in Kubernetes makes it adaptable to a wide range of scenarios; however, it also represents a significant weakness in terms of security [5]. Kubernetes is designed to be highly customizable and requires users to enable specific functionalities to secure their cluster. This means that the engineers responsible for deploying the Kubernetes platform must have an in-depth understanding of all potential attack vectors and vulnerabilities that can result from inadequate configuration.

¹ GitHub — prometheus/node_exporter: Exporter for machine metrics. Available at: https://github.com/prometheus/node_exporter (accessed: 10.04.2023).

² Getting started | Prometheus. Available at: https://prometheus.io/docs/prometheus/latest/getting_started/ (accessed: 10.04.2023).

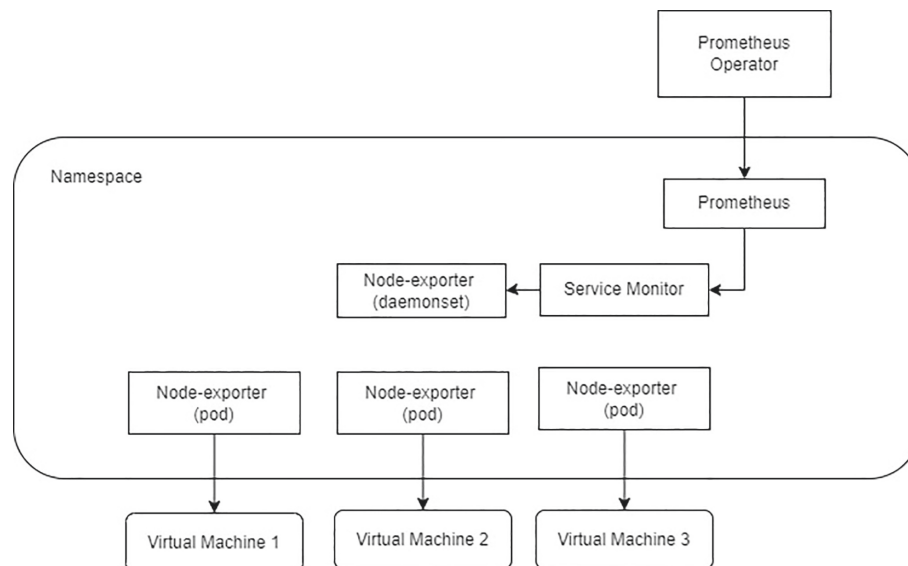


Fig. 2. Prometheus Node Exporter

Tesla Inc. experienced a security breach as a result of the absence of password protection on their Kubernetes administrative console. In a separate incident, Capital One's inadequate AWS firewall definitions led to the exposure of 30 GB of credit application data affecting 106 million customers. These events highlight the significance of placing security as a top priority alongside the deployment of Kubernetes. There are numerous threats to Kubernetes workloads including the potential for attackers to gain control of the entire cluster by breaching the control plane. Additionally, attackers can compromise individual pods or the physical host running Kubernetes pods as well as any unsecured open connections to the public making network connections a possible entry point. Finally, containers are vulnerable to threats due to misconfigurations or backdoors in the container image, which can allow attacker's access to the physical host.

In [3] researchers described the most important Kubernetes security best practices that were reported by practitioners including:

- authorization and authentication to verify API requests, enforce non-root user access only, and disable anonymous login;
- adoption of network security policies and pod policies to regulate (restrict) traffic and ensure contextual security of pods within the cluster;
- keeping the version up-to-date and applying the latest security patches;
- access restriction and implementation of encryption techniques to secure sensitive data stored in etcd;
- implementation of resource requests and limitations;
- enabling SSL/TLS support and creating separate namespaces.

Related work

In the study conducted by Yu et al. [6], the focus was on the investigation of security concerns related to service communications in microservice-enabled fog applications. A comprehensive literature search was conducted with a

specific focus on the security of microservice architecture. As a result of the literature search, 66 important papers were identified and analyzed accordingly. The authors centered their analysis on four major categories of security issues in microservice communication: data issues, container issues, network issues, and authorization issues.

One important aspect of Kubernetes security monitoring is the detection of anomalous behavior in the cluster. The existing approaches fall into three categories: log-based anomaly detection, virtual network monitoring, and container security measures.

Several studies have focused on log-based anomaly detection using methods such as source code analysis and information retrieval to create composite features for automatically detecting runtime problems in the system [7] Other studies have investigated the use of log message grouping and counting as well as the inherent linear characteristics of normal program workflows, to detect anomalies in logs. However, these methods are limited in their ability to detect anomalies caused by external attacks, such as web service attacks and Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) attacks.

Another area of focus in Kubernetes security monitoring is the monitoring of the virtual network. Researchers have explored the use of network flow analysis, intrusion detection systems [8], and network segmentation to enhance the security of container-based networks [9]. These studies are limited to detecting anomalies at the network layer and do not account for the fact that malicious behavior can be disguised as normal login and installation activities.

In recent studies, researchers have introduced anomaly-based detection mechanisms to address security concerns in container environments. Various machine learning technics are used to analyze real-time performance data [6], including CPU utilization, memory utilization, and network metrics, disk read/write rate, network receive/transmit rate, and container management information to detect the anomaly in containers. These characteristics do not differ significantly if the system is in a normal state and during a cyberattack.

In [10], KubAnomaly is proposed, a system that provides security monitoring capabilities for anomaly detection on the Kubernetes orchestration platform. Authors have designed a container monitoring module for Kubernetes and applied neural network techniques to construct classification models that enhance its capability of detecting abnormal behaviors. The described agent service collects only events from monitor logs from Docker-based containers with Sysdig and Falco. Sysdig is a diverse and complex system offering complete monitoring suite including visualization and alerting. It might be used for the metrics collection, but there are more light-weighted tools that suits that task more, like Prometheus.

The security of containers is an important topic of discussion. As highlighted in the SANS12 report, several tools have been developed to enhance container security. For instance, AppArmor is a policy-based Linux kernel security module that allows system administrators to restrict process capabilities, such as network access and file read/write permissions, by using security profiles.

A monitoring system that leverages Kubernetes for dynamic resource provisioning in cloud environments was presented by Chang et al. [11]. Furthermore, Shah and Dubaria [12] compared the management features of Swarm, Docker, Kubernetes, and Google Cloud Platform, and noted that Kubernetes provides features, such as deployment, monitoring, and ease of scalability.

In the study conducted by Sultan et al. [1], a comprehensive review of the literature related to container security was performed. The authors presented the threats for four utilized cases of securing containers and elaborate on security threats and solutions to each security risk concerning each use case. The use cases outlined were securing containers from applications, protecting containers from each other and host, and finally, protecting the host from containers.

Muralidharan et al. [13] introduced a Kubernetes-based system for monitoring and managing the Internet of Things (IoT) in smart cities. In [14], Burns et al. documented the development of container management frameworks at Google and described the evolution of two internal systems, Brog and Omega, into Kubernetes.

Approach to feature collection for anomaly detection in Kubernetes environment and novel agent for metrics collection from Kubernetes nodes

In this section, we present our implemented system for monitoring and collecting metrics directly from nodes (and not from logs) operating within the Kubernetes environment.

Our system addresses the design challenges associated with the collection and export of data from nodes for use in anomaly classification models. Our novel agent service has been tailored for Kubernetes allowing for easy deployment within the Kubernetes environment. The agent service must be installed on every node in order to collect metrics for the entire cluster, which are then transmitted as time series data to a central database (DB) for easy analysis and processing.

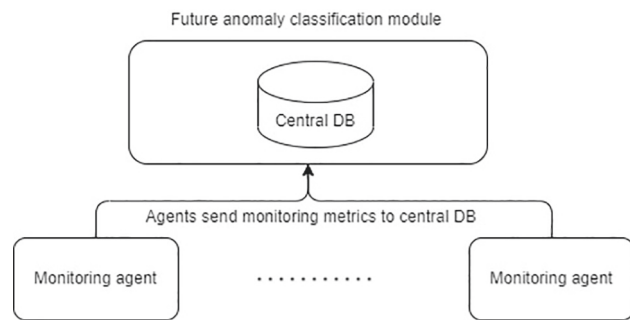


Fig. 3. Architecture of the system with proposed new monitoring agent in the Kubernetes environment for security purposes

Novel agent service for metrics collection from Kubernetes nodes

In our study, we have designed a novel agent service within the Kubernetes environment for collecting monitoring metrics from the nodes¹. Fig. 3 presents the architecture of the proposed system. The objective of this deployment is to understand the behavior of all nodes, which is achieved through the deployment of the agent as a pod on every node within the cluster. To reduce the development workload, the docker image is based on the node-exporter service which is specifically designed for the collection of metrics and monitoring of the host system. Our agent utilizes the features of the node-exporter service to gather data and process it into a useful format for further analysis.

The new agent deployment consists of two Kubernetes components: the exporter service which accesses the exporter API to understand the metrics and data to be collected, and the Daemonset which is a Kubernetes workload that ensures the provisioning of the agent pods on each node in the cluster.

The agent also requires a prepared Postgres database to connect to and export our data. The number of records and the interval at which they are to be recorded are specified as environment variables in the agent's deployment definition and made available to the pods within the deployment. These variables are utilized by the agent to determine its operational behavior and tasks.

The selection of metrics from nodes is a challenge in the implementation of our system. An excessive collection of metrics would cause an overload on the nodes and negatively impact performance. To address this challenge, we have selected the most relevant and useful metrics for our security-related analysis. This approach not only captures the behavior of the nodes but also ensures optimal performance.

Feature collection for anomaly detection in Kubernetes environment

Our agent exports metrics to the Postgres database. The collected metrics are arguments we pass to the deployment

¹ ghadeerda/Kubernetes-monitoring-agent. Available at: <https://github.com/ghadeerda/Kubernetes-monitoring-agent/tree/main> (accessed: 10.04.2023).

Table 1. The proposed metrics and the feature set to construct anomaly detection model

Collected features (metric name)	Description
cpu_sec_idle	Seconds the CPUs spent in idle mode
disk_av_per	Filesystem space available percent to non-root users
disk_read	The total number of bytes read successfully
disk_write	The total number of bytes written successfully
net_receive	Network device statistic receive bytes
mem_pressure	/proc/vmstat information field pgmajfault
mem_av_per	Memory space available percent
forks_total	The total number of forks
intr	The total number of interrupts serviced
load1	1 minute load average
Load5	5 minutes load average
Load15	15 minutes load average
receive_drop	Network device statistic received and dropped
receive_errs	Network device statistic received with errors
transmit_packets	Network device statistic transmitted packets
tcp_sock_alloc	The number of TCP (Transmission Control Protocol) sockets in state “allocate”
tcp_sock_inuse	The number of TCP sockets in state “in use”
tcp_sock_mem	The number of TCP sockets in state “memory”
udp_sock_inuse	The number of UDP (User Datagram Protocol) sockets in state “in use”
udp_sock_mem	The number of UDP sockets in state “memory”
ipv4_sock_inuse	The number of IPv4 sockets “in use”
est_conn	TCP connections in the state “established”
lis_conn	TCP connections in the state “listen”
open_fds	The number of open file descriptors

of pods. It includes current events listed in the Table 1, that includes the collected feature to construct anomaly classification model.

The agent service scrapes the metrics listed in the table above and exports them to the central database at an interval of 10 seconds; the interval is an environment variable that is exported to the pods. This interval was chosen to strike a balance between monitoring accuracy and performance efficiency. Based on research conducted by Akamai [10], approximately 900 attacks can occur within a 10-second time frame. Thus, a 10-second collection duration was deemed appropriate for our purposes. The collected metrics from central database are then utilized to develop a classification model for detecting anomalies in container behavior. This enables us to monitor the behavior of containers and gather monitoring metrics effectively.

The central database is structured to include a separate table for each node, wherein each record comprises of a time-series value and an attack indicator. This attack indicator column is intended to be utilized in future for the purpose of identifying attack records for machine learning modules.

Testing environment

The testing of our monitoring agent was performed in a real Kubernetes environment hosted on Microsoft Azure cloud using Azure Kubernetes Service (AKS). The cluster

consisted of two nodes and a public load balancer with a default security group, and utilized Kubernetes version 1.22.

The docker image was built using prom/node-exporter: v1.4.0 as builder layer and pushed the new image to our container registry in Azure cloud. For the agent deployment we specify 0.5 CPU and 1G RAM, and its service was exposed on port 9100 for testing.

The result of our experiment is stored in Postgres: 14-alpine database which is running in the AKS and had an Azure Disk (5G) attached to it to store our data. To test the metrics obtained from nodes under different conditions, a new pod was deployed with the “stress” utility to subject the deployment to maximum usage over a prolonged period of time. This CPU load test was designed to push the processing power to its limits and generate different data values based on the stress load.

Results

Upon executing our agent on various nodes, we have observed the creation of a table (Table 2) in our database for each node, which displays the collected metrics accurately indicating the status of each node before and after the stress load test was conducted. Our defined metrics were collected successfully and are presented in a manner that will facilitate the development of future machine learning modules.

Table 2. Example of records in the resulting table in central database, collected metrics for one node with an interval of 10 seconds

id	date	time	cpu_sec_idle	disk_av_per	disk_read $\times 10^8$	disk_write $\times 10^9$	net_receive	mem_pressure	mem_av_per
1	2023-02-12	12:33:32	754.765	80.5205	6.66	6.75	3,461	4474	83.9407
2	2023-02-12	12:33:42	762.78	80.5205	6.66	6.75	5,428	4474	83.8183
3	2023-02-12	12:33:52	771.51	80.5205	6.66	6.75	6,913	4474	83.7209
4	2023-02-12	12:34:02	780.2	80.5205	6.66	6.75	8,398	4474	83.6702
5	2023-02-12	12:34:12	788.77	80.5205	6.66	6.75	9,883	4474	83.7633
6	2023-02-12	12:34:22	797.555	80.5205	6.66	6.75	11,368	4474	83.6889
7	2023-02-12	12:34:32	806.21	80.5204	6.66	6.75	12,895	4474	83.83
8	2023-02-12	12:34:42	814.2	80.5202	6.66	6.76	14,880	4474	83.537
9	2023-02-12	12:34:52	822.91	80.5203	6.66	6.76	16,435	4474	83.5568
10	2023-02-12	12:35:02	831.535	80.5203	6.66	6.76	17,920	4474	83.5106
11	2023-02-12	12:35:12	839.535	80.5203	6.66	6.76	19,475	4474	83.6359
12	2023-02-12	12:35:22	848.29	80.5203	6.66	6.76	21,002	4474	83.5364
13	2023-02-12	12:35:32	856.925	80.5202	6.66	6.76	22,487	4474	83.5117
14	2023-02-12	12:35:42	865.21	80.5202	6.66	6.76	24,042	4474	83.5375
15	2023-02-12	12:35:52	873.925	80.5202	6.66	6.76	25,527	4474	83.5383

The collected metrics are separated by periods of time considering the env variable (INTERVAL) we defined in the deployment.

After we apply z-score normalization to understand the probability of a score occurring within the distribution of the data, z-score is calculated by dividing the difference between the observed value and the sample mean by the sample standard deviation. Results are shown in the Table 3.

If z-score is close to zero it means that the data point is close to the average, a positive z-score means that the data point is above average, and a negative means the data point is below average.

Z-score data then could be used to build anomalies detection model. A data point can be considered anomaly or unusual if its z-score is above threshold values. The optimal threshold should be investigated. If z-score variance is close to the normal distribution, recommended optimal threshold is between -2.0 and $+2.0$. Otherwise in the case of z-score variance is more than 1.0 , using ordinary threshold cannot point out anomaly.

Conclusion and future work

Kubernetes has emerged as the most widely adopted orchestration platform for Docker containers, and

Table 3. Part of dataset after z-score normalization

id	date	time	cpu_sec_idle	disk_av_per	disk_read	disk_write	net_receive	mem_pressure	mem_av_per
1	2023-12-02	12:33:32	-1.76304	0.63778	-0.70363	-0.63980	-1.73033	-0.70616	0.64287
2	2023-12-02	12:33:42	-1.74976	0.63778	-0.70363	-0.63970	-1.71260	-0.70616	0.60106
3	2023-12-02	12:33:52	-1.73529	0.63778	-0.70363	-0.63959	-1.69922	-0.70616	0.56779
4	2023-12-02	12:34:02	-1.72089	0.63778	-0.70363	-0.63938	-1.68583	-0.70616	0.55048
5	2023-12-02	12:34:12	-1.70670	0.63778	-0.70363	-0.63931	-1.67244	-0.70616	0.58228
6	2023-12-02	12:34:22	-1.69214	0.63778	-0.70363	-0.63925	-1.65906	-0.70616	0.55686
7	2023-12-02	12:34:32	-1.67780	0.63775	-0.70363	-0.63918	-1.64529	-0.70616	0.60506
8	2023-12-02	12:34:42	-1.66456	0.63768	-0.70363	-0.63862	-1.62740	-0.70616	0.50498
9	2023-12-02	12:34:52	-1.65013	0.63772	-0.70363	-0.63856	-1.61338	-0.70616	0.51174
10	2023-12-02	12:35:02	-1.63584	0.63772	-0.70363	-0.63844	-1.59999	-0.70616	0.49596
11	2023-12-02	12:35:12	-1.62259	0.63772	-0.70363	-0.63833	-1.58597	-0.70616	0.53876
12	2023-12-02	12:35:22	-1.60808	0.63772	-0.70363	-0.63810	-1.57221	-0.70616	0.50478
13	2023-12-02	12:35:32	-1.59377	0.63768	-0.70363	-0.63792	-1.55882	-0.70616	0.49634
14	2023-12-02	12:35:42	-1.58005	0.63768	-0.70363	-0.63782	-1.54481	-0.70616	0.50515
15	2023-12-02	12:33:32	-1.76304	0.63778	-0.70363	-0.63980	-1.73033	-0.70616	0.64287

is extensively utilized for application deployment and microservice creation. With advancements in containerization technology, information technology organizations are leveraging Kubernetes for managing their systems and reporting benefits during the deployment process.

However, security concerns have been raised in the Kubernetes environment as potential vulnerabilities can be exploited by hackers to cause damage to company resources.

In this study, we have developed a new agent service that collects metrics from the Kubernetes nodes and transmits them to a central database. The exported data encompass the most critical metrics for defining the nodes behavior and the attack baselines.

Furthermore, we aim to investigate the implementation of an anomaly detection plugin for detecting these anomalies and predict anomalies in the deployed system, or extrapolate the approach for use in another system.

References

1. Sultan S., Ahmad I., Dimitriou T. Container security: Issues, challenges, and the road ahead. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 52976–52996. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911732>
2. Shamim Md.S.I., Bhuiyan F.A., Rahman A. XI Commandments of kubernetes security: A systematization of knowledge related to kubernetes security practices. *Proc. of the 2020 IEEE Secure Development (SecDev)*, 2020, pp. 58–64. <https://doi.org/10.1109/SecDev45635.2020.00025>
3. Darwesh G., Hammoud J., Vorobeva A.A. Security in kubernetes: best practices and security analysis. *Bulletin of the Ural Federal District. Security in the Information Sphere*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 63–69. <https://doi.org/10.14529/SECUR220209>
4. Mondal S.K., Pan R., Kabir H.M.D., Tian T., Dai H.N. Kubernetes in IT administration and serverless computing: An empirical study and research challenges. *Journal of Supercomputing*, 2022, vol. 78, no. 2, pp. 2937–2987. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03982-3>
5. Shamim S.I. Mitigating security attacks in kubernetes manifests for security best practices violation. *Proc. of the 29th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE)*, 2021, pp. 1689–1690. <https://doi.org/10.1145/3468264.3473495>
6. Yu D., Jin Y., Zhang Y., Zheng X. A survey on security issues in services communication of Microservices-enabled fog applications. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2019, vol. 31, no. 22, pp. e4436. <https://doi.org/10.1002/CPE.4436>
7. Lou J.-G., Fu Q., Yang S., Xu Y., Li J. Mining invariants from console logs for system problem detection. *Proc. of the USENIX Annual Technical Conference*, 2010, pp. 1–14.
8. Lin C.H., Tien C.W., Pao H.K. Efficient and effective NIDS for cloud virtualization environment. *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science Proceedings*, 2012, pp. 249–254. <https://doi.org/10.1109/cloudcom.2012.6427583>
9. Gomez M.E. Full Packet Capture Infrastructure Based on Docker Containers. Tech. rep. SANS Institute InfoSec Reading Room, 2016.
10. Tien C.-W., Huang T.-Y., Tien C.-W., Huang T.-C., Kuo S.-Y. KubAnomaly: Anomaly detection for the Docker orchestration platform with neural network approaches. *Engineering Reports*, 2019, vol. 1, no. 5, pp. e12080. <https://doi.org/10.1002/eng2.12080>
11. Chang C.-C., Yang S.-R., Yeh E.-H., Lin P., Jeng J.-Y. A Kubernetes-based monitoring platform for dynamic cloud resource provisioning. *Proc. of the GLOBECOM 2017 — 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254046>
12. Shah J., Dubaria D. Building modern clouds: Using Docker, Kubernetes & Google Cloud Platform. *Proc. of the 2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 2019, pp. 0184–0189. <https://doi.org/10.1109/CCWC.2019.8666479>
13. Song M., Zhang C., Haihong E. An auto scaling system for API Gateway based on Kubernetes. *Proc. of the 2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, 2018, pp. 109–112. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2018.8663784>
14. Burns B., Grant B., Oppenheimer D., Brewer E., Wilkes J. Borg, Omega, and Kubernetes. *Queue*, 2016, vol. 14, no. 1, pp. 70–93. <https://doi.org/10.1145/2898442.2898444>

Литература

1. Sultan S., Ahmad I., Dimitriou T. Container security: Issues, challenges, and the road ahead // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 52976–52996. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911732>
2. Shamim Md.S.I., Bhuiyan F.A., Rahman A. XI Commandments of kubernetes security: A systematization of knowledge related to kubernetes security practices // *Proc. of the 2020 IEEE Secure Development (SecDev)*. 2020. P. 58–64. <https://doi.org/10.1109/SecDev45635.2020.00025>
3. Darwesh G., Hammoud J., Vorobeva A.A. Security in kubernetes: best practices and security analysis // *Вестник УРФО. Безопасность в информационной сфере*. 2022. Т. 22. № 2. С. 63–69. <https://doi.org/10.14529/SECUR220209>
4. Mondal S.K., Pan R., Kabir H.M.D., Tian T., Dai H.N. Kubernetes in IT administration and serverless computing: An empirical study and research challenges // *Journal of Supercomputing*. 2022. V. 78. N 2. P. 2937–2987. <https://doi.org/10.1007/s11227-021-03982-3>
5. Shamim S.I. Mitigating security attacks in kubernetes manifests for security best practices violation // *Proc. of the 29th ACM Joint Meeting on European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE)*. 2021. P. 1689–1690. <https://doi.org/10.1145/3468264.3473495>
6. Yu D., Jin Y., Zhang Y., Zheng X. A survey on security issues in services communication of Microservices-enabled fog applications // *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2019. V. 31. N 22. P. e4436. <https://doi.org/10.1002/CPE.4436>
7. Lou J.-G., Fu Q., Yang S., Xu Y., Li J. Mining invariants from console logs for system problem detection // *Proc. of the USENIX Annual Technical Conference*. 2010. P. 1–14.
8. Lin C.H., Tien C.W., Pao H.K. Efficient and effective NIDS for cloud virtualization environment // *Proc. of the 4th IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science Proceedings*. 2012. P. 249–254. <https://doi.org/10.1109/cloudcom.2012.6427583>
9. Gomez M.E. Full Packet Capture Infrastructure Based on Docker Containers: Tech. rep. SANS Institute InfoSec Reading Room, 2016.
10. Tien C.-W., Huang T.-Y., Tien C.-W., Huang T.-C., Kuo S.-Y. KubAnomaly: Anomaly detection for the Docker orchestration platform with neural network approaches // *Engineering Reports*. 2019. V. 1. N 5. P. e12080. <https://doi.org/10.1002/eng2.12080>
11. Chang C.-C., Yang S.-R., Yeh E.-H., Lin P., Jeng J.-Y. A Kubernetes-based monitoring platform for dynamic cloud resource provisioning // *Proc. of the GLOBECOM 2017 — 2017 IEEE Global Communications Conference*. 2017. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254046>
12. Shah J., Dubaria D. Building modern clouds: Using Docker, Kubernetes & Google Cloud Platform // *Proc. of the 2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*. 2019. P. 0184–0189. <https://doi.org/10.1109/CCWC.2019.8666479>
13. Song M., Zhang C., Haihong E. An auto scaling system for API Gateway based on Kubernetes // *Proc. of the 2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*. 2018. P. 109–112. <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2018.8663784>
14. Burns B., Grant B., Oppenheimer D., Brewer E., Wilkes J. Borg, Omega, and Kubernetes // *Queue*. 2016. V. 14. N 1. P. 70–93. <https://doi.org/10.1145/2898442.2898444>

Authors

Ghadeer Darwesh — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1116-9410>, ghadeerdarwesh32@gmail.com

Jaafar Hammoud — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57222044000](https://orcid.org/0000-0002-2033-0838), <https://orcid.org/0000-0002-2033-0838>, hammoudgj@gmail.com

Alisa A. Vorobeva — PhD, Associate Professor, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191359167](https://orcid.org/0000-0001-6691-6167), <https://orcid.org/0000-0001-6691-6167>, Alice_w@mail.ru

Авторы

Дарвиш Гадир — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1116-9410>, ghadeerdarwesh32@gmail.com

Хаммуд Жаафар — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57222044000](https://orcid.org/0000-0002-2033-0838), <https://orcid.org/0000-0002-2033-0838>, hammoudgj@gmail.com

Воробьева Алиса Андреевна — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191359167](https://orcid.org/0000-0001-6691-6167), <https://orcid.org/0000-0001-6691-6167>, Alice_w@mail.ru

Received 25.11.2022

Approved after reviewing 20.02.2023

Accepted 16.05.2023

Статья поступила в редакцию 25.11.2022

Одобрена после рецензирования 20.02.2023

Принята к печати 16.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-547-552

УДК 004.75

Метод линейной аппроксимации временных параметров в эластичных системах

Илья Геннадьевич Мартынчук^{1✉}, Сергей Александрович Жмылёв²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² ООО «ГК Ядро», Москва, 125373, Российская Федерация

¹ mt4.ilja@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-2409-9677>

² s.zhmylev@yadro.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-5474>

Аннотация

Введение. В современных эластичных системах важной задачей является прогнозирование изменений в нагрузочной процессах. Оценка скорости изменения нагрузки помогает заблаговременно адаптировать структуру системы для сохранения качества обслуживания пользователей. В современных решениях мало внимания уделено анализу скорости изменения нагрузки, которая напрямую влияет на то, насколько заранее необходимо включать или выключать узлы из вычислительного процесса. В большинстве случаев данные интервалы запуска задаются заранее установленными эмпирическими значениями. Для определения скорости изменения нагрузочного процесса достаточно решить задачу линейной аппроксимации на промежутке возрастания или убывания функции нагрузки от времени. Существующие методы линейной аппроксимации не удовлетворяют всем требованиям, предъявляемым к окружениям эластичных систем. В связи с этим необходима разработка собственного метода аппроксимации. **Метод.** Упрощенный метод линейной аппроксимации основан на расчете центра масс исходного набора данных, а также среднего относительного отклонения упорядоченных точек по оси ординат друг от друга. Новизна предложенного метода заключается в одновременном константном потреблении памяти и отсутствии операций с квадратичными зависимостями. Это позволит учесть все требования, предъявляемые к функционирующим в окружениях эластичных систем методам. **Основные результаты.** Разработан генератор точек в двумерной плоскости для получения набора упорядоченных точек, разбросанных относительно заданной прямой. Генератор позволяет оценить точность предлагаемого метода аппроксимации относительно других методов путем расчета среднего результирующего отклонения сгенерированных точек от заданной прямой. С доверительной вероятностью 0,95 показано, что при максимальном количестве точек в исходном наборе данных, равном 10 000, снижение времени выполнения аппроксимации благодаря разработанному методу достигает 23 %. Значение среднего отклонения для разработанного метода и метода наименьших квадратов, полученное в рамках экспериментов, одинаково. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть применены в сервисах автоматического масштабирования эластичных систем с целью снижения времени выполнения прогнозов скорости изменения нагрузочных процессов. Разработанный метод, в отличие от метода наименьших квадратов, лишен недостатка, связанного с операциями с квадратичными зависимостями, что обеспечивает возможность более широкого его применения в условиях ограниченности разрядной сетки некоторых архитектур.

Ключевые слова

линейная аппроксимация, эластичные системы, автоматическое масштабирование, метод наименьших квадратов, метод достижения консенсуса на основе случайных выборок, метод главных компонент

Ссылка для цитирования: Мартынчук И.Г., Жмылёв С.А. Метод линейной аппроксимации временных параметров в эластичных системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 547–552. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-547-552

Time parameters linear approximation method in elastic systems

Ilya G. Martynchuk¹✉, Sergei A. Zhmylev²¹ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation² GK YADRO LLC, Moscow, 125373, Russian Federation¹ mt4.ilja@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-2409-9677>² s.zhmylev@yadro.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-5474>**Abstract**

In modern elastic systems, an important task is to predict changes in load processes. Estimating the load change rate helps to adapt the system structure in advance to maintain the quality of user experience. In modern solutions, little attention is paid to the analysis of the load change rate which directly affects how far in advance it is necessary to turn nodes on or off from the computing process. In most cases, these trigger intervals are set to pre-set static values. In order to determine the load process change rate, it is sufficient to solve the linear approximation problem over the interval of increase or decrease in the load function over time. The existing methods of linear approximation do not satisfy all the requirements for the elastic systems environments, which necessitates the development of own approximation method. A simplified linear approximation method ZFLAM is based on the calculation of the center of the initial data set mass as well as the average relative deviation of the ordered points along the ordinate axis from each other. The novelty of the proposed method lies in the simultaneous constant consumption of memory and the absence of operations with quadratic dependencies, which makes it possible to satisfy all the requirements for methods operating in elastic system environments. A two-dimensional plane point generator has been developed which makes it possible to obtain a set of ordered points scattered relative to a given line. The developed generator makes it possible to evaluate the accuracy of the proposed approximation method relative to other methods by calculating the average resulting deviation of the generated points from a given straight line. It was revealed that with a confidence probability of 0.95, with the maximum number of points in the original data set equal to 10,000, the reduction in the approximation execution time due to the developed method reaches 23 %. It was determined that with a confidence probability of 0.95, the value of the mean deviation for both methods in the framework of the experiments is the same. The obtained results can be applied in the elastic systems automatic scaling services in order to reduce the execution time of load processes change rate forecasts. The developed method, in contrast to the least squares method, is free from the disadvantage associated with operations with quadratic dependencies, which makes it possible to use it more widely in the conditions of limited bit grid of some architectures.

Keywords

linear approximation, elastic systems, automatic scaling, least squares, random sample consensus, principal component analysis

For citation: Martynchuk I.G., Zhmylev S.A. Time parameters linear approximation method in elastic systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 547–552 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-547-552

Введение

Современные вычислительные системы работают в условиях изменяющихся во времени нагрузочных процессов [1]. Причины данных изменений имеют различную природу: суточная активность пользователей, особенности автоматизируемых системой бизнес-процессов, порядок функционирования смежных систем и т. д. Для сохранения приемлемого уровня качества предоставления услуг вычислительные системы должны обладать возможностью изменения своей структуры в зависимости от характера обрабатываемой нагрузки. Данная возможность достигается разработкой и внедрением в систему процесса автоматического масштабирования, который анализирует протекающие в системе нагрузочные процессы. А также путем добавления или исключения вычислительных узлов при адаптации структуры системы для обработки необходимого количества запросов. Вычислительные системы с реализованным процессом автоматического масштабирования называются эластичными системами [2].

В современных эластичных системах процессы автоматического масштабирования включают в себя механизмы прогнозирования нагрузочных процессов [3]. Данные механизмы позволяют проактивно реагировать на изменения в потоках пользовательских запросов, основываясь на данных о характере нагрузочных про-

цессов в прошлом. Например, заранее запуская необходимое количество вычислительных узлов при росте нагрузки или вывода из вычислительного процесса узлы при ее снижении [4].

Однако в современных решениях мало внимания уделено анализу скорости изменения нагрузки, которая напрямую влияет на то, насколько заранее необходимо включать или исключать узлы из вычислительного процесса. В открытых источниках не удалось найти решений, позволяющих оценивать скорость изменения нагрузочного процесса для обеспечения возможности своевременного изменения структуры эластичной системы. В большинстве случаев данные интервалы запуска задаются заранее установленными эмпирическими значениями [5].

Постановка задачи

Пусть имеется некоторая спрогнозированная зависимость интенсивности входящих в систему запросов λ от времени (рис. 1). Рассмотрим промежуток возрастания функции $\lambda(t)$, начиная с момента времени t_1 и заканчивая t_5 . Для определения скорости изменения нагрузочного процесса достаточно решить задачу линейной аппроксимации на промежутке возрастания функции $\lambda(t)$. Полученная аппроксимирующая прямая образует с осью x некоторый угол α , который и опре-

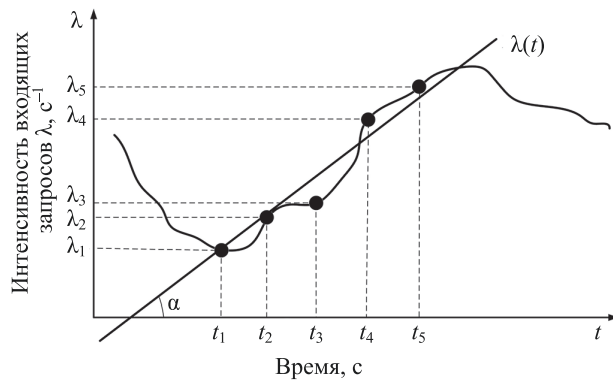


Рис. 1. Задача аппроксимации при прогнозировании скорости изменения нагрузочного процесса

Fig. 1. Approximation problem in predicting the load process change rate

делает величину скорости возрастания интенсивности запросов к системе на рассматриваемом промежутке времени.

Для решения задачи аппроксимации выберем метод, наиболее подходящий для разнообразных окружений эластичных систем. С учетом особенностей функционирования таких систем сформулируем ряд требований к рассматриваемым методам аппроксимации.

Метод должен работать с упорядоченным по времени набором данных. Временные параметры в эластичных системах поступают к узлам управления от систем мониторинга и телеметрии, которые в большинстве случаев отправляют данные через равные промежутки времени [6].

Метод должен обладать линейной алгоритмической сложностью, а также линейной зависимостью объема потребляемой памяти от количества входных данных. В окружениях эластичных систем часто функционирует большое количество различных приложений [6]. Так как задача прогнозирования скорости изменения нагрузочных процессов возложена на управляющий узел системы, то при выполнении данной задачи необходимо сохранить требования к отказоустойчивости данного узла. Повышенная алгоритмическая сложность и потребление памяти в процессах прогнозирования может негативно сказаться на стабильности функционирования системы в целом [7–9].

Метод должен работать в условиях ограничений, накладываемых некоторыми архитектурами. Например, эластичные системы, работающие в окружениях интернета вещей и встраиваемых систем, имеют в своем распоряжении меньшую разрядную сетку представления типов данных, чем системы, работающие в окружениях облачных систем общего назначения.

В результате анализа предметной области были выбраны наиболее популярные методы, решающие задачи линейной аппроксимации упорядоченного набора данных [10]: метод наименьших квадратов (МНК), метод достижения консенсуса на основе случайных выборок (Random Sample Consensus, RANSAC), метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA).

Метод наименьших квадратов. Наиболее популярный метод решения задач линейной аппроксимации

[11]. Суть метода заключается в нахождении коэффициентов прямой, при которых сумма квадратов отклонений аппроксимируемых значений от соответствующих значений этой прямой является минимальной. Решим данную задачу, определив минимальные значения следующей функции:

$$F(k, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (kx_i + b))^2, \quad (1)$$

где k, b — коэффициенты линейной зависимости (угол наклона и смещение соответственно); n — величина исходной выборки; y, x — координаты исходной выборки.

Найдем коэффициенты a и b , при которых функция (1) принимает наименьшее значение. Для этого решим систему уравнений из частных производных данной функции по соответствующим коэффициентам линейной зависимости:

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n} \end{cases}$$

Метод достижения консенсуса на основе случайных выборок. В случае двумерного пространства используем метод RANSAC, который заключается в случайном выборе двух опорных точек из исходного набора данных и оценке степени удаленности всех точек от получившейся прямой [12]. Точки, лежащие в пределах заданного расстояния, называются невыбросами. В результате выберем прямую, имеющую наибольшее количество невыбросов в окрестности, заданной определенным заранее граничным расстоянием. Выбор опорных точек происходит итеративно. Оценка количества итераций имеет вид:

$$k = \frac{\lg(1-p)}{\lg(1-\omega^n)},$$

где p — вероятность существования опорных точек без выбросов; ω — доля невыбросов; n — количество точек в исходном наборе данных.

Метод главных компонент (PCA). В задачах линейной регрессии применяется метод PCA, который получил широкое распространение, благодаря возможности поиска линейных подпространств, где суммарная дисперсия проекции исходных данных минимальна [13]. Цель метода — поиск собственных векторов и соответствующих собственных значений. В случае линейной аппроксимации в двумерном пространстве достаточно найти два ортогональных собственных вектора. Если выбрать вектор с наибольшим собственным значением, то для нахождения искомой прямой достаточно провести линию в направлении данного вектора через «центр масс» исходного набора данных. В случае вектора с наименьшим собственным значением необходимо провести прямую через центр масс перпендикулярно направлению данного вектора.

По результатам анализа методов выявлено, что методы RANSAC и PCA в своих реализациях требуют проведения операций с матрицами, которые сами по себе обладают нелинейной алгоритмической сложностью. Кроме того, данные матрицы необходимо полностью проинициализировать в начале исполнения алгоритма, что при больших наборах данных ведет к повышенному объему потребления памяти. МНК, в свою очередь, лишен данных недостатков. Однако квадратичные зависимости могут привести к переполнениям в условиях ограниченной разрядной сетки конкретной архитектуры. В связи с этим возникла необходимость разработки метода аппроксимации, удовлетворяющего всем ранее заявленным требованиям.

Описание предлагаемого метода

Пусть имеется некоторый массив точек, упорядоченный по оси x . Каждая точка имеет координаты x и y : $(x_i; y_i)$. Угол наклона аппроксимирующей прямой можно оценить путем расчета среднего относительного отклонения упорядоченных точек (Δ) по оси y друг от друга:

$$\Delta = \frac{\sum_{i=2}^N (y_i - y_{i-1})}{x_n - x_1}, \quad (2)$$

где N — количество точек в исходном наборе; x_n и x_1 — координаты крайней правой и левой точек по оси x . Отметим, что разница координат по оси y берется не по модулю.

Чтобы определить первую точку, через которую будет проведена аппроксимирующая прямая, необходимо определить координаты x_c и y_c «центра масс» упорядоченного исходного набора точек:

$$\begin{cases} x_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \\ y_c = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \end{cases}. \quad (3)$$

Используя полученную величину среднего отклонения (2), получим координаты x_b и y_b второй точки, лежащей на искомой прямой:

$$\begin{cases} x_b = x_c + 1 \\ y_b = y_c + \Delta \end{cases}. \quad (4)$$

Уравнение результирующей аппроксимирующей прямой $y = kx + b$ сформируем с помощью известных формул для нахождения угла наклона прямой k и смещения b :

$$\begin{cases} k = \frac{y_b - y_c}{x_b - x_c} \\ b = y_b - \frac{x_b(y_b - y_c)}{x_b - x_c} \end{cases}. \quad (5)$$

Пусть дан упорядоченный массив точек, имеющих следующие координаты: (1; 1); (2; 3); (3; 2); (4; 3); (5; 3);

(6; 5); (7; 4). Рассчитаем среднее относительное отклонение точек (2): $\Delta = 0,5$. Определим координаты «центра масс» набора данных в соответствии с системой уравнений (3): $x_c = 4$; $y_c = 3$, а координаты второй точки, лежащей на искомой прямой с (4): $x_b = 5$; $y_b = 3,5$. С помощью полученных координат двух точек и системы уравнений (5) рассчитаем угол наклона k и смещение b искомой прямой: $k = 0,5$; $b = 1$. В результате получим уравнение аппроксимирующей прямой:

$$y = kx + b = 0,5x + 1.$$

Постановка эксперимента

Для проведения экспериментов и оценки точности рассматриваемых алгоритмов на языке Perl разработан генератор исходного набора данных, позволяющий получить на основе уравнения некоторой прямой набор упорядоченных по оси x точек, разбросанных относительно заданной прямой y' (рис. 2).

Использование генератора случайных чисел является причиной возможной ситуации, когда среднее отклонение $\Delta_{\text{ср}}$ всех сгенерированных точек становится отличным от нуля, тем самым несколько смещая прямую y' и образуя прямую y'' . Таким образом, точность аппроксимирующего метода оценим относительно прямой y'' .

Отметим, что изначально для оценки точности коэффициентов прямой y'' нет, так как на вход алгоритмам подается только набор сгенерированных упорядоченных точек. Для решения данной задачи разработанный генератор также рассчитывает среднее результирующее отклонение сгенерированных точек от заданной прямой y' . Таким образом, прямая y'' , относительно которой необходимо оценивать точность рассматриваемых методов, численно представлена в виде:

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta_i}{N}.$$

Рассчитаем параметр $\Delta_{\text{ср}}$ для каждого конкретного метода и оценим относительную точность рассматриваемых методов аппроксимации.

Из-за несоответствия методов RANSAC и PCA предъявляемым ограничениям по быстродействию и потреблению памяти целесообразно сравнивать разработанный метод только с МНК.

В процессе проведения экспериментов сгенерируем множество синтетических наборов данных. Сравним реализации методов на языке C¹. Разработанный метод и МНК используют итеративный подход к расчету промежуточных значений, считывая на каждой итерации координаты очередной точки. Такой подход обеспечивает константное, близкое друг к другу потребление памяти в обеих реализациях и позволяет исключить его из показателей для сравнения. Время исполнения

¹ Github zhmylove/Math-LinearApprox. ZFLAM – fast linear approximation of 2D sequential points [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/zhmylove/Math-LinearApprox> (дата обращения: 08.12.2022).

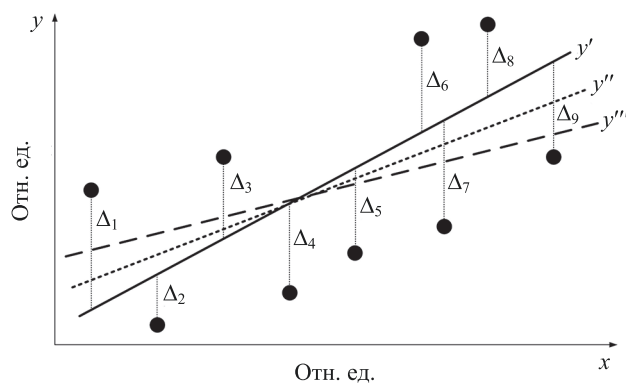


Рис. 2. Оценка точности метода относительно сгенерированной прямой

Fig. 2. Estimation of the method accuracy with respect to the generated straight line

на процессоре замерим только для алгоритмической части каждой реализации, так как в этом случае оно не включает в себя временные затраты на операции ввода/вывода.

Выполним аппроксимацию точек в исходном наборе данных в диапазоне от 10 до 10 000 точек. Для каждого количества точек проведем 100 000 экспериментов для снижения влияния генератора случайных чисел на результат и повышения точности итоговой оценки.

Эксперименты осуществим на тестовом стенде с установленным процессором AMD Ryzen 7 2700X. Запуск реализаций выполним в окружении WSL2 под управлением операционной системы Windows 10.

Результаты

По завершению экспериментов выявлено, что с доверительной вероятностью 0,95, начиная с 50 точек в исходном наборе данных, разработанный метод затрачивает на расчет меньше процессорного времени, чем МНК (рис. 3). Снижение времени выполнения растет линейно и достигает 23 % при количестве точек в исходном наборе данных равном 10 000.

Определено, что с доверительной вероятностью 0,95 значение среднего отклонения для обоих методов в рамках экспериментов одинаково, что свидетельствует об одинаковой их точности.

Выбранный диапазон количества точек для аппроксимации в экспериментах покрывает большинство реальных наборов данных, который должен поступать от системы мониторинга для оценки скорости изменения нагрузки. Например, если обратиться к графику суммарного транзитного трафика через узлы MSK-IX в день и в неделю, то можно заметить, что рост нагрузки

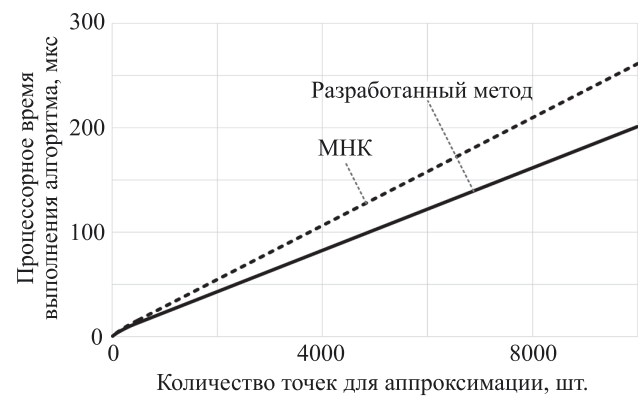


Рис. 3. Сравнение результатов разработанного метода и метода наименьших квадратов

Fig. 3. Comparison of the developed method results and LSM

наблюдается в среднем начиная с 04:00 и заканчивая 20:00¹. В ежедневном графике шаг по времени равен 5 мин. Таким образом, суммарное количество точек для аппроксимации равно 32. Однако данный график является агрегированным по множеству систем. В каждой конкретной системе могут быть свои особенности роста и снижения нагрузки и временного шага получения данных с мониторинга. Например, при том же периоде роста, данные от мониторинга могут поступать каждые 10 с, что в итоге дает на выходе 5760 точек для аппроксимации. Такая частота опроса широко распространена в окружении интернета вещей, когда необходимо снимать показания с аналоговых датчиков или сенсоров с некоторой степенью агрегации по времени [14].

Заключение

Предложенный метод линейной аппроксимации временных параметров в эластичных системах позволяет добиться снижения времени выполнения аппроксимации по сравнению с методом наименьших квадратов с сохранением точности результата. Также разработанный метод, в отличие от метода наименьших квадратов, лишен недостатка, связанного с операциями с квадратичными зависимостями, что обеспечивает возможность более широкого его применения в условиях ограниченности разрядной сетки некоторых архитектур.

¹ Акционерное общество «Центр взаимодействия компьютерных сетей «МСК-IX» (АО «ЦВКС «МСК-IX»). Суммарный трафик участников, передаваемый через MSK-IX [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.msk-ix.ru/traffic/> (дата обращения: 08.12.2022).

Литература

1. Aliev T.I., Rebezova M.I., Russ A.A. Statistical methods for monitoring travel agencies in the settlement system // Automatic Control and Computer Sciences. 2015. V. 49. N 6. P. 321–327. <https://doi.org/10.3103/s0146411615060024>
2. Llorido-Botran T., Miguel-Alonso J., Lozano J.A. A review of auto-scaling techniques for elastic applications in cloud environments // Journal of Grid Computing. 2014. V. 12. N 4. P. 559–592. <https://doi.org/10.1007/s10723-014-9314-7>
3. Nikraves A.Y., Ajila S.A., Lung C.H. Towards an autonomic auto-scaling prediction system for cloud resource provisioning // Proc. of the IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems. 2015. P. 35–45. <https://doi.org/10.1109/seams.2015.22>
4. Moore L.R., Bean K., Ellahi T. Transforming reactive auto-scaling into proactive auto-scaling // Proc. of the 3rd International Workshop on Cloud Data and Platforms (CloudDP '13). 2013. P. 7–12. <https://doi.org/10.1145/2460756.2460758>
5. Aceto G., Botta A., de Donato W., Pescapè A. Cloud monitoring: A survey // Computer Networks. 2013. V. 57. N 9. P. 2093–2115. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2013.04.001>
6. Portnoy M. Virtualization Essentials. John Wiley & Sons, 2012. 286 p.
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Functional reliability of a real-time redundant computational process in cluster architecture systems // Automatic Control and Computer Sciences. 2015. V. 49. N 1. P. 46–56. <https://doi.org/10.3103/S0146411615010022>
8. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A., Poptcova N.A., Bogatyrev A.V. Efficiency of redundant service with destruction of expired and irrelevant request copies in real-time clusters // Communications in Computer and Information Science. 2016. V. 678. P. 337–348. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51917-3_30
9. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Резервированная передача данных через агрегированные каналы в сети реального времени // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 9. С. 735–740. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-9-735-740>
10. Remondino F. Detectors and descriptors for photogrammetric applications // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2006. V. 36. N 3. P. 49–54.
11. Markovsky I., Van Huffel S. Overview of total least-squares methods // Signal Processing. 2007. V. 87. N 10. P. 2283–2302. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2007.04.004>
12. Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Communications of the ACM. 1981. V. 24. N 6. P. 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
13. Abdi H., Williams L.J. Principal component analysis // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. 2010. V. 2. N 4. P. 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
14. Othman M.M., El-Mousa A. Internet of Things & Cloud Computing Internet of Things as a service approach // Proc. of the 11th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS). 2020. P. 318–323. <https://doi.org/10.1109/icics49469.2020.239503>

Авторы

Мартынюк Илья Геннадьевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2409-9677>, mt4.ilja@gmail.com

Жмылёв Сергей Александрович — кандидат технических наук, инженер-консультант, ООО «ГК Ядро», Москва, 125373, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8916-5474>, s.zhmylev@yadro.com

References

1. Aliev T.I., Rebezova M.I., Russ A.A. Statistical methods for monitoring travel agencies in the settlement system. Automatic Control and Computer Sciences, 2015, vol. 49, no. 6, pp. 321–327. <https://doi.org/10.3103/s0146411615060024>
2. Llorido-Botran T., Miguel-Alonso J., Lozano J.A. A review of auto-scaling techniques for elastic applications in cloud environments. Journal of Grid Computing, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 559–592. <https://doi.org/10.1007/s10723-014-9314-7>
3. Nikraves A.Y., Ajila S.A., Lung C.H. Towards an autonomic auto-scaling prediction system for cloud resource provisioning. Proc. of the IEEE/ACM 10th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, 2015, pp. 35–45. <https://doi.org/10.1109/seams.2015.22>
4. Moore L.R., Bean K., Ellahi T. Transforming reactive auto-scaling into proactive auto-scaling. Proc. of the 3rd International Workshop on Cloud Data and Platforms (CloudDP '13), 2013, pp. 7–12. <https://doi.org/10.1145/2460756.2460758>
5. Aceto G., Botta A., de Donato W., Pescapè A. Cloud monitoring: A survey. Computer Networks, 2013, vol. 57, no. 9, pp. 2093–2115. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2013.04.001>
6. Portnoy M. Virtualization Essentials. John Wiley & Sons, 2012, 286 p.
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Functional reliability of a real-time redundant computational process in cluster architecture systems. Automatic Control and Computer Sciences, 2015, vol. 49, no. 1, pp. 46–56. <https://doi.org/10.3103/S0146411615010022>
8. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A., Poptcova N.A., Bogatyrev A.V. Efficiency of redundant service with destruction of expired and irrelevant request copies in real-time clusters. Communications in Computer and Information Science, 2016, vol. 678, pp. 337–348. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51917-3_30
9. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Redundant data transmission using aggregated channels in real-time network. Journal of Instrument Engineering, 2016, vol. 59, no. 9, pp. 735–740. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-9-735-740>
10. Remondino F. Detectors and descriptors for photogrammetric applications. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006, vol. 36, no. 3, pp. 49–54.
11. Markovsky I., Van Huffel S. Overview of total least-squares methods. Signal Processing, 2007, vol. 87, no. 10, pp. 2283–2302. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2007.04.004>
12. Fischler M.A., Bolles R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 1981, vol. 24, no. 6, pp. 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>
13. Abdi H., Williams L.J. Principal component analysis. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
14. Othman M.M., El-Mousa A. Internet of Things & Cloud Computing Internet of Things as a service approach. Proc. of the 11th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS), 2020, pp. 318–323. <https://doi.org/10.1109/icics49469.2020.239503>

Authors

Ilya G. Martynchuk — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2409-9677>, mt4.ilja@gmail.com

Sergei A. Zhmylev — PhD, Engineering consultant, GK YADRO LLC, Moscow, 125373, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8916-5474>, s.zhmylev@yadro.com

Статья поступила в редакцию 30.12.2022

Одобрена после рецензирования 25.04.2023

Принята к печати 25.05.2023

Received 30.12.2022

Approved after reviewing 25.04.2023

Accepted 25.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И КОГНИТИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND COGNITIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-553-563

Role discovery in node-attributed public transportation networks: the study of Saint Petersburg city open data

Yuri V. Lytkin¹, Petr V. Chunaev²✉, Timofey A. Gradov³, Anton A. Boytsov⁴, Irek A. Saitov⁵

^{1,2,3,4,5} ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russian Federation

¹ jurasicus@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8140-010X>

² chunaev@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8169-8436>

³ timagradov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-2537-4087>

⁴ aboytsov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8343-2519>

⁵ xanilegendx@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2805-1323>

Abstract

The work presents results of modeling Public Transportation Networks (PTNs) of Saint Petersburg (Russia) and highlights the roles of stations (stops) in this network. PTNs are modeled using a new approach, previously proposed by the authors, based on weighted networks with node attributes. The nodes correspond to stations (stops) of public transport, grouped according to their geospatial location, while the node attributes contain information about social infrastructure around the stations. Weighted links integrate information about the distance and number of transfers in the routes between the stations. The role discovery is carried out by clustering the stations according to their topological and semantic attributes. The paper proposes a software framework for solving the problem of discovering roles in a PTNs. The results of its application are demonstrated on a new set of data about the PTNs of Saint Petersburg (Russia). The significant roles of the nodes of the specified PTNs were discovered in terms of both topological and infrastructural features. The overall effectiveness of the PTNs was assessed. The revealed transportation and infrastructural shortcomings of the PTNs of Saint Petersburg can be considered by the city administration to improve the functioning of these networks in the future.

Keywords

node-attributed network, public transportation network, role discovery, network node classification, network topology, social infrastructure

Acknowledgements

This study is financially supported by the Russian Science Foundation, Agreement 17-71-30029, with co-financing of the “Bank Saint Petersburg”, Russia.

For citation: Lytkin Yu. V., Chunaev P. V., Gradov T. A., Boytsov A. A., Saitov I. A. Role discovery in node-attributed public transportation networks: the study of Saint Petersburg city open data. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 553–563. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-553-563

УДК 004.94

Выделение ролей в сетях общественного транспорта с атрибутами узлов: исследование открытых данных Санкт-Петербурга

Юрий Всеволодович Лыткин¹, Петр Владимирович Чунаев²✉,
Тимофей Алексеевич Градов³, Антон Алексеевич Бойцов⁴, Ирек Аликович Сaitов⁵

^{1,2,3,4,5} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ jurasicus@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8140-010X>

² chunaev@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8169-8436>

³ timagradov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-2537-4087>

⁴ aboytsov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8343-2519>

⁵ xanilegendx@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2805-1323>

© Lytkin Yu. V., Chunaev P. V., Gradov T. A., Boytsov A. A., Saitov I. A., 2023

Аннотация

Введение. Представлены результаты моделирования и выделения ролей станций (остановок) сетей общественного транспорта на примере Санкт-Петербурга (Россия). **Метод.** Моделирование выполнено с применением нового подхода, предложенного авторами, на основе взвешенных сетей с атрибутами узлов. Узлы представляют собой станции (остановки) общественного транспорта, сгруппированные по их геопространственному положению. Атрибуты узлов содержат информацию о социальной инфраструктуре вокруг станций. Взвешенные связи интегрируют информацию о расстоянии и количестве пересадок в маршрутах движения между станциями. Выделение ролей осуществлено с помощью кластеризации станций по их топологическим и семантическим атрибутам. **Основные результаты.** Предложен программный фреймворк для решения задачи выделения ролей в сети общественного транспорта. Результаты его применения показаны на примере набора данных транспорта Санкт-Петербурга. Выделены значимые роли узлов сети с точки зрения топологических и инфраструктурных особенностей. Выполнена оценка общей эффективности сети общественного транспорта. **Обсуждение.** Результаты работы подхода могут быть использованы городской администрацией для выявления транспортных и инфраструктурных недостатков сети общественного транспорта Санкт-Петербурга для улучшения функционирования сети в будущем.

Ключевые слова

сеть с атрибутами узлов, сеть общественного транспорта, выделение ролей, классификация узлов сети, топология сети, социальная инфраструктура

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение 17-71-30029, при софинансировании Банком Санкт-Петербург (Россия).

Ссылка для цитирования: Лыткин Ю.В., Чунаев П.В., Градов Т.А., Бойцов А.А., Саитов И.А. Выделение ролей в сетях общественного транспорта с атрибутами узлов: исследование открытых данных Санкт-Петербурга // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 553–563 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-553-563

Introduction

This paper is a companion one for the paper [1] where, based on the recent advances in the network theory for Public Transportation Network (PTN) [2–5] and role discovery in social networks [6–8], a novel weighted node-attributed PTN model (using information about a city's social infrastructure to construct the node attributes) was developed and applied by the authors to propose an approach to discover roles of public transport stops and stations.

In this paper, we continue the study in [1], use the terms introduced there, develop a programming framework for solving the problem of role discovery in a PTN and apply it to the newly collected open PTN data of Saint Petersburg, Russia. Our framework aims at discovering meaningful node roles in terms of both network topology (i.e., transition hubs, outskirts, etc.) and node infrastructural attributes — semantics (i.e., tourist, residential, industrial areas, etc.) and is capable of extracting useful insights about the overall PTN's efficiency. As a result of our experimental study, we point out some transportation and infrastructural weaknesses that should be taken into consideration by the city administration of Saint Petersburg to improve the PTN in the future.

The work is organized as follows. Brief information about the previously published approach (model) [1] is given. The results of experiments and their analysis are presented: a review of data, a description of the process of a supernodes network building, a discussion of the nodes functions and their construction, simulation results. The prospects for possible future research are discussed.

The model and the role discovery approach

The model of a node-attributed PTN. The terms used here and below are described in detail in the companion paper [1]. Let us just recall that formally the model of a PTN as a weighted node-attributed network can be defined as a tuple

$$G = (V, E, A),$$

where V is the set of nodes, $E \subseteq V \times V \times \mathbb{R}$ is the set of undirected weighted links, and $A: V \rightarrow \mathbb{R}^n$ is a mapping that defines the set of node-attributed vectors. Here the nodes are stations (stops) grouped with respect to their geospatial position, node attributes store information about social infrastructure around the stations (stops), and weighted links integrate information about the travelling distance and the number of hops in the transportation routes between the stations (stops). Recall that each component of G is described in detail in the companion paper [1].

The role discovery task for the node-attributed PTN. Recall that the task of role discovery originated in the field of social network analysis, but found its way into a variety of different domains of science [1]. The basic approach to this task is to extract some features of the network nodes and then use machine learning algorithms (i.e., K-Means [9]) to extract clusters based on these features. Even though originally only topological features were used in this approach, the basic framework can naturally be extended to include also node-attributed vectors. For example, one can obtain two separate clustering (with respect to topological features and node attributes) and then analyze their relationship, for instance, using a contingency table. In this study, as proposed in [1], we adopt this approach.

Recall that the reason for this choice is also provided in the companion paper [1].

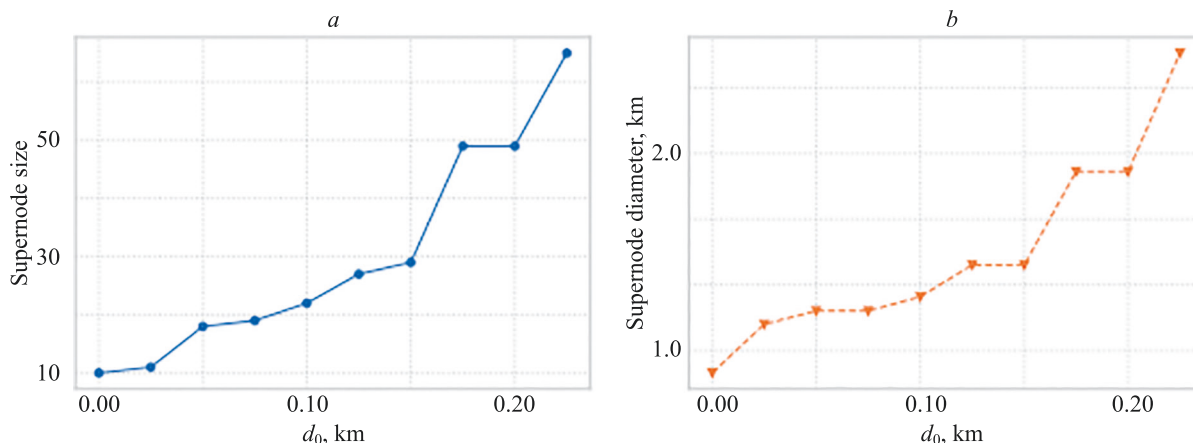


Fig. 1. Maximal supernode size (a) and diameter (b) for different values of d_0 . Even for relatively small values ($d_0 > 0.15$) these characteristics grow quite rapidly resulting in some supernodes having diameter as large as 2 km and more

Role discovery in the PTN of Saint Petersburg.

We apply the model for the task of role discovery on the PTN of Saint Petersburg, Russia. The task is to analyze and separate in an *unsupervised* manner various public transportation stops into homogeneous clusters, i.e., groups of nodes with similar characteristics including infrastructural attributes and topological features. This task is useful in the analysis of public transportation systems since these clusters can then be further analyzed in terms of their role within the public transportation system and reachability between them.

Dataset description. First, we describe the data¹ needed to build the PTN model proposed above. As we mentioned before, we only use the general public transportation and infrastructural data that is available for most of the cities in the world, thus making it possible to use the proposed techniques for analyzing public transportation systems of virtually any city.

The two sources of original data are:

- Saint Petersburg city Open Data², containing information about different public transportation stops and routes operating in Saint Petersburg, Russia;
- OpenStreetMap (OSM)³, containing information about various infrastructural objects around Saint Petersburg.

The public transportation data is presented in the form of a table with each row containing information about a stop as part of some transportation route. Each such row consists of information about the current route (its ID and mode of transportation), the current stop (its ID and coordinates), and the next stop corresponding to the route. The three modes of transportation presented here are: bus, tramway, and trolleybus. Note that there is no subway data available here, thus it will be extracted from the second source of data.

¹ The data along with all preprocessing and analysis procedures is available in the Github repository at <https://github.com/AlgoMathITMO/public-transport-network> (accessed: 01.10.2022).

² Available at: https://classif.gov.spb.ru/irsi/7830001067-marshruty-dvizheniya-gorodskogo-transporta/structure_version/186/ (accessed: 01.10.2022).

³ Available at: <https://www.openstreetmap.org/> (accessed: 01.10.2022).

The data from OSM is presented in form of a JSON list containing information on various objects in and around Saint Petersburg. These objects can be either *nodes* or *ways*. A *node* usually denotes a single point on the map, and they are used in cases where the size of an object does not matter too much (for instance, bus stops, historical monuments, etc.). By contrast, *ways* (sequences of nodes) are usually used to represent larger objects (big buildings, industrial areas, etc.). Each object is represented as a dictionary that contains information on this object (namely, its ID, coordinates and some attributes corresponding to its type). These attributes are usually quite precise and can be used to extract more topic-specific information about each object. This data is used in two ways. Firstly, we extract information on subway routes and stations to add another mode of transportation to those presented in the first data source. The basic statistics on the completed public transportation data can be seen in Table 1.

Secondly, we group various infrastructural objects into 20 groups related to different types of social infrastructure (i.e., housing, shopping, restaurants, medicine, etc.). All of this is done using the OSM attributes of these objects, and the specific correspondences between these attributes and the resulting infrastructure types can be found in the Github repository. The number of infrastructural objects of each type can be seen in Fig. 2.

Supernode network. This data is then used to build the model described in previous section. First of all, supernodes are produced by combining the closely situated stops and stations. We use the distance threshold $d_0 = 0.1$, i.e., all stops that are closer than d_0 are combined into a single supernode (Fig. 3 and the definitions in [1]). In practice, this can be achieved using the following algorithm:

1. Calculate the distances between all pairs of stops.
2. Build a graph in which a link between two stops s_1 and s_2 exists if $d(s_1, s_2) \leq d_0$.
3. Each connected component of this graph is a separate supernode.

Secondly, we need to construct links for our network. As we mentioned in [1], we adopt the *P*-space model for constructing links, i.e., a link between nodes s_i and s_j means that there exists a route connecting these nodes (not necessarily consecutively). We also use link weights

Table 1. Statistics on public transportation of Saint Petersburg

	Bus	Subway	Tram	Trolley
Number of stops	5511	71	887	1192
Number of routes	1070	10	83	90
Average route length, km	14.15	24.02	10.38	11.32

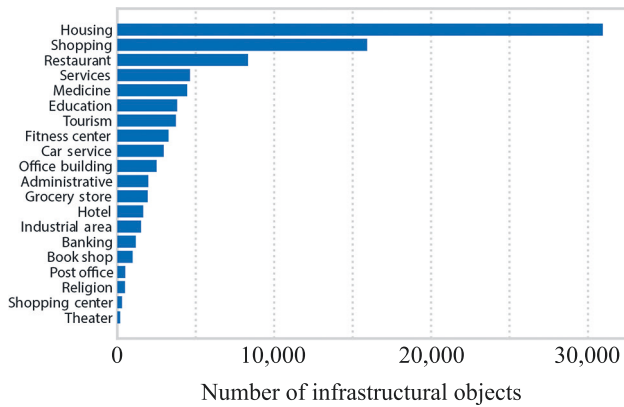


Fig. 2. Number of infrastructural objects of various types in Saint Petersburg

defined in [1] with $\alpha = 0.2$. In practice, this can be done using the following algorithm:

1. Iterate through all routes. For each route r do the following.
2. Iterate through all pairs of nodes in r . For each pair of nodes s_i, s_j calculate and store the route distance $rd(s_i, s_j)$ [1].
3. When this is done, for each pair of nodes s_i, s_j take the minimal route distance $rd(s_i, s_j)$ and use it to calculate the link weight $w(s_i, s_j)$ [1].

Note that the built graph is not always connected. In Fig. 4 we can see two small portions of nodes disconnected from the main body of the graph. This can happen if each

of the route stops is too far away from the rest of the nodes in the graph, thus making it impossible to make a short walk to reach it.

Finally, we need to construct the supernode attributes based on the social infrastructure around them. As it was described in [1], we use a distance window $d_1 = 0.2$ here. This value controls the additional distance (with respect to the minimal distance to any supernode) allowed in order to assign a given infrastructure object to a supernode (Fig. 5). In general, assigning infrastructure objects to supernodes can be done using the following algorithm:

1. Iterate through all infrastructure objects. For each object i do the following.
2. Calculate distances from i to each supernode.
3. Take the minimal distance d_{\min} . Assign object i to each stop s such that $d(i, s) \leq d_{\min} + d_1$.

Note that in general not all nodes in the graph will be assigned to infrastructure objects, and there can be some nodes with no infrastructure around them. Fig. 6 shows all the supernodes of the Saint Petersburg PTN with colors indicating the number of infrastructure objects assigned to them.

Supernode features. Recall that in this study we perform separate clustering with respect to topological features (derived from the network structure) and infrastructure features (using the supernode attributes, see previous section) and then compare the two.

Firstly, we consider the supernode attributes which are in [1] and were built above in this paper. To construct *infrastructure features* from these attributes, we additionally

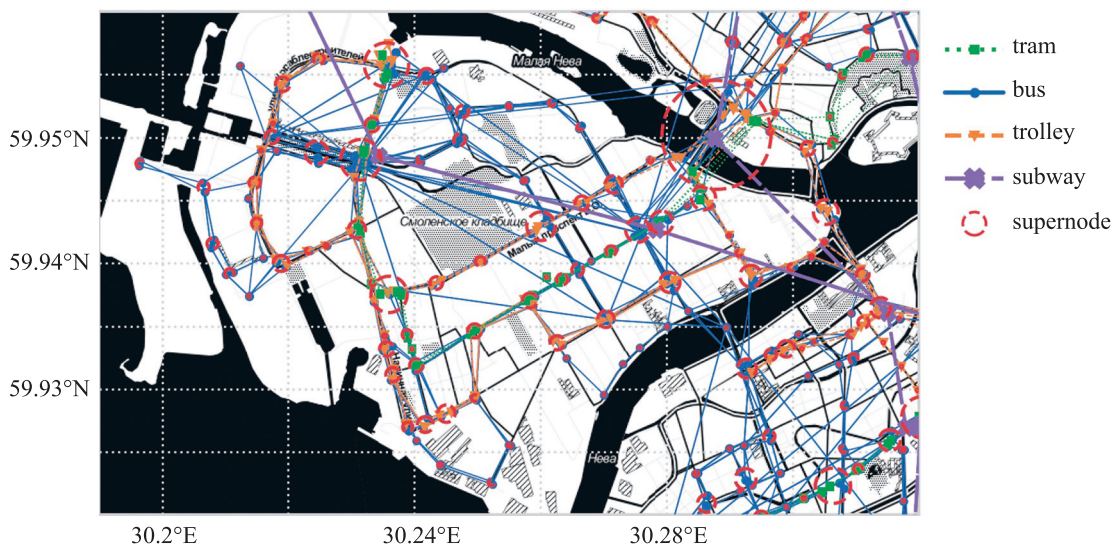


Fig. 3. The map of Vasileostrovsky District in Saint Petersburg indicating stops and routes for different modes of transportation as well as the supernodes (groups of nearby stops).

The picture is taken from [1]

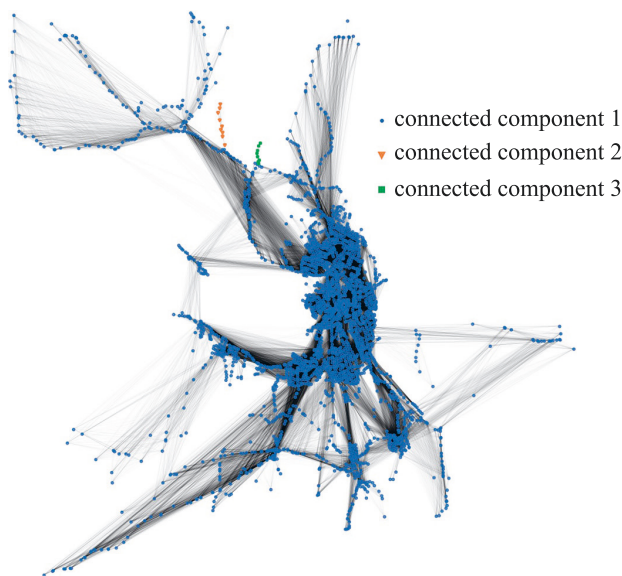


Fig. 4. The P -space supernode graph built using the Saint Petersburg data. The node positions correspond to the geographical locations of the corresponding nodes. There is a small portion of nodes that are disconnected from the main body of the graph

divide each vector $\mathbf{v} = A(s)$ by its sum $\sum \mathbf{v}$ (obviously, excluding the cases where $\sum \mathbf{v} = 0$). Therefore, each such infrastructure feature vector shows the orientation of a given supernode towards one or multiple infrastructure types (for example, some nodes can be mainly housing-oriented having a large value corresponding to the housing infrastructure type and smaller values on other positions), regardless of the total number of infrastructure objects around the node.

The second set of supernode *topological features* is constructed based on the topology, i.e., the connectivity structure of the network. Here we use various well-known centrality measures, namely, *degree centrality*, *betweenness centrality* [10] (considering weights w when calculating

shortest paths), and *closeness centrality* [11] (using both weights w and the number of hops) as well as other topological features like the *local clustering coefficient* [12] and *PageRank* [13].

As mentioned in [1], the choice of a network model (L -space or P -space) is of paramount importance when using and interpreting such topological features. For instance, we argue against using centrality measures based on shortest paths with the L -space model since such shortest paths are not indicative of the optimal travelling routes of passengers (Fig. 4), thus making any analysis of these centralities (as in [5]) rather questionable.

Contrarily to this, the mentioned centrality measures offer a natural interpretation when using them with the P -space model. For instance, degree centrality emphasizes the so-called accessibility hubs, i.e., nodes from which a lot of other nodes are accessible without need to make a connection. Betweenness centrality emphasizes the transportation hubs, i.e., the nodes at which a lot of connections happen. Closeness centrality emphasizes the nodes that on average require the least travelling distance (in sense of either weighted distance w , or the number of connections) to reach. PageRank is similar to degree centrality, but it also promotes the nodes that are connected to many important nodes of the graph. All these centrality measures therefore highlight different aspects of centrality that can occur in a PTN.

The least intuitive feature here is the local clustering coefficient which is the fraction of closed triangles that exist in the neighborhood of a given node. Since in the P -space model all the node pairs inside each route are connected with a link (and therefore all possible triangles exist around these nodes in these cases), local clustering coefficient does the contrary to the measures described above and actually emphasizes the nodes that are a part of the least number of different routes.

Before turning to the clustering task, we examine these features a bit more. Fig. 7 shows the heatmap of Spearman correlations between the features. Note that some

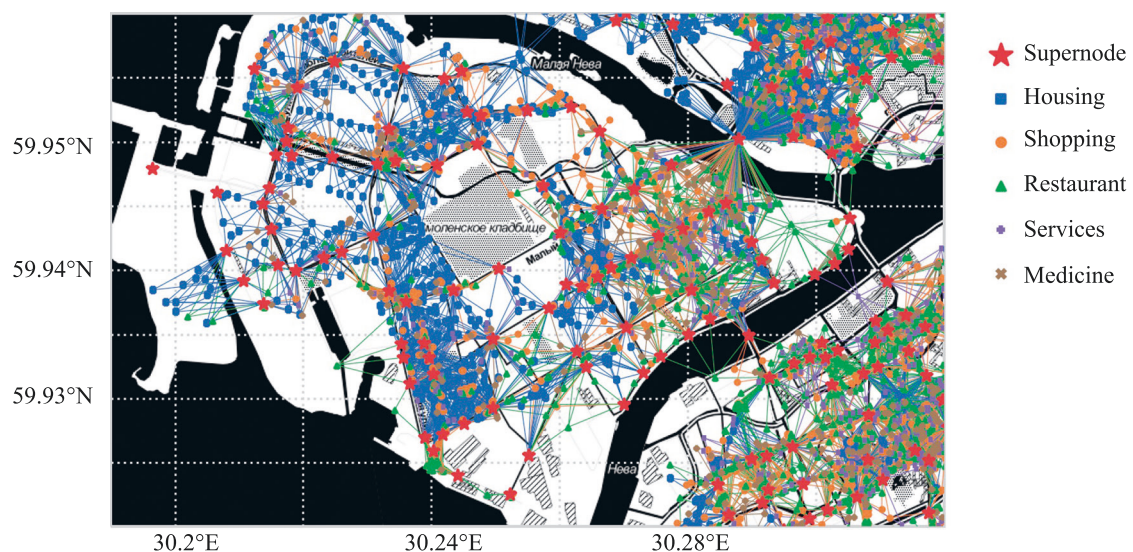


Fig. 5. The map of Vasileostrovsky District in Saint Petersburg indicating supernodes and various infrastructural objects attached to them. The picture is taken from [1]

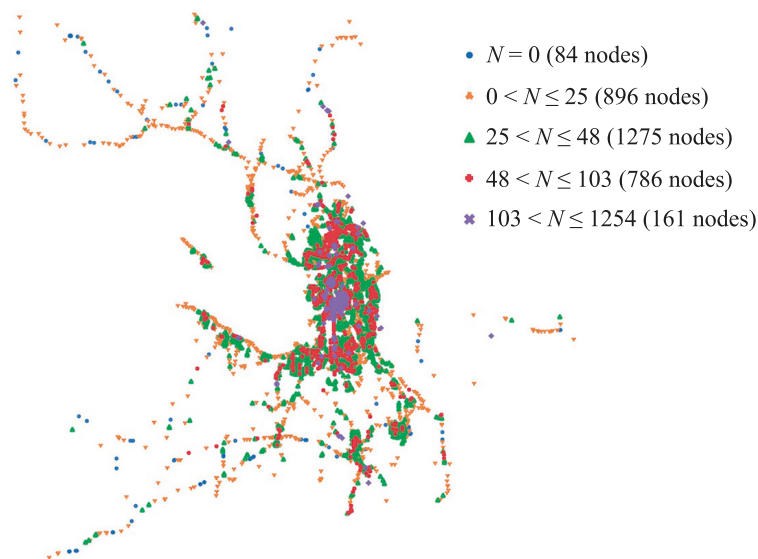


Fig. 6. The nodes of the Saint Petersburg graph with colors indicating the number of infrastructure objects assigned to them (N)

of the higher correlations (in absolute terms) are actually expected, such as the strong positive correlation between the centrality measures and the strong negative correlation between the latter and the local clustering coefficient. The other correlations are more interesting though. For instance, we can see a significant positive correlation between the centrality measures and some infrastructure features, such as Restaurant, Service, Office building and Banking. These (expectedly) indicate that there are on average more of such infrastructure objects towards the city center. Such correlation is less noticeable for Shopping centers and Post offices, indicating that these infrastructure objects can generally be found everywhere throughout the city, not just in the center. On the other hand, we can note a slight negative correlation between Housing and many of the other features (notably, except Grocery stores and

Education), which indicates a tendency towards higher isolation of the residential districts in Saint Petersburg.

Supernode clustering. Finally, in this section we perform the cluster analysis of the supernodes with respect to both infrastructure and graph features (see previous section). The framework of this analysis is as follows. For a given set of features, we first obtain their clusters using the K-Means algorithm [9]. The number of clusters is determined based on the inertia plot and interpretability of the clusters. The clusters are then plotted in different views and interpreted based on their features.

We first perform cluster analysis of the infrastructure features. Fig. 8 shows the t-SNE projection [14] and geographical positions of the supernodes, colored based on the obtained clusters. To analyze the difference between these clusters and interpret them, we also plot the aggregated features over each cluster (Fig. 9). In the upper part of the figure the mean feature values are plotted for each cluster as well as the global mean. Also, to emphasize the difference between the feature values in each cluster, in the lower part we plot the values of the 2-sample Welch's t-test statistic [15] for comparing the mean of each feature over the given cluster compared to the mean of this feature over the rest of the clusters (this is the so-called one-vs-rest strategy).

The obtained clusters can be summarized as follows:

1. Tourism area. Nodes with mostly tourist attractions around them, not much else.
2. Residential area — unimproved. Nodes with mostly housing around them and no other common urban amenities, such as grocery stores, hospitals, etc.
3. Center. Nodes located around shops, restaurants, office buildings, banks, etc.
4. Residential area — improved. Nodes with housing as well as various amenities, like schools, hospitals, grocery stores, fitness centers, etc.
5. Industrial area. Nodes surrounded by industrial areas and not much else.
6. No infrastructure. Nodes that have no social infrastructure around.

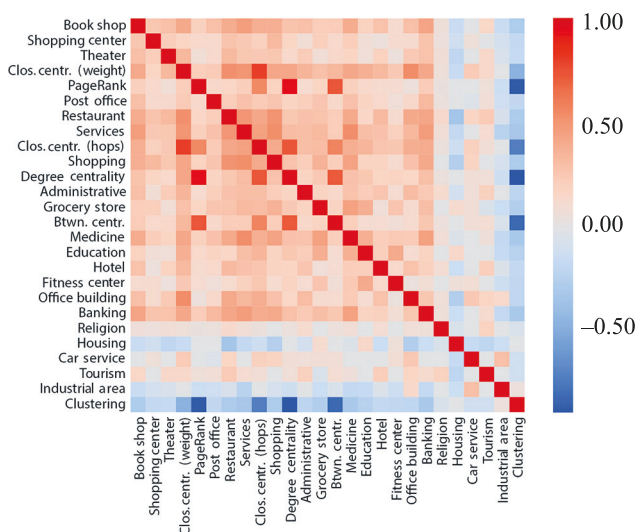


Fig. 7. The heatmap of Spearman correlations between various supernode graph features.

(For interpretation of the references to color in this heatmap, the reader is referred to the web version of this article)

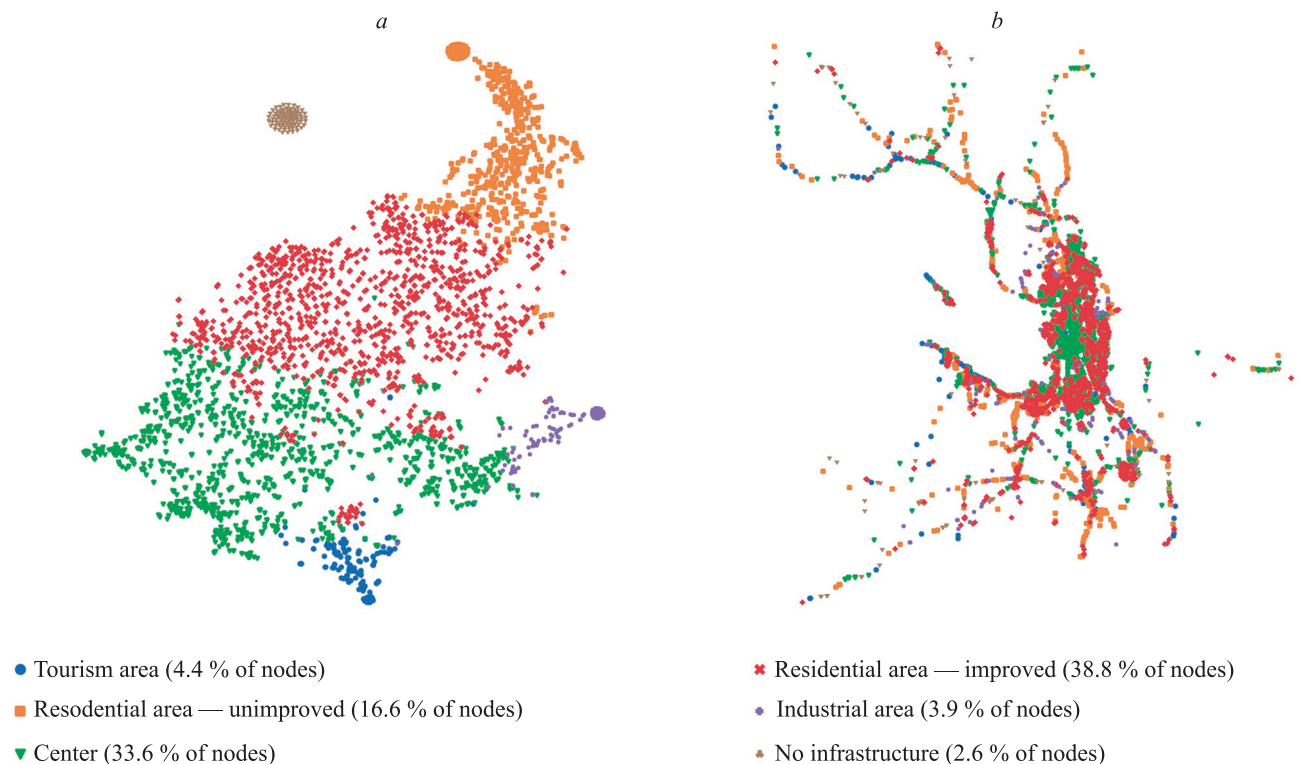


Fig. 8. t-SNE projection (a) and geographical positions (b) of supernodes, colored based on the clusters by their infrastructure features. In (a), the circle-shape clusters are groups of supernodes with the same attribute vectors; e.g., the brown cluster is the group of supernodes with zero-vector attributes (i.e., the groups of stops having no infrastructure around)

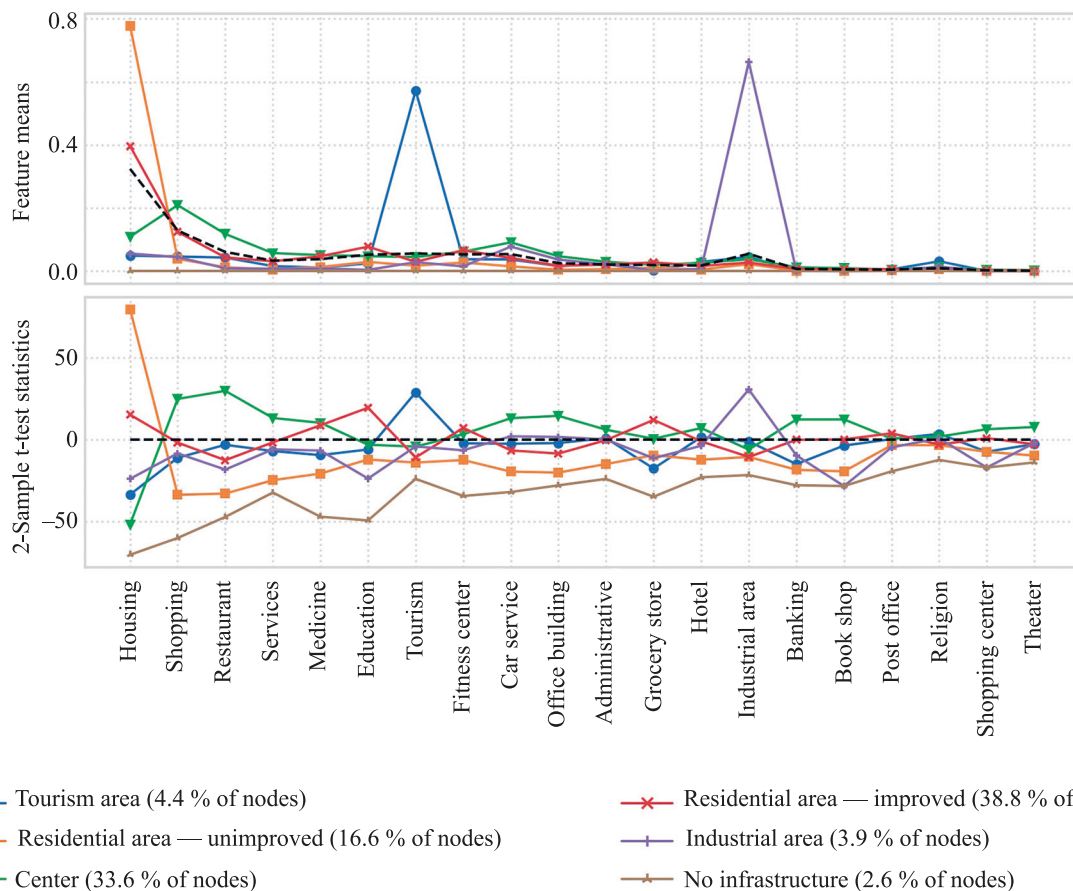


Fig. 9. Aggregated features of supernodes from different infrastructure clusters. The upper plot shows a mean value of each feature across each cluster as well as the global mean. The lower plot shows the values of the 2-sample Welch's t-test statistic [15] for comparing the mean of each feature over the given cluster, compared to the mean of this feature over the rest of the clusters

It should be noted that the proposed interpretation is not exactly strict since, as it can be seen in the t-SNE projection in Fig. 8, there are no clear boundaries between these clusters (except for the cluster with no social infrastructure). Thus by means of social infrastructure, one can see smoothly changing and highly various set of supernode types in the PTN under consideration.

The cluster analysis of graph features is done in a similar fashion: the clustering is performed using the K-Means algorithm, the clusters are plotted using their t-SNE projection as well as the geographical positions in Fig. 10, and their aggregated features are shown in Fig. 11. Based on the presented data, these clusters can be summarized as follows:

1. Hubs. Nodes that serve as points of transition between different routes when travelling through a city. These nodes have higher degree and betweenness centrality, compared to the other nodes.
2. Center. Nodes that represent the well-accessible part of the city center. These nodes have high values of centralities.
3. Inaccessible center. Nodes that represent the less accessible part of the city center. These nodes have high closeness centrality based on the link weights which indicate their close proximity to the center, but at the same time these nodes have low closeness centrality based on hops (which indicates that these nodes on average require much more connections to reach) as well as low betweenness and degree centrality.
4. Towns. Nodes located outside the main city in separate towns (low betweenness, closeness and degree centrality).
5. Suburbs. Nodes that are located moderately far away from the city center (lower closeness centrality), but

they are still well-connected to the transportation network (moderate betweenness and degree centrality).

6. Disconnected nodes. A few nodes that are not connected to the transportation network and form separate connected components. (Note that this cluster is not presented in Fig. 11 since its 2-test statistic values are extremely low and render all the other plots impossible to read.)

As with the infrastructure-based clustering, it should be noted that there are no clear boundaries between the topology-based clusters. Nevertheless, this clustering shows the different high-level roles of the network nodes and provides insight into the relations between these clusters.

Finally, in order to assess the relations between the infrastructure and topology feature clusters, we build a contingency table by counting the number of nodes in different intersections of these clusters. These values are presented in Table 2. The rows of the table represent the infrastructure clusters and the graph feature clusters are represented by the columns.

From this table some interesting interconnections between the two clusterings arise. We can see that most of the infrastructure clusters are well-represented in all of the graph-feature clusters (and vice versa), which means that these two clusterings both carry important and unique information about the roles of each node. For instance, we can see that the nodes corresponding to improved residential areas (with better-developed urban amenities) have more members in graph-based clusters 'Center', 'Hub', and 'Inaccessible center', as well as 'Suburbs', at the same time there are more undeveloped residential areas in the 'Towns' cluster.

Another important cluster to consider from the urban development point of view is the graph-feature cluster

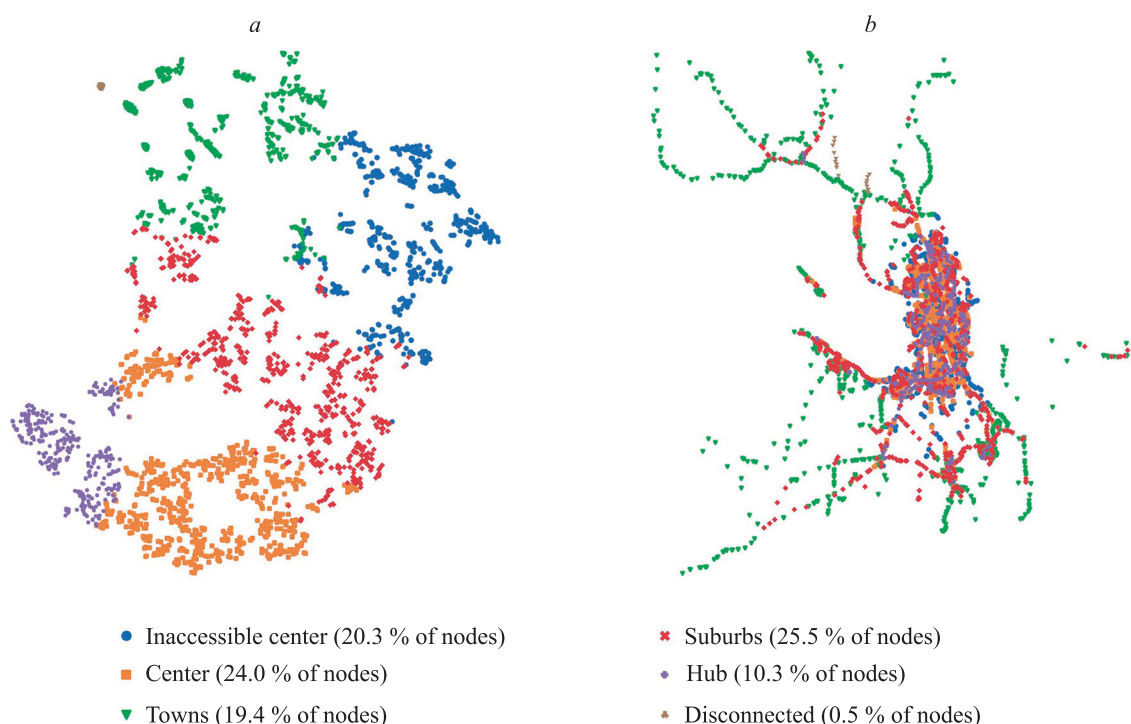


Fig. 10. t-SNE projection (a) and geographical positions (b) of supernodes, colored based on the clusters obtained using their graph features

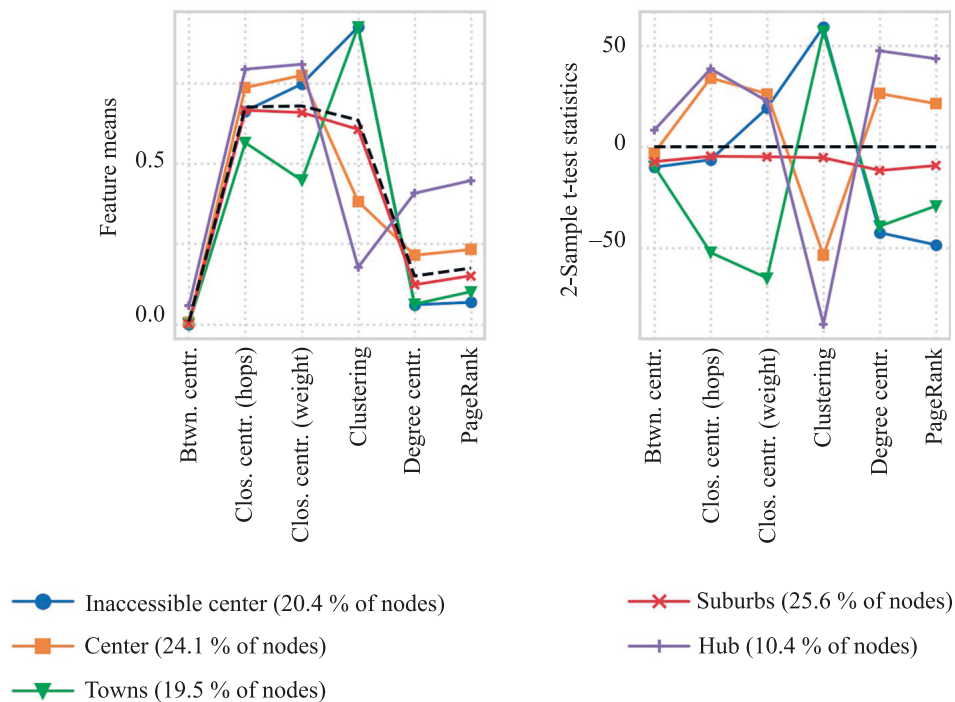


Fig. 11. Aggregated features of supernodes from different graph feature clusters. The plot (a) shows a mean value of each feature across each cluster as well as the global mean. The plot (b) shows the values of the 2-sample Welch's t-test statistic [15] for comparing the mean of each feature over the given cluster, compared to the mean of this feature over the rest of the clusters

Table 2. Contingency table showing the relations between infrastructure clusters and graph feature clusters. The rows of the table represent the infrastructure clusters and the graph feature clusters are represented by the columns

Area	Center	Disconnected	Hub	Inaccessible center	Suburbs	Towns
Center	300	3	169	265	225	115
Industrial area	3	0	0	33	43	47
No infrastructure	0	3	0	2	11	68
Residential area (improved)	371	2	144	249	344	131
Residential area (unimproved)	74	9	15	92	139	203
Tourism area	20	0	2	10	54	56

'Inaccessible center', which contains nodes that are fairly central in terms of closeness centrality (i.e., average distance from the rest of the nodes), but they are low on betweenness and degree centrality, which means that public transportation is under-developed in these areas. We can see that this cluster contains many members of the infrastructure clusters 'Center' and 'Residential area — improved', which means that these areas are well-developed in terms of urban amenities, but are quite separated from the rest of the PTN, which means less convenience of daily commuting, for instance.

Conclusions and future work

In this work, we applied a novel weighted node-attributed PTN model (using information about a city's social infrastructure to construct the node attributes) and the approach to discover roles of public transport stops and stations to the Saint Petersburg open PTN data. For this purpose, a novel role discovery programming

framework was introduced which uses both structural (i.e., network topology) and semantic (i.e., social infrastructure around the nodes) aspects of a node-attributed PTN. This framework is shown to be capable of extracting useful information about the properties and overall efficiency of a city's public transportation system from both the structural and infrastructure standpoints. For instance, in case of Saint Petersburg, it is able to point out some under-developed areas of the city, e.g., less accessible parts of the city center or residential areas that are low on urban amenities. These weaknesses can lead to better development of the city in the future if taken into consideration by the city administration. The performed analysis uses only the generally available data, which means that similar analysis can be performed on any large city's public transportation system. In general, the proposed approach to role discovery in node-attributed networks can be applied beyond the scope of PTNs and to any other kind of network (e.g. social, biological, technical, etc.), given the appropriate set of node attributes.

Among other things, a potential direction of future research is found: to develop more interpretable graph-based node metrics that would highlight even more peculiarities in the different roles of the nodes in a PTN. For instance, as it is already mentioned, the metric of betweenness centrality over a P -space model graph highlights the nodes at which a lot of transfers happen. At the same time, the actual stops through which these shortest routes and a s -space graph pass are not highlighted

by any of the existing metrics (and are not actually even considered in a P -space model). A metric like this could bring up very important information about the actual workload of different PTN nodes without the need for any dynamic data like transportation of passenger flows.

It is also reasonable to further enhance the results of this study by performing the node classification task on the data, which could be also a validation of clustering approach for role detection.

References

1. Lytkin Yu.V., Chunaev P.V., Gradov T.A., Boytsov A.A., Saitov I.A. Role discovery in node-attributed public transportation networks: the model description. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 340–351. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-2-340-351>
2. Haznaghy A., Fi I., London A., Nemeth T. Complex network analysis of public transportation networks: A comprehensive study. *Proc. of the 2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 2015, pp. 371–378. <https://doi.org/10.1109/mtits.2015.7223282>
3. Yang X.-H., Chen G., Chen S.-Y., Wang W.-L., Wang L. Study on some bus transport networks in china with considering spatial characteristics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, vol. 69, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.08.004>
4. Wang L.-N., Wang K., Shen J.-L. Weighted complex networks in urban public transportation: Modeling and testing. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, vol. 545, pp. 123498. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123498>
5. Shanmukhappa T., Ho I.W.-H., Tse C.K. Spatial analysis of bus transport networks using network theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2018, vol. 502, pp. 295–314. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.111>
6. Rossi R.A., Ahmed N.K. Role discovery in networks. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2015, vol. 27, no. 4, pp. 1112–1131. <https://doi.org/10.1109/tkde.2014.2349913>
7. Gupte P.V., Ravindran B., Parthasarathy S. Role discovery in graphs using global features: Algorithms, applications and a novel evaluation strategy. *Proc. of the 2017 IEEE 33rd International Conference on Data Engineering (ICDE)*, 2017, pp. 771–782. <https://doi.org/10.1109/icde.2017.128>
8. Revelle M., Domeniconi C., Johri A. Persistent roles in online social networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 2016, vol. 9852, pp. 47–62. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1_4
9. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proc. of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. V. 1: Statistics*, 1967, pp. 281–297.
10. Freeman L.C. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 1977, vol. 40, no. 1, pp. 35–41. <https://doi.org/10.2307/3033543>
11. Freeman L.C. Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks*, 1978, vol. 1, no. 3, pp. 215–239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
12. Onnela J.-P., Saramäki J., Kertész J., Kaski K. Intensity and coherence of motifs in weighted complex networks. *Physical Review E*, 2005, vol. 71, no. 6, pp. 065103. <https://doi.org/10.1103/physreve.71.065103>
13. Page L., Brin S., Motwani R., Winograd T. *The pagerank citation ranking: Bringing order to the web*: Technical Report 1999-66, Stanford InfoLab, November 1999.
14. Van der Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*, 2008, vol. 9, no. 86, pp. 2579–2605.
15. Welch B.L. The generalization of 'student's' problem when several different population variances are involved. *Biometrika*, 1947, vol. 34, no. 1-2, pp. 28–35. <https://doi.org/10.2307/2332510>

Литература

1. Lytkin Yu.V., Chunaev P.V., Gradov T.A., Boytsov A.A., Saitov I.A. Role discovery in node-attributed public transportation networks: the model description // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23. № 2. С. 340–351. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-2-340-351>
2. Haznaghy A., Fi I., London A., Nemeth T. Complex network analysis of public transportation networks: A comprehensive study // Proc. of the 2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS). 2015. P. 371–378. <https://doi.org/10.1109/mtits.2015.7223282>
3. Yang X.-H., Chen G., Chen S.-Y., Wang W.-L., Wang L. Study on some bus transport networks in china with considering spatial characteristics // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2014. V. 69. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.08.004>
4. Wang L.-N., Wang K., Shen J.-L. Weighted complex networks in urban public transportation: Modeling and testing // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2020. V. 545. P. 123498. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123498>
5. Shanmukhappa T., Ho I.W.-H., Tse C.K. Spatial analysis of bus transport networks using network theory // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2018. V. 502. P. 295–314. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.02.111>
6. Rossi R.A., Ahmed N.K. Role discovery in networks // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2015. V. 27. N 4. P. 1112–1131. <https://doi.org/10.1109/tkde.2014.2349913>
7. Gupte P.V., Ravindran B., Parthasarathy S. Role discovery in graphs using global features: Algorithms, applications and a novel evaluation strategy // Proc. of the 2017 IEEE 33rd International Conference on Data Engineering (ICDE). 2017. P. 771–782. <https://doi.org/10.1109/icde.2017.128>
8. Revelle M., Domeniconi C., Johri A. Persistent roles in online social networks // Lecture Notes in Computer Science. 2016. V. 9852. P. 47–62. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46227-1_4
9. MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // Proc. of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. V. 1: Statistics. 1967. P. 281–297.
10. Freeman L.C. A set of measures of centrality based on betweenness // Sociometry. 1977. V. 40. N 1. P. 35–41. <https://doi.org/10.2307/3033543>
11. Freeman L.C. Centrality in social networks conceptual clarification // Social Networks. 1978. V. 1. N 3. P. 215–239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
12. Onnela J.-P., Saramäki J., Kertész J., Kaski K. Intensity and coherence of motifs in weighted complex networks // Physical Review E. 2005. V. 71. N 6. P. 065103. <https://doi.org/10.1103/physreve.71.065103>
13. Page L., Brin S., Motwani R., Winograd T. *The pagerank citation ranking: Bringing order to the web*: Technical Report 1999-66, Stanford InfoLab, November 1999.
14. Van der Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE // Journal of Machine Learning Research. 2008. V. 9. N 86. P. 2579–2605.
15. Welch B.L. The generalization of 'student's' problem when several different population variances are involved // Biometrika. 1947. V. 34. N 1-2. P. 28–35. <https://doi.org/10.2307/2332510>

Authors

Yuri V. Lytkin — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57155292900](https://orcid.org/0000-0001-8140-010X), <https://orcid.org/0000-0001-8140-010X>, jurasicus@gmail.com

Petr V. Chunaev — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 36522457300](https://orcid.org/0000-0001-8169-8436), <https://orcid.org/0000-0001-8169-8436>, chunaev@itmo.ru

Timofey A. Gradov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57221121540](https://orcid.org/0000-0003-2537-4087), <https://orcid.org/0000-0003-2537-4087>, timagradov@yahoo.com

Anton A. Boytsov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57215429754](https://orcid.org/0000-0001-8343-2519), <https://orcid.org/0000-0001-8343-2519>, aboytsov@itmo.ru

Irek A. Saitov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57215429754](https://orcid.org/0000-0002-2805-1323), <https://orcid.org/0000-0002-2805-1323>, xanilegendx@gmail.com

Авторы

Лыткин Юрий Всеволодович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57155292900](https://orcid.org/0000-0001-8140-010X), <https://orcid.org/0000-0001-8140-010X>, jurasicus@gmail.com

Чунаев Петр Владимирович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 36522457300](https://orcid.org/0000-0001-8169-8436), <https://orcid.org/0000-0001-8169-8436>, chunaev@itmo.ru

Градов Тимофей Алексеевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57221121540](https://orcid.org/0000-0003-2537-4087), <https://orcid.org/0000-0003-2537-4087>, timagradov@yahoo.com

Бойцов Антон Алексеевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57215429754](https://orcid.org/0000-0001-8343-2519), <https://orcid.org/0000-0001-8343-2519>, aboytsov@itmo.ru

Сайтов Ирек Аликович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57215429754](https://orcid.org/0000-0002-2805-1323), <https://orcid.org/0000-0002-2805-1323>, xanilegendx@gmail.com

Received 09.12.2022

Approved after reviewing 06.03.2023

Accepted 16.05.2023

Статья поступила в редакцию 09.12.2022

Одобрена после рецензирования 06.03.2023

Принята к печати 16.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-564-574

УДК 51-77: 519.25

Исследование тенденций взаимосвязи между профориентационными предпочтениями пользователей и их цифровыми следами в социальной сети

Анастасия Олеговна Хлобыстова¹, Максим Викторович Абрамов²✉,
 Валерия Фуатовна Столярова³

^{1,2,3} Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

¹ aok@dscs.pro, <https://orcid.org/0000-0002-9811-5476>

² mva@dscs.pro✉, <https://orcid.org/0000-0002-5476-3025>

³ vfs@dscs.pro, <https://orcid.org/0000-0002-1666-2186>

Аннотация

Введение. Исследована возможность использования цифровых следов пользователей онлайн социальной сети, на примере тематики сообществ, для поддержки принятия решений в рамках профориентационной диагностики. **Метод.** Проведен статистический анализ: описательные статистики, z-критерий для сравнения двух групп и регрессионный анализ. В качестве цифровых следов пользователей проанализированы тематики подписок пользователей на различные сообщества, доступные в социальной сети, а также указанный в профиле пол респондента и количество друзей в социальной сети. Социально-профессиональная направленность личности оценена на основании результатов прохождения теста Голланда (под редакцией Г.В. Резапкиной). Выполнен поиск тенденций взаимосвязи между цифровыми следами пользователей, выраженными тематиками подписок, и ключевыми индикаторами социально-профессиональной направленности, отраженными в результатах теста Голланда, по данным пилотного исследования, проведенного с помощью приложения в онлайн социальной сети. **Основные результаты.** По результатам статистического анализа подтверждена гипотеза, что интересы пользователя, в виде тематик сообществ, взаимосвязаны с результатами теста Голланда. Доказаны гипотезы о существующих различиях в группах мужчин и женщин исследуемых признаков (результатов прохождения теста Голланда и ведущей тематики подписок на сообщества). При помощи регрессионного анализа среди группы женщин найдены взаимосвязи между преобладанием тематики сообществ «Образование» и ключевыми индикаторами: А (Художественный), Е (Предприимчивый), I (Интеллектуальный); преобладанием тематики «Стиль жизни» и выраженностью индикаторов: С (Конвенциональный), I, А, Е; «Средства массовой информации» и индикатором С. Среди группы мужчин была найдена взаимосвязь между преобладанием тематики «Спорт» и индикатором Е. **Обсуждение.** Результаты работы расширили пространство потенциальных предикторов профессиональной ориентации пользователей. Получена основа для проведения крупномасштабных исследований по квантификации и построению предиктивных моделей ключевых индикаторов профессий по тематикам подписок пользователей. Результаты могут быть использованы в направлении развития комплексного подхода к созданию рекомендательной системы для профессиональной ориентации пользователей.

Ключевые слова

профориентация, тест Голланда, профессиональные типы, выбор карьеры, социальные сети, анализ сообществ, интеллектуальная система, анализ цифровых следов

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта по государственному заданию Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» № FFZF-2022-0003 (проведение статистического анализа с применением критерия равенства пропорций для сравнения двух групп, регрессионный анализ); поддержана Санкт-Петербургским государственным университетом, проект № 75254082 (постановка задачи и гипотез исследования, обзор релевантных работ, описательные статистики).

© Хлобыстова А.О., Абрамов М.В., Столярова В.Ф., 2023

Ссылка для цитирования: Хлобystова А.О., Абрамов М.В., Столярова В.Ф. Исследование тенденций взаимосвязи между профориентационными предпочтениями пользователей и их цифровыми следами в социальной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 564–574. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-564-574

Exploring the possibility of predicting users' career guidance preferences based on analysis of community topics and the gender in the online social network users' profiles

Anastasia O. Khlobystova¹, Maxim V. Abramov²✉, Valerie F. Stoliarova³

^{1,2,3} St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

¹ St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

¹ aok@dscs.pro, <https://orcid.org/0000-0002-9811-5476>

² mva@dscs.pro✉, <https://orcid.org/0000-0002-5476-3025>

³ vfs@dscs.pro, <https://orcid.org/0000-0002-1666-2186>

Abstract

The possibility of using digital traces of online social network users, using community themes as an example, to support decision-making in career guidance diagnostics is investigated. Statistical analysis was performed: descriptive statistics, z-criterion for comparing two groups, and regression analysis. The themes of users' subscriptions to various communities available in the social network as well as the gender of the respondent and the number of friends in the social network indicated in the profile were analysed as digital user traces. The socio-professional orientation of the personality was assessed based on the results of the Holland test (edited by G.V. Rezapkina). The correlation between users' digital traces expressed by the themes of subscriptions, and key indicators of socio-professional orientation reflected in the results of the Holland test was analyzed based on the pilot study conducted through an online social networking application. The statistical analysis confirmed the hypothesis that user interests, in the form of community themes, are related to the results of the Holland test. The hypotheses of existing differences in the groups of men and women in the studied attributes (the results of the Holland test and the leading themes of community subscriptions) were proved. By means of regression analysis among the group of women the correlation was found between the prevalence of the community theme "Education" and the key indicators: A (Artistic), E (Enterprising), I (Intellectual); prevalence of the theme "Lifestyle" and severity of the indicators: C (Conventional), I, A, E; "Mass Media" and indicator C. Among the group of men, a correlation was found between the prevalence of "Sports" subject matter and indicator E. The results of the work expanded the space of potential predictors of users' vocational orientation. A foundation for large-scale research in quantifying and constructing predictive models of key occupational indicators based on users' subscription topics has been obtained. The results are useful in the direction of developing an integrated approach to creating a recommendation system for user career guidance.

Keywords

career guidance, Holland theory, RIASEC, vocational personality types, career path, online social networks, community analysis, intellectual system, digital footprint analysis

Acknowledgements

This work was carried out within the framework of the project under the state assignment of SPC RAS SPIRAS No. FFZF-2022-0003 (performing statistical analysis using Z-criterion to compare two groups, regression analysis); with the financial support of St. Petersburg State University, project No. 75254082 (statement of the research problem and hypotheses, review of relevant papers, descriptive statistics).

For citation: Khlobystova A.O., Abramov M.V., Stoliarova V.F. Exploring the possibility of predicting users' career guidance preferences based on analysis of community topics and the gender in the online social network users' profiles. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 564–574 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-564-574

Введение

Согласно исследованию Росстата¹ до 57 % выпускников вузов устраиваются на работу по специальностям, не связанным с полученным образованием, а каждый четвертый россиянин не любит свою работу².

При этом одной из ключевых карьерных ошибок является «неверный выбор профессии» (не соответствующий социально-профессиональной направленности личности)³. Таким образом, проблема профессионального самоопределения является острой на сегодняшний

¹ Рабочая сила, занятость и безработица в России (по результатам выборочных обследований рабочей силы). 2022. Стат. сб./Росстат. М., 2022. 151 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Rab_sila_2022.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 28.11.2022).

² Исследование показало, сколько россиян не любят свою работу [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/20220615/rabota-1795346061.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 28.11.2022).

³ Каждый восьмой россиянин считает своей главной карьерной ошибкой неправильный выбор профессии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://spb.superjob.ru/research/articles/113577/kazhdyj-vosmoj-rossiyanin-schitaet-svoej-glavnoj-karernoj-oshibkoj-nepravilnyj-vybor-professii/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 28.11.2022).

день. Традиционные подходы к решению обозначенной проблемы чаще всего основываются на консультациях с психологами или самостоятельном прохождении соискателем различных психологических тестов, ориентированных на его профессиональное самоопределение [1, 2]. Данные подходы наряду с преимуществами имеют недостатки: могут требовать существенных финансовых вложений; давать искаженный результат или быть неправильно интерпретированными. Отметим, что любое применение диагностических методик занимает большое время и может влиять на корректность конечного результата. Таким образом, актуален запрос на разработку эффективных подходов к профессиональной ориентации.

Проведен анализ современного состояния исследуемой области [3–28]. В результате не было обнаружено научных работ, в которых был бы осуществлен поиск связей между типом социально-профессиональной направленности и цифровыми следами пользователей, что подтвердило необходимость проведения настоящего исследования. Выявлена необходимость проверки гипотезы о том, что в качестве основного предиктора типа социально-профессиональной направленности личности могут выступать тематики подписок пользователей на различные сообщества, доступные в социальной сети «ВКонтакте». Выдвинутая гипотеза является новой и ранее в научных исследованиях не рассматривалась. Полномасштабное исследование, необходимое для построения предиктивной модели, в высокой степени ресурсозатратно, требует сбора большого набора данных, исследования зависимостей и построения модели. В связи с этим целесообразно провести пилотное исследование.

Цель работы — изучение тенденции взаимосвязи между цифровыми следами пользователей, выраженными тематиками подписок, и ключевыми индикаторами социально-профессиональной направленности, отраженными в результатах теста Голланда. Пилотное исследование выполнено с помощью приложения в онлайн социальной сети.

Научная новизна исследования заключается в расширении пространства потенциальных предикторов профессиональной ориентации пользователей. Теоретическая значимость — в развитии комплексного подхода, методов и моделей профессиональной ориентации пользователей через анализ их цифровых следов и последующего построения рекомендательной системы. Практическая значимость состоит в получении основы для проведения крупномасштабных исследований по квантификации и построению предиктивных моделей ключевых индикаторов профессий по тематикам подписок пользователей. Вместе с тем полученные результаты опосредованно вносят вклад в разработку практического инструментария, который направлен на снижение уровня безработицы и повышение уровня удовлетворенности жизнью посредством правильного выбора профессии.

Методы исследования

Одна из традиционных методик сопоставления психологического типа человека и его профессии

была предложена Дж. Голландом (модель RIASEC) [29]. Согласно теории Голланда, существует шесть типов личности и шесть профессиональных областей, с которыми данные типы личности соотносятся: R (Реалистичный), I (Интеллектуальный), A (Художественный), S (Социальный), E (Предприимчивый), C (Конвенциональный). Модель RIASEC адаптирована и локализована известным российским специалистом по вопросам профессионального самоопределения Г.В. Резапкиной [30]. В ходе прохождения теста Голланда респонденту необходимо было представить, что он обладает универсальными способностями и профессиональными навыками, и предложен список профессий, разбитых на пары. В каждой из пар необходимо выбрать профессию, которая кажется респонденту наиболее привлекательной. При этом каждая профессия сопоставлена одному из шести типов Голланда. Для получения результатов выполнен подсчет, сколько раз респондент выбрал профессию, относящуюся к тому или иному типу. Количество набранных баллов может быть разделено на следующие категории типов: 7–10 — ярко выраженный; 4–6 — средневыраженный; 0–3 — не выражен. Рассмотрим один ключевой индикатор социально-профессиональной направленности личности, т. е. тот тип, который набрал наибольшее число баллов.

Описание набора данных. Данные собраны на основании опроса, размещенного в веб-приложении на базе сервиса VK Mini Apps — «Психологические тесты»¹. На момент анализа результатов исследования тест Голланда прошли 2073 респондента. Тест мог пройти любой желающий, при этом программа собирала обезличенную информацию из аккаунта пользователей. В ходе предобработки данных были удалены незавершенные прохождения теста, а также закрытые аккаунты, из которых невозможно извлечь цифровые следы респондентов. В результате предобработки объем выборки сократился до 1237. Фрагмент полученного набора данных представлен в табл. 1, который состоит из: результатов прохождения теста Голланда: 6 типов личности A, C, E, I, R, S, находящихся в диапазоне от 0 до 13 (метрические переменные); информации о поле (1 — женский, 2 — мужской), указанном в профиле респондента (бинарная переменная); информацию о числе друзей в профиле (метрическая переменная); 28 переменных, соответствующих количеству категорий тематик сообществ «ВКонтакте», на которые подписан пользователь (метрические переменные).

Тест Голланда предполагает системную интерпретацию выраженности всех типов социально-профессиональной направленности личности. В рамках данной работы выбран один тип личности, который набрал наибольшее число баллов. Такой тип для каждого респондента назовем ключевым индикатором профессии, который определен на этапе предварительного

¹ Приложение «Психологические тесты» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://vk.com/services?w=app7794698_203437876, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 25.11.2022).

Таблица 1. Фрагмент анализируемого набора данных

Table 1. Fragment of the analyzed data set

User_id	Типы личности						Пол	Количество друзей	Категории тематик сообществ «ВКонтакте»						
	A	C	E	I	R	S	sex	friends	auto	domestic services	cities & countries	...	hobby	connection serv	finance
1	5	6	6	4	10	11	2	137	1	0	0	...	3	0	1
2	9	7	11	3	7	5	1	22	3	0	9	...	8	0	12
3	8	6	6	7	9	6	1	24	0	0	9	...	1	0	0
4	7	11	4	5	7	8	2	287	0	2	8	...	25	0	7
5	7	2	10	8	7	8	2	404	1	0	5	...	11	0	1

анализа данных. Выполним анализ различия ключевых индикаторов профессии в гендерных группах и их взаимосвязь с ведущими тематиками среди подписок пользователей.

Основные результаты

Определение ведущих тематик сообществ. Сообщества в социальной сети «ВКонтакте» могут быть созданы по более чем 100 различным тематикам, которые разбиты на 28 укрупненных категорий. Например, категория «Дом, ремонт» включает такие тематики как «Дизайн интерьера», «Садоводство», «Строительство, ремонт». Для проведения анализа по каждому пользователю определим число подписок на сообщества по укрупненным категориям. В дальнейшем для простоты изложения текста отождествим понятия «тематика» и «укрупненная категория», подразумеваемая последнее. Для каждого пользователя определим *ведущую тематику*, которой посвящено наибольшее число подписок. Например, если из 28 рассматриваемых категорий у респондента 30 подписок на сообщества, относящиеся к категории «Красота и здоровье», 17 — «Медицина» и 5 — «Социальные организации», то ведущей для этого пользователя является категория «Красота и здоровье».

При проведении анализа данных выявлено, что для подавляющего числа респондентов (929 наблюдений) ведущими тематиками являются «Хобби» и «Развлечения». Отметим, что эти темы — зонтичные, включают в себя различные области повседневной жизни и во многом пересекаются с остальными тематиками. В итоге для пользователя выбирается ведущая тематика, имеющая наибольшее число подписок, кроме категорий «Хобби» и «Развлечения». Для описания сферы интереса респондентов сформируем две новые переменные: *isEnt* — бинарная переменная, принимающая истинное значение, если у пользователя ведущей тематикой являлось «Хобби» или «Развлечения»; *mainint* — категориальная переменная, определяющая основную тематику сообществ респондента, за исключением «Хобби» или «Развлечения».

Объединим малочисленные категории среди тематик, представляющих значения переменной *mainint*. Результат объединения представлен в табл. 2, объединенные тематики выделены жирным шрифтом.

Построим диаграмму размаха для исследуемых характеристик (рис. 1). При визуальном анализе диаграммы видно, что отдельные тематики ассоциированы с определенными профессиями. Численный анализ взаимосвязи ключевых индикаторов профессии и ведущих тематик осуществлен в рамках гендерных групп, указанных в профиле пользователя. Большая часть пользователей выборки отметили свой пол как женский (836 респондентов из 1237). Отметим, что соответствие указанного в профиле пола реальному полу пользователя онлайн социальной сети требует дополнительного анализа.

Далее проведем анализ, состоящий из двух этапов: исследуем статистические различия в ключевых индикаторах профессии и ведущих тематиках между группами мужчин и женщин; построим статистические регрессионные модели, позволяющие оценить качество взаимосвязи с учетом контекста, который отражает иные факторы, оказывающие влияние на результаты профориентационного теста. В настоящей работе контекстом выступают индикатор «Развлечения/Хобби», как первичной ведущей тематики, и число друзей пользователя в онлайн социальной сети.

Сравнение пропорций исследуемых признаков в группах мужчин и женщин. В рамках общей цели работы рассмотрим две статистические гипотезы:

- H1: ключевой тип социально-профессиональной направленности и пол независимы;
- H2: ведущая тематика сообществ и пол независимы.

Критерий проверки равенства пропорций используем для исследования гипотез H1 и H2. Сравнение пропорций, значения статистики критерия и соответствующее р-значение представлены в табл. 3 и 4.

Проведенный анализ не позволяет принять гипотезу H1 на уровне значимости 0,1, и, таким образом, можно говорить о взаимосвязи пола и ключевых индикаторов профессии. Среди мужчин, принявших участие в опросе, чаще в качестве ключевого типа профессионально-социальной направленности, встречаются E, R, при этом последний встречается наиболее часто; среди результатов женщин преобладают типы A и C.

Анализ ведущих предпочтений (тематик сообществ) не позволяет принять гипотезу H2 на уровне значимости 0,1. Можно сказать, что женщины более склонны к участию в сообществах с тематиками «Образование», «Домашнее хозяйство», «Образ жизни», а мужчины

Таблица 2. Сведения о ведущих тематиках респондентов
Table 2. Information on the leading themes of the respondents

Название переменной	Категории тематик, отнесенные к переменной	Число респондентов, для которых тематика ведущая
auto (спорт)	Авто, мото (auto) Спорт (sport)	78
lifestyle (образ жизни)	Красота, здоровье (beauty_health) Отношения, семья (relations) Медицина (medicine) Рестораны (restaurants)	261
cities (путешествия)	Города, страны (cities_countries) Туризм, путешествия и отдых (tourism)	77
computer_internet (цифровые технологии)	Компьютер, интернет	146
culture (искусство)	Культура, искусство (culture) Музыка (music)	70
education (образование)	Образование Финансы и страхование (finance)	168
household (домашнее хозяйство)	Животные (animals) Кулинария, рецепты (cooking_recipes) Дом, ремонт (house_repair) Профессиональные услуги (prof_service)	74
mass_media (средства массовой информации (СМИ))	СМИ (mass_media) Персоны (person) Социальные и общественные организации (social_orgs)	252
people_groups (группы по интересам)	Объединения, группы людей	52
shops (магазины)	Товары, магазины	43

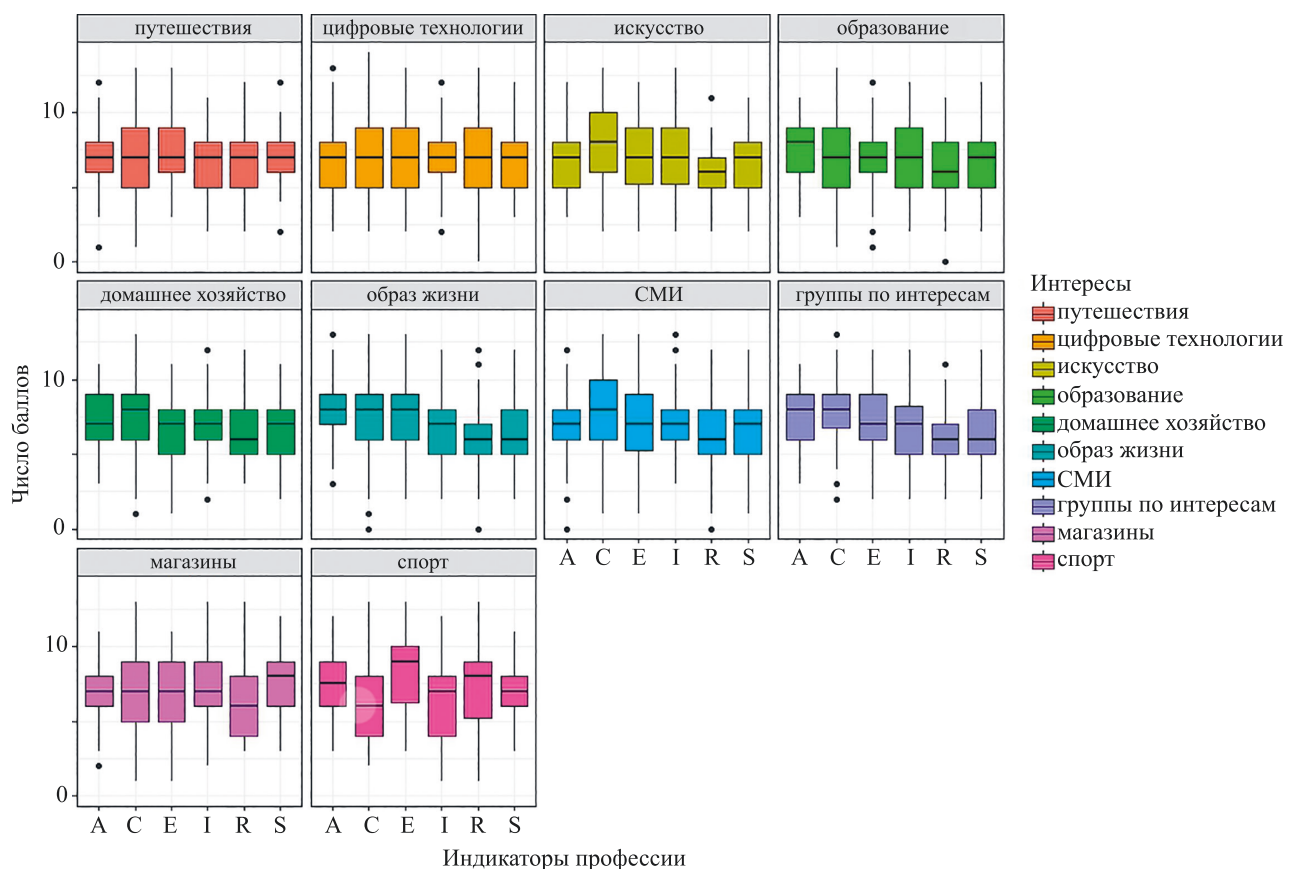


Рис. 1. Распределение индикаторов профессий по ведущим тематикам пользователей

Fig. 1. Distribution of occupational indicators by leading user topics

Таблица 3. Сравнение пропорций ключевых индикаторов в группах мужчин и женщин

Table 3. Comparison of the proportions of key indicators in groups of men and women

Наименование показателя	Ключевые индикаторы					
	A	C	E	I	R	S
Женский пол в профиле	0,17	0,29	0,17	0,2	0,09	0,08
Мужской пол в профиле	0,13	0,13	0,24	0,16	0,25	0,1
Значение статистики критерия	3,48 (1 df)	38,03 (1 df)	8,17 (1 df)	2,66 (1 df)	57,93 (1 df)	0,27 (1 df)
P-value	0,06	<0,05	<0,05	0,1	<0,05	0,61

Таблица 4. Сравнение ведущих тематик в группах мужчин и женщин

Table 4. Comparison of leading themes in groups of men and women

Ведущая тематика	Наименование показателя			
	Женский пол в профиле	Мужской пол в профиле	Значение chi-sq	P-value
Путешествия (cities)	0,07	0,05	0,51	0,47
Цифровые технологии (computer_internet)	0,06	0,25	84,26	<0,05
Культура (culture)	0,05	0,07	0,81	0,37
Образование (education)	0,16	0,09	12,23	<0,05
Домашнее хозяйство (household)	0,07	0,03	6,49	<0,05
Образ жизни (lifestyle)	0,3	0,03	107,16	<0,05
СМИ (mass_media)	0,18	0,25	7,41	<0,05
Группы по интересам (people_groups)	0,06	0,02	9,16	<0,05
Магазины (shops)	0,04	0,03	0,48	0,49
Спорт (sport)	0,01	0,18	121,92	<0,05

интересуются сообществами: «Цифровые технологии», «СМИ», «Спорт».

На следующем этапе анализа выполним построение регрессионных моделей. Модели позволят внутри каждой гендерной группы установить силу взаимосвязи между ключевыми индикаторами профессии и ведущими тематиками с учетом иных факторов, которые могут оказывать влияние на результаты проведения профориентационного тестирования.

Взаимосвязь ключевых индикаторов профессии и ведущих тематик по указанному в профиле пользователя социальной сети полу. В силу ограниченности числа наблюдений (836 женщин и 385 мужчин) и большого числа рассматриваемых ведущих тематик (10), в модель включим только следующие переменные: зависимые — ключевые индикаторы профессии (bestprof); независимые — переменную, отражающую ведущую тематику среди подписок респондента (education, lifestyle, mass_media, household, shops, computer_internet, cities, people_groups, culture, sport), переменную, показывающую является ли хобби или развлечения первостепенной ведущей тематикой (isEnt) и число друзей (friends).

Для квантификации взаимосвязи подгоним модели мультиномиальной логистической регрессии [31], которые представляют обобщение метода логистической регрессии на класс задач мультиномиальной классификации, где зависимая переменная представляет собой дискретную переменную с несколькими взаимоисключающими категориями.

В результате были подогнаны два набора моделей мультиномиальной регрессии, согласно указанному в профиле пользователя полу.

Значимость коэффициента при той или иной переменной определим согласно критерию отношения правдоподобия, который направлен на сравнение правдоподобий (likelihood) текущей модели с редуцированной, без рассматриваемой переменной.

Респонденты, у которых указан женский пол.

Для подгонки мультиномиальной регрессии используем пакет nnet [32] среды обработки данных R. На рис. 2 показаны графики зависимости вероятностей определенного индикатора профессии от рассматриваемых факторов (для каждой ведущей тематики отдельно). Полученные коэффициенты мультиномиальной логистической регрессии представлены по ссылке¹.

Отметим, что в нескольких категориях (culture, people_groups, shops, sport) выполнено небольшое число наблюдений, поэтому при построении регрессионных моделей они исключены из рассмотрения.

В результате анализа видно, что вероятность наличия ключевых индикаторов профессий C и I возрастает по сравнению с наличием индикатора A, при условии, что ведущая тематика респондента — «СМИ».

¹ Результаты мультиномиальной логистической регрессии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dsos.pro/materialy-po-proektam/rezultaty-issledovaniya-proforiyentatsiya/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 17.01.2023).

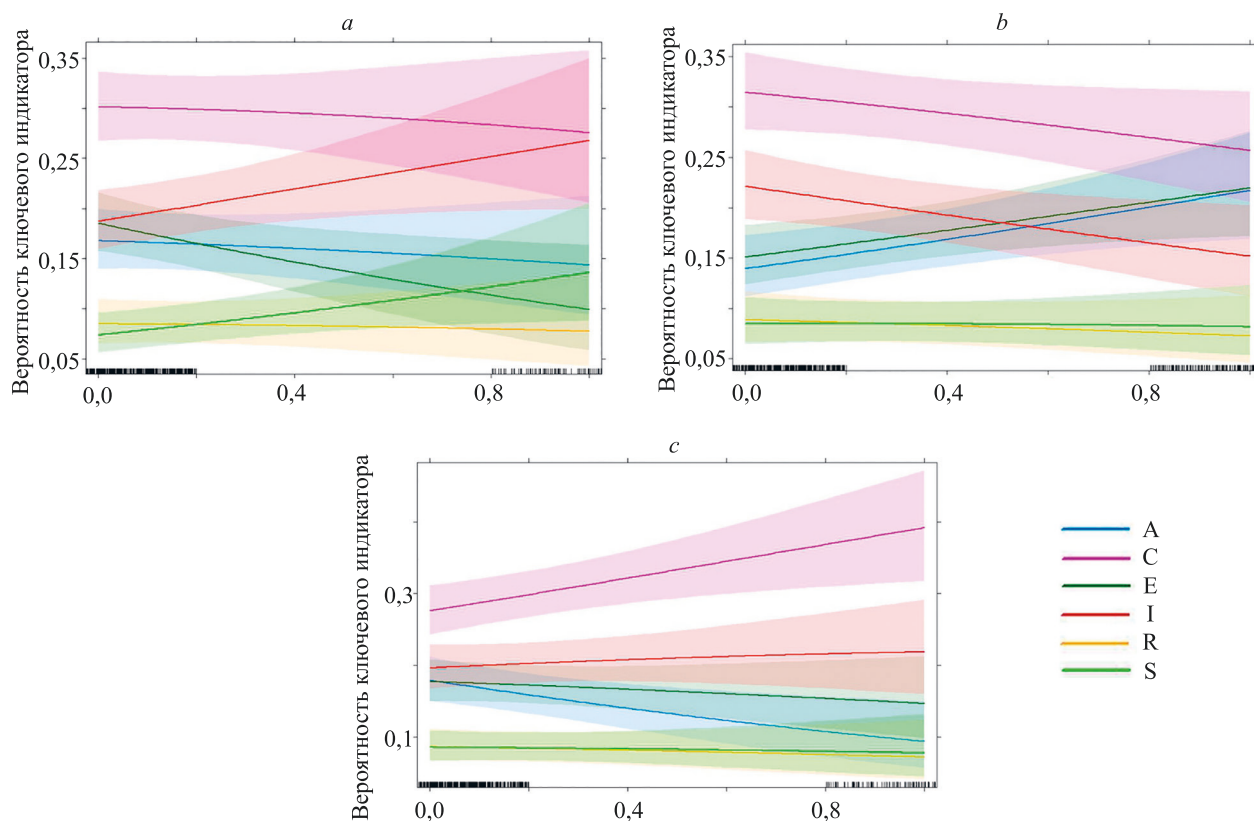


Рис. 2. Зависимости вероятностей наличия ключевых индикаторов профессии в результатах теста Голланда от наличия определенной ведущей тематики для респондентов, у которых указан женский пол в профиле: «Образование» (a); «Образ жизни» (b), «СМИ» (c)

Fig. 2. Dependencies of the probabilities of the presence of key occupational indicators in the results of the Holland test vs. the presence of a certain leading theme for respondents with a female gender in their profile: "Education" (a); "Lifestyle" (b), "Media" (c)

Если ведущая тематика — «Образ жизни», то вероятность наличия ключевых индикаторов C, I, R в результатах прохождения теста Голланда снижается, а если — «Образование», то вероятность индикатора S — повышается. Отметим, что увеличение числа друзей повышает вероятность в тесте ключевых индикаторов

профессии C, E, S по сравнению с вероятностью ключевого индикатора A.

Респонденты, у которых указан мужской пол.

Так как респондентов, у которых указан мужской пол, небольшое количество, то при построении регрессионных моделей используем только категории mass_media,

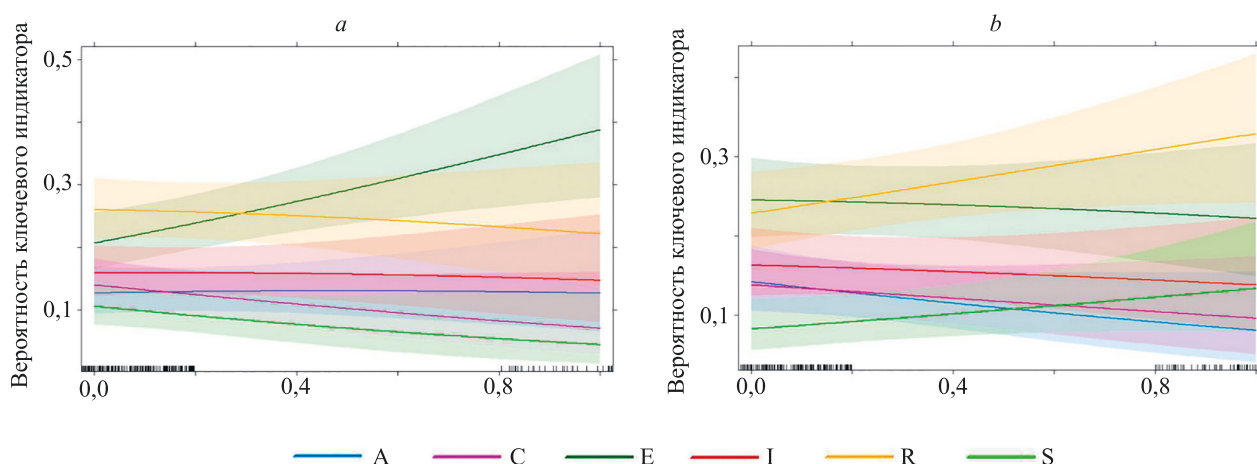


Рис. 3. Зависимости вероятностей наличия ключевых индикаторов профессии в результатах теста Голланда от ведущей тематики для респондентов, у которых указан мужской пол в профиле «Спорт» (a) и «Цифровые технологии» (b)

Fig. 3. Dependencies of the probabilities of the presence of key occupational indicators in Holland's test results vs. the leading theme for respondents who have a male gender in the profile "Sport" (a) and "Digital Technology" (b)

computer_internet и sport. Проведенный анализ показал, что наличие ведущей тематики «Спорт» увеличивает вероятность ключевого индикатора профессии E по сравнению с индикатором A в результатах теста Голланда у лиц, отметивших свой пол как мужской в профиле онлайн социальной сети (рис. 3, а). Наличие ведущей тематики «Цифровые технологии» увеличивает вероятность наличия ключевых индикаторов профессии R и S по сравнению с индикатором A (рис. 3, б), а наличие ведущей тематики «СМИ» увеличивает вероятность наличия ключевого индикатора C.

Выводы и обсуждение

По результатам статистического анализа была подтверждена гипотеза, что интересы пользователя, выражаемые в виде тематик сообществ, на которые он подписан в социальной сети «ВКонтакте», взаимосвязаны с результатами теста Голланда.

Отметим, что как ключевые индикаторы профессии, так и ведущие тематики имеют различия по полу (указанному в профиле онлайн социальной сети). Респонденты с указанным в аккаунте женским полом больше интересуются сообществами с тематиками «Образование», «Домашнее хозяйство», «Образ жизни», «Группы по интересам», с мужским полом — чаще имеют ведущую тематику «Цифровые технологии», «СМИ», «Спорт». Женщины более склонны иметь ключевые индикаторы профессии A и C, а мужчины — E и R. В силу небольшого числа наблюдений, а также, так как пол человека является важнейшим фактором, влияющим на проявление личностных особенностей, взаимосвязь ключевых индикаторов профессий и ведущих тематик рассмотрена отдельно по гендерным группам. Построение моделей мультимодальной регрессии показало следующие взаимосвязи. Для респондентов, у которых указан женский пол в профиле социальной сети, статистически значимую взаимосвязь удалось выявить между ведущей тематикой «Образование» и ключевым индикатором профессии S, тематикой «Образ жизни» и индикаторами C, I, R, тематикой «СМИ» и индикатором C. Кроме того, в этой группе статистически значимой является переменная, отражающая число друзей в профиле: увеличение числа друзей ведет к росту вероятности ключевых индикаторов профессии C, E, S в результатах теста Голланда.

Для группы мужчин не прослеживается подобной взаимосвязи ключевых индикаторов профессии с числом друзей. Кроме того, присутствует и иная картина ведущих тематик: в подавляющем большинстве случаев это или «СМИ», или «Спорт», или «Цифровые технологии». Была выявлена взаимосвязь тематики «Спорт» с ключевым индикатором профессии E, тематики «Цифровые технологии» с индикаторами R и S, тематики «СМИ» с ключевым индикатором C.

К ограничениям проведенного исследования относятся способ сбора данных, так как свободный доступ респондентов к приложению не позволяет оценить истинные характеристики выборки и определить подгруппу популяции, для которой получены результаты.

Кроме того, из-за малого количества наблюдений ряд ведущих тематик пришлось исключить из рассмотрения. Однако эта особенность может быть разрешена посредством рассмотрения иных способов моделирования, например, байесовского подхода к анализу данных за счет комбинирования информации из различных источников: статистической, экспертной и результатов предварительных исследований. Важной характеристикой таких моделей также является возможность обучения при поступлении новой информации, что позволит учитывать в финальных оценках статистической взаимосвязи исследуемых переменных новые результаты прохождения тестирований. Байесовская сеть доверия в данном случае будет представлена двумя взаимосвязанными блоками: блок аспектов социально-профессиональной направленности личности, отраженный в результатах теста Голланда (в том числе с учетом рангов всех шести измерений) и блок цифровых следов пользователя, включающий несколько ведущих тематик сообществ, пол, возраст, число друзей и другие. Таким образом, байесовские методы могут помочь смягчить проблему небольшого объема выборки, однако не отменяют необходимости проведения более масштабного исследования, направленного на построение предсказательной модели, осмысленность которого подтверждается в настоящей работе.

Также открытым вопросом исследования является и то, что профессиональные типы в чистом виде не встречаются [29, 30], т. е. можно говорить о ключевом типе социально-профессиональной направленности личности, что, в свою очередь, в дальнейшем позволит строить предположения о наиболее подходящей сфере деятельности. Вместе с тем для сужения области профессиональных интересов важно также рассмотреть выраженность второ- и третьестепенных индикаторов. Данный факт планируется учесть в дальнейших исследованиях, а именно, будет рассмотрен не один ключевой тип социально-профессиональной направленности, а совокупно нескольких преобладающих. Кроме того, для подтверждения результатов исследования в дальнейшем планируется расширить объем выборки и количество независимых переменных в модели мультиномиальной регрессии, в частности, такого рода увеличение числа переменных может основываться на восстановленной информации о профиле в социальных сетях: возрасте [33], интенсивности поведения [34], а также учитывать фактор влияния друзей и родственников пользователя [24, 25, 35].

Заключение

Изучены тенденции взаимосвязи между цифровыми следами пользователей, выраженными тематиками подписок, и ключевыми индикаторами социально-профессиональной направленности, отраженными в результатах теста Голланда, по данным пилотного исследования, проведенного с помощью приложения в онлайн социальной сети. При проведении исследования подтверждена гипотеза о том, что интересы пользователя, выраженные в виде тематик сообществ, на которые

он подписан в онлайн социальной сети, взаимосвязаны с результатами теста Голланда, т. е. могут выступать предикторами социально-профессиональной направленности личности. Полученные результаты позволили подтвердить целесообразность апробации примененных методик к более широкомасштабной выборке, а также учесть ряд тонких моментов при дизайне подобного рода исследования, в том числе сбор большего числа социально-демографических характеристик для определения подгруппы популяции и привлечение экспертов для укрупнения тематик сообществ. Результаты работы указали на наиболее перспективные направления исследований для определения взаимосвязи между интересами пользователей онлайн социальной сети и проявлениями типов социально-профессиональной направленности личности.

Проблема, рассмотренная в настоящей работе, отвечает одному из основных направлений научно-технологического развития Российской Федерации — «Созданию возможностей для выявления талантливой молодежи и построения успешной карьеры в области науки, технологий и инноваций, развитие интеллектуального потенциала страны»¹. Выполненное исследование дает основу для последующих разработок, ориентированных на снижение уровня безработицы и повышение уровня удовлетворенности жизнью посредством правильного своевременного выбора профессии.

¹ Кадры и человеческий капитал [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://xn--mlagf.xn--plai/ways/kadry-i-chelovecheskiy-kapital/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 28.11.2022).

Литература

1. Xie D., Cobb C.L. Career and vocational interests and abilities, assessment of // *The Wiley Encyclopedia of Personality and Individual Differences: Models and Theories*. 2020. P. 493–497. <https://doi.org/10.1002/9781118970843.ch152>
2. Malik-Liévano B., Álvarez-González B., Sánchez-García M.F., Irving B.A. *International Perspectives on Research in Educational and Career Guidance*. Springer Cham, 2020. 173 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26135-1>
3. Bogacheva E., Tatarenko F., Smetannikov I. Predicting vocational personality type from socio-demographic features using machine learning methods // *CCRIS '20: Proc. of the 2020 1st International Conference on Control, Robotics and Intelligent System*. 2020. P. 93–98. <https://doi.org/10.1145/3437802.3437819>
4. Сербина Г.Н., Мацута В.В., Гойко В.Л. Анализ связи психологических характеристик пользователей социальной сети "ВКонтакте" с подписками на сообщества с девиантным контентом // Вестник Томского государственного университета. 2021. № 467. С. 164–169. <https://doi.org/10.17223/15617793/467/20>
5. Мацута В.В., Гойко В.Л., Фещенко А.В., Уляков М.А., Петров Е.Ю. Платформа психологической диагностики с авторизацией респондентов в социальной сети "ВКонтакте". Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021612933. Бюл. 2021. № 3.
6. Dağıstanlı Ö., Erbay H., Kör H., Yurttakal A.H. Reflection of people's professions on social media platforms // *Neural Computing and Applications*. 2023. V. 35. N 7. P. 5575–5586. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07987-8>
7. Van Huizen P., Mason R., Williams B. Exploring paramedicine student preferences using Holland's vocational theory: a cross-sectional study // *Nursing & Health Sciences*. 2021. V. 23. N 4. P. 818–824. <https://doi.org/10.1111/nhs.12870>
8. Ding Y., Wang Q., Hourieh N., Yu Q. Vocational personality types in college engineering students in relation to academic achievement // *Journal of Employment Counseling*. 2020. V. 57. N 1. P. 27–47. <https://doi.org/10.1002/joec.12136>
9. Earl J., Iskandar F., Elizondo F. Take a job, any job: Exploring the importance of matched interests to career paths and work satisfaction // *Journal of Employment Counseling*. 2019. V. 56. N 1. P. 33–45. <https://doi.org/10.1002/joec.12101>
10. Gunawardena A.D.A., Meyer R.R., Kularatna T., Samaranyake S., Gunawardena R.H. Interest-aligned system for college degree planning and career path selection // *SN Computer Science*. 2022. V. 3. N 3. P. 221. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01107-y>
11. Su J.-H., Liao Y.-W., Xu J.-Z., Zhao Y.-W. A personality-driven recommender system for cross-domain learning based on Holland code assessments // *Sustainability*. 2021. V. 13. N 7. P. 3936. <https://doi.org/10.3390/su13073936>
12. Shminan A.S., Choi L.J., Barawi M.H., Hashim W.N.W., Andy H. InVesa 1.0: The conceptual framework of interactive virtual academic advisor system based on psychological profiles // *Proc. of the 13th International Conference on Information & Communication*

References

1. Xie D., Cobb C.L. Career and vocational interests and abilities, assessment of. *The Wiley Encyclopedia of Personality and Individual Differences: Models and Theories*, 2020, pp. 493–497. <https://doi.org/10.1002/9781118970843.ch152>
2. Malik-Liévano B., Álvarez-González B., Sánchez-García M.F., Irving B.A. *International Perspectives on Research in Educational and Career Guidance*. Springer Cham, 2020, 173 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26135-1>
3. Bogacheva E., Tatarenko F., Smetannikov I. Predicting vocational personality type from socio-demographic features using machine learning methods. *CCRIS '20: Proc. of the 2020 1st International Conference on Control, Robotics and Intelligent System*, 2020, pp. 93–98. <https://doi.org/10.1145/3437802.3437819>
4. Serbina G.N., Matsuta V.V., Goiko V.L. Analysis of the relationship between VK users' psychological characteristics and subscriptions to communities with deviant content. *Tomsk State University Journal*, 2021, no. 467, pp. 164–169. (in Russian). <https://doi.org/10.17223/15617793/467/20>
5. Matcuta V.V., Goiko V.L., Feshchenko A.V., Uliakov M.A., Petrov E. Yu. Platform for psychological diagnostics with authorization of respondents in the social network "VKontakte". *Certificate of the state computer program registration 2021612933*. 2021. (in Russian)
6. Dağıstanlı Ö., Erbay H., Kör H., Yurttakal A.H. Reflection of people's professions on social media platforms. *Neural Computing and Applications*, 2023, vol. 35, no. 7, pp. 5575–5586. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07987-8>
7. Van Huizen P., Mason R., Williams B. Exploring paramedicine student preferences using Holland's vocational theory: a cross-sectional study. *Nursing & Health Sciences*, 2021, vol. 23, no. 4, pp. 818–824. <https://doi.org/10.1111/nhs.12870>
8. Ding Y., Wang Q., Hourieh N., Yu Q. Vocational personality types in college engineering students in relation to academic achievement. *Journal of Employment Counseling*, 2020, vol. 57, no. 1, pp. 27–47. <https://doi.org/10.1002/joec.12136>
9. Earl J., Iskandar F., Elizondo F. Take a job, any job: Exploring the importance of matched interests to career paths and work satisfaction. *Journal of Employment Counseling*, 2019, vol. 56, no. 1, pp. 33–45. <https://doi.org/10.1002/joec.12101>
10. Gunawardena A.D.A., Meyer R.R., Kularatna T., Samaranyake S., Gunawardena R.H. Interest-aligned system for college degree planning and career path selection. *SN Computer Science*, 2022, vol. 3, no. 3, pp. 221. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01107-y>
11. Su J.-H., Liao Y.-W., Xu J.-Z., Zhao Y.-W. A personality-driven recommender system for cross-domain learning based on Holland code assessments. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 7, pp. 3936. <https://doi.org/10.3390/su13073936>
12. Shminan A.S., Choi L.J., Barawi M.H., Hashim W.N.W., Andy H. InVesa 1.0: The conceptual framework of interactive virtual academic advisor system based on psychological profiles. *Proc. of the 13th International Conference on Information & Communication*

- Technology and System (ICTS). 2021. P. 112–117. <https://doi.org/10.1109/ICTS52701.2021.9608182>
13. Usslepp N., Hübner N., Stoll G., Spengler M., Trautwein U., Nagengast B. RIASEC interests and the Big Five personality traits matter for life success—But do they already matter for educational track choices? // *Journal of Personality*. 2020. V. 88. N 5. P. 1007–1024. <https://doi.org/10.1111/jopy.12547>
14. Cioca L.-I., Bratu M.L. Sustainability of youth careers in Romania—Study on the correlation of students' personal interests with the selected university field of study // *Sustainability*. 2020. V. 13. N 1. P. 229. <https://doi.org/10.3390/su13010229>
15. Ethan Daphne C., Stanley M., Augustine V., Anggreainy M.S., Setiawan A.S. Developing an application to recommend major based on personality test using waterfall method // *Proc. of the 5th International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE)*. 2022. P. 220–224. <https://doi.org/10.1109/IC2IE56416.2022.9970189>
16. Rocconi L.M., Liu X., Pike G.R. The impact of person-environment fit on grades, perceived gains, and satisfaction: an application of Holland's theory // *Higher Education*. 2020. V. 80. N 5. P. 857–874. <https://doi.org/10.1007/s10734-020-00519-0>
17. Sharma S., Behl R. Analysing the impact of social media on students' academic performance: A comparative study of extraversion and introversion personality // *Psychological Studies*. 2022. V. 67. N 4. P. 549–559. <https://doi.org/10.1007/s12646-022-00675-6>
18. Gonçalves A.P., Martins G.H., Salvador A.P., Machado G.M., Carvalho L.D.F., Ambiel R.A.M. Career adaptability and associations with personality traits and pathological traits utilizing network analysis // *International Journal for Educational and Vocational Guidance*. 2021. V. 21. N 2. P. 379–394. <https://doi.org/10.1007/s10775-020-09448-x>
19. Kircaburun K., Alhabash S., Tosuntaş Ş.B., Griffiths M.D. Uses and gratifications of problematic social media use among university students: A simultaneous examination of the Big Five of personality traits, social media platforms, and social media use motives // *International Journal of Mental Health and Addiction*. 2020. V. 18. N 3. P. 525–547. <https://doi.org/10.1007/s11469-018-9940-6>
20. Dandannavar P.S., Mangalwede S.R., Kulkarni P.M. Predicting the primary dominant personality trait of perceived leaders by mapping linguistic cues from social media data onto the big five model // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. V. 1141. P. 417–428. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3383-9_37
21. Biswas K., Shivakumara P., Pal U., Lu T. A new ontology-based multimodal classification system for social media images of personality traits // *Signal, Image and Video Processing*. 2023. V. 17. N 2. P. 543–551. <https://doi.org/10.1007/s11760-022-02259-3>
22. Hoff K.A., Chu C., Einarsdóttir S., Briley D.A., Hanna A., Rounds J. Adolescent vocational interests predict early career success: Two 12-year longitudinal studies // *Applied Psychology*. 2022. V. 71. N 1. P. 49–75. <https://doi.org/10.1111/apps.12311>
23. Oliveira Í.M., Porfeli E.J., do Céu Taveira M., Lee B. Children's career expectations and parents' jobs: intergenerational (dis)continuities // *The Career Development Quarterly*. 2020. V. 68. N 1. P. 63–77. <https://doi.org/10.1002/cdq.12213>
24. Banov K., Krapic N., Kardum I. Do vocational interests matter for the selection of romantic partners? Evidence from variable- and couple-centered approaches // *Applied Psychology*. 2023. V. 72. N 2. P. 697–717. <https://doi.org/10.1111/apps.12396>
25. Mayrand K., Sabourin S., Savard C. Vocational personality in romantic relationships: how vocational similarity contributes to couple functioning // *Contemporary Family Therapy*. 2023. V. 45. N 2. P. 172–185. <https://doi.org/10.1007/s10591-021-09620-7>
26. Kim J., Park D., Shin Y.J. Friendship dynamics of career decision-making self-efficacy: a longitudinal social network approach // *Current Psychology*. 2022. in press. <https://doi.org/10.1007/s12144-022-03887-1>
27. Song Q.C., Shin H.J., Tang C., Hanna A., Behrend T. Investigating machine learning's capacity to enhance the prediction of career choices // *Personnel Psychology*. 2022. in press. <https://doi.org/10.1111/peps.12529>
28. José-García A., Sneyd A., Melro A., Ollagnier A., Tarling G., Zhang H., Stevenson M., Everson R., Arthur R. C3-IoC: A career guidance system for assessing student skills using machine learning and network visualisation // *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. 2022. in press. <https://doi.org/10.1007/s40593-022-00317-y>
- Technology and System (ICTS), 2021, pp. 112–117. <https://doi.org/10.1109/ICTS52701.2021.9608182>
13. Usslepp N., Hübner N., Stoll G., Spengler M., Trautwein U., Nagengast B. RIASEC interests and the Big Five personality traits matter for life success—But do they already matter for educational track choices? // *Journal of Personality*, 2020, vol. 88, no. 5, pp. 1007–1024. <https://doi.org/10.1111/jopy.12547>
14. Cioca L.-I., Bratu M.L. Sustainability of youth careers in Romania—Study on the correlation of students' personal interests with the selected university field of study. *Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 229. <https://doi.org/10.3390/su13010229>
15. Ethan Daphne C., Stanley M., Augustine V., Anggreainy M.S., Setiawan A.S. Developing an application to recommend major based on personality test using waterfall method. *Proc. of the 5th International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE)*, 2022, pp. 220–224. <https://doi.org/10.1109/IC2IE56416.2022.9970189>
16. Rocconi L.M., Liu X., Pike G.R. The impact of person-environment fit on grades, perceived gains, and satisfaction: an application of Holland's theory. *Higher Education*, 2020, vol. 80, no. 5, pp. 857–874. <https://doi.org/10.1007/s10734-020-00519-0>
17. Sharma S., Behl R. Analysing the impact of social media on students' academic performance: A comparative study of extraversion and introversion personality. *Psychological Studies*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 549–559. <https://doi.org/10.1007/s12646-022-00675-6>
18. Gonçalves A.P., Martins G.H., Salvador A.P., Machado G.M., Carvalho L.D.F., Ambiel R.A.M. Career adaptability and associations with personality traits and pathological traits utilizing network analysis. *International Journal for Educational and Vocational Guidance*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 379–394. <https://doi.org/10.1007/s10775-020-09448-x>
19. Kircaburun K., Alhabash S., Tosuntaş Ş.B., Griffiths M.D. Uses and gratifications of problematic social media use among university students: A simultaneous examination of the Big Five of personality traits, social media platforms, and social media use motives. *International Journal of Mental Health and Addiction*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 525–547. <https://doi.org/10.1007/s11469-018-9940-6>
20. Dandannavar P.S., Mangalwede S.R., Kulkarni P.M. Predicting the primary dominant personality trait of perceived leaders by mapping linguistic cues from social media data onto the big five model. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1141, pp. 417–428. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3383-9_37
21. Biswas K., Shivakumara P., Pal U., Lu T. A new ontology-based multimodal classification system for social media images of personality traits. *Signal, Image and Video Processing*, 2023, vol. 17, no. 2, pp. 543–551. <https://doi.org/10.1007/s11760-022-02259-3>
22. Hoff K.A., Chu C., Einarsdóttir S., Briley D.A., Hanna A., Rounds J. Adolescent vocational interests predict early career success: Two 12-year longitudinal studies. *Applied Psychology*, 2022, vol. 71, no. 1, pp. 49–75. <https://doi.org/10.1111/apps.12311>
23. Oliveira Í.M., Porfeli E.J., do Céu Taveira M., Lee B. Children's career expectations and parents' jobs: intergenerational (dis)continuities. *The Career Development Quarterly*, 2020, vol. 68, no. 1, pp. 63–77. <https://doi.org/10.1002/cdq.12213>
24. Banov K., Krapic N., Kardum I. Do vocational interests matter for the selection of romantic partners? Evidence from variable- and couple-centered approaches. *Applied Psychology*, 2023, vol. 72, no. 2, pp. 697–717. <https://doi.org/10.1111/apps.12396>
25. Mayrand K., Sabourin S., Savard C. Vocational personality in romantic relationships: how vocational similarity contributes to couple functioning. *Contemporary Family Therapy*, 2023, vol. 45, no. 2, pp. 172–185. <https://doi.org/10.1007/s10591-021-09620-7>
26. Kim J., Park D., Shin Y.J. Friendship dynamics of career decision-making self-efficacy: a longitudinal social network approach. *Current Psychology*, 2022, in press. <https://doi.org/10.1007/s12144-022-03887-1>
27. Song Q.C., Shin H.J., Tang C., Hanna A., Behrend T. Investigating machine learning's capacity to enhance the prediction of career choices. *Personnel Psychology*, 2022, in press. <https://doi.org/10.1111/peps.12529>
28. José-García A., Sneyd A., Melro A., Ollagnier A., Tarling G., Zhang H., Stevenson M., Everson R., Arthur R. C3-IoC: A career guidance system for assessing student skills using machine learning and network visualisation. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 2022, in press. <https://doi.org/10.1007/s40593-022-00317-y>

29. Holland J.L. Explorations of a theory of vocational choice and achievement: II. A four-year prediction study // *Psychological Reports*. 1963. V. 12. N 2. P. 547–594. <https://doi.org/10.2466/pr0.1963.12.2.547>
30. Резапкина Г.В. Психология и выбор профессии: программа предпрофильной подготовки. Учебно-методическое пособие для психологов и педагогов. М.: Генезис, 2005. 208 с.
31. Agresti A. *Categorical Data Analysis*. John Wiley & Sons, 2003.
32. Venables W.N., Ripley B.D. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. New York: Springer, 2002. 498 p.
33. Корепапова А.А., Абрамов М.В. Применение случайного леса в выборе метода восстановления возраста пользователя социальной сети // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2021. № 2. С. 66–76. <https://doi.org/10.14357/20718594210207>
34. Торопова А.В., Абрамов М.В., Тулупьева Т.В. Машинное обучение байесовской сети доверия как инструмента оценки интенсивности процесса по данным из социальной сети // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 5. С. 727–737. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-727-737>
35. Khlobystova A., Abramov M., Korepanova A., Liapin N. Identification of predictors for estimation the intensity of relationships between users of online social networks // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. V. 566. P. 216–225. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19620-1_21
29. Holland J.L. Explorations of a theory of vocational choice and achievement: II. A four-year prediction study. *Psychological Reports*, 1963, vol. 12, no. 2, pp. 547–594. <https://doi.org/10.2466/pr0.1963.12.2.547>
30. Rezapkina G.V. *Psychology and Profession Selection: Pre-Profile Training Program. Study Guide for psychologists and teachers*. Moscow, Genesis Publ., 2005, 208 p. (in Russian)
31. Agresti A. *Categorical Data Analysis*. John Wiley & Sons, 2003.
32. Venables W.N., Ripley B.D. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. New York, Springer, 2002, 498 p.
33. Korepanova A.A., Abramov M.V. Application of random forest in choosing a method of recovering the age of social network users. *Scientific and Technical Information Processing*, 2022, vol. 49, no. 5, pp. 317–324. <https://doi.org/10.3103/s0147688222050057>
34. Toropova A.V., Abramov M.V., Tulupyeva T.V. Machine learning of the bayesian belief network as a tool for evaluating the process frequency on social network data. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 727–737. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-727-737>
35. Khlobystova A., Abramov M., Korepanova A., Liapin N. Identification of predictors for estimation the intensity of relationships between users of online social networks. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023, vol. 566, pp. 216–225. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19620-1_21

Авторы

Хлобистова Анастасия Олеговна — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация; ассистент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, [sc 57204970981](https://orcid.org/0000-0002-9811-5476), <https://orcid.org/0000-0002-9811-5476>, aok@dscs.pro

Абрамов Максим Викторович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, [sc 56938320500](https://orcid.org/0000-0002-5476-3025), <https://orcid.org/0000-0002-5476-3025>, mva@dscs.pro

Столярова Валерия Фуатовна — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, [sc 57220208479](https://orcid.org/0000-0002-1666-2186), <https://orcid.org/0000-0002-1666-2186>, vfs@dscs.pro

Статья поступила в редакцию 28.12.2022
Одобрена после рецензирования 27.02.2023
Принята к печати 26.05.2023

Authors

Anastasia O. Khlobystova — Junior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; Assistant, St. Petersburg State University (SPbSU), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation, [sc 57204970981](https://orcid.org/0000-0002-9811-5476), <https://orcid.org/0000-0002-9811-5476>, aok@dscs.pro

Maxim V. Abramov — PhD, Senior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, [sc 56938320500](https://orcid.org/0000-0002-5476-3025), <https://orcid.org/0000-0002-5476-3025>, mva@dscs.pro

Valerie F. Stoliarova — Junior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, [sc 57220208479](https://orcid.org/0000-0002-1666-2186), <https://orcid.org/0000-0002-1666-2186>, vfs@dscs.pro

Received 28.12.2022
Approved after reviewing 27.02.2023
Accepted 26.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-575-584

Blindness detection in diabetic retinopathy using Bayesian variant-based connected component algorithm in Keras and TensorFlow

Shanmugavel Anantha Babu¹, Subramanian Murali², Ellappan Vijayan³, Mahendran Anand⁴,
 Lakshmanan Ramanathan⁵✉

¹ Koneru Lakshmaiah Education Foundation, Hyderabad, 500075, Telangana, India

^{2,3,4,5} Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India

¹ ananthmtech@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7446-0283>

² murali.s@vit.ac.in, <https://orcid.org/0000-0002-1631-8078>

³ evijayan@vit.ac.in, <https://orcid.org/0000-0002-0207-0411>

⁴ manand@vit.ac.in, <https://orcid.org/0000-0002-7629-9606>

⁵ lrmanathan@vit.ac.in✉, <https://orcid.org/0000-0002-1532-5495>

Abstract

The neuro-degenerative eye disease glaucoma is caused by an increase in eye pressure inside the retina. As the second-leading cause of blindness in the world, if an early diagnosis is not obtained, this can cause total blindness. Regarding this fundamental problem, there is a huge need to create a system that can function well without a lot of equipment, highly qualified medical personnel, and takes less time. The proposed modeling consists of three stages: pre-training, fine-tuning and inference. The probabilistic based pixel identification (Bayesian variant) predicts the severity of Diabetic Retinopathy (DR) which is diagnosed by the presence of visual cues, such as abnormal blood vessels, hard exudates, and cotton wool spots. The article combines machine learning, deep learning, and methods for image processing to predict the diagnosis images. The input picture is validated using Bayesian variant connected component architecture, and the brightest spot algorithm is applied to detect the Region of Interest (ROI). Moreover, the training sample calculated optic disc and optic cup are segmented with fundus photography ranges 0 to 4 using VGGNet16 architecture and SMOTE algorithm to detect DR stages of images and the proposed model using ensemble based ResNet with Efficient Net produces the excellent accuracy score of 93 % and predicted image Kappa coefficient ($p < 0.01$) 0.755 of the fundus retina image dataset.

Keywords

Bayesian variant, Keras and TensorFlow, ensemble learning, EfficientNet, ResNet

For citation: Anantha Babu S., Murali S., Vijayan E., Anand M., Ramanathan L. Blindness detection in diabetic retinopathy using Bayesian variant-based connected component algorithm in Keras and TensorFlow. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 575–584. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-575-584

УДК 004.89

Обнаружение слепоты при диабетической ретинопатии с использованием алгоритма связанных компонентов на основе байесовского варианта в Keras и TensorFlow

Шанмугавел Ананта Бабу¹, Субраманиан Мурали², Эллаппан Виджаян³, Махендран Ананд⁴,
 Лакшманан Раманатан⁵✉

¹ Университет Конеру Лакшмаиан (KL), Хайдарабад, 500075, шт. Телангана, Индия

^{2,3,4,5} Технологический институт Веллур, Веллур, 632014, Индия

¹ ananthmtech@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7446-0283>

² murali.s@vit.ac.in, <https://orcid.org/0000-0002-1631-8078>

³ evijayan@vit.ac.in, <https://orcid.org/0000-0002-0207-0411>

⁴ manand@vit.ac.in, <https://orcid.org/0000-0002-7629-9606>

⁵ lrmanathan@vit.ac.in✉, <https://orcid.org/0000-0002-1532-5495>

© Anantha Babu S., Murali S., Vijayan E., Anand M., Ramanathan L., 2023

Аннотация

Нейродегенеративное заболевание глаз — глаукома, вызывается повышением внутриглазного давления сетчатки. Это вторая по значимости причина слепоты в мире. Отсутствие раннего диагноза приводит к полной слепоте. Актуальной проблемой является создание системы диагностики, которая может функционировать без большого количества оборудования, высококвалифицированного медицинского персонала и занимает мало времени. Предложенное в работе моделирование состоит из трех этапов: предварительная подготовка, тонкая настройка и логический вывод. Вероятностная пиксельная идентификация (байесовский вариант) позволяет прогнозировать тяжесть заболевания по наличию визуальных признаков, таких как аномалия кровеносных сосудов, наличие твердых экссудатов и ватообразных очагов. Рассмотрено сочетание машинного обучения, глубокого обучения и методов обработки изображений для оценки и идентификации диагностических изображений. Входное изображение проверено с использованием байесовской архитектуры связанных компонентов. Для обнаружения области интереса (ROI) применен алгоритм наиболее яркого пятна. Для обнаружения стадий диабетической ретинопатии по фотографиям глазного дна выполнены расчеты диска и чаши зрительного нерва. Изображения сегментированы от 0 до 4 с использованием архитектуры VGGNet16 и алгоритма SMOTE. Представленная модель с применением алгоритма ResNet на основе ансамбля с Efficient Net дала оценку точности 93 % и предсказанный коэффициент Каппа изображения ($p < 0,01$) 0,755 набора данных изображения сетчатки глазного дна.

Ключевые слова

байесовский вариант, Keras и TensorFlow, ансамблевое обучение, EfficientNet, ResNet

Ссылка для цитирования: Ананта Бабу Ш., Мурали С., Виджаян Э., Ананд М., Раманатан Л. Обнаружение слепоты при диабетической ретинопатии с использованием алгоритма связанных компонентов на основе байесовского варианта в Keras и TensorFlow // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 575–584 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-575-584

Introduction

Recently, diabetes affects roughly 250 million individuals worldwide. People with diabetes have elevated blood glucose levels and their retinas suffer as a result. Loss of eyesight or blindness results from this. The leading causes of blindness and visual impairment in humans are Diabetic Retinopathy (DR), glaucoma, age-related macular degeneration, and cataract. The most well-known form of DR is diabetic blindness [1]. As a result, the blood vessels in the retina are damaged, which can lead to blindness. One in four people with the same type of DR, which affects up to 4.1 million individuals, have visual loss. A process known as DR damages the blood vessels in the retina, a luminous tissue located in the back of the eye [2]. Diabetes is a major cause of vision loss in diabetics and is one of the main risk factors for vision loss and blindness in persons below the age of 70. Most diabetic may get retinopathy which can be very severe since that raises the possibility of blindness if untreated. Regular eye exams are crucial to getting the problem treated while it is still treatable since it is easiest to do this in the initial stages. We have scanned images to utilize trained surgeons to diagnose the illness instead of automation system.

- It benefits the patient, particularly those who cannot afford medical care.
- It lessens human effort, particularly when there are fewer specialists.
- It is useful for persons living in remote locations where medical screening is challenging to perform.
- It reduces the amount of time needed to diagnose an illness.

Diabetic screening aids in the early detection of the disease asymptomatic phases and can be modified to result in effective therapy. This makes it possible for medical providers to use screening in rural and isolated locations where specialist healthcare is lacking. In medical image analysis, the location of structures must be determined.

Visual acuity is in danger when the background alterations take place in the central retina, a disease known as diabetic maculopathy. Unfortunately, many people go misdiagnosed even as their diabetes severely destroys their retinas since sight loss is frequently a late indication of advanced diabetic maculopathy [3].

A condition known as glaucoma (GI) affects the optic nerve which connects the eye to the brain. The optic nerve is compromised when Intraocular Pressure (IOP), often known as eye pressure, is high [4]. A rise in blood sugar doubles the likelihood of GI which if left untreated can result in blindness and visual loss. Based on the size of the swollen optic nerve head or optic disc and Cup-to-Disc Ratio, or cupping, GI may be divided into three categories: there exist mild, moderate, and severe GI phases [5]. Diabetic Macular Edema is a fluid buildup in the macular region of the retina brought on by blood vessel destruction. Straight-ahead vision is made crisp by the macula. The macula swells and thickens as a result of fluid accumulation causing visual distortion. Based on the following criteria, mild, moderate, and severe Diabetic Macular Edema phases can be distinguished [6].

The major goals of the proposed study are to improve sensitivity, specificity, and accuracy of DR diagnosis by detecting blood vessels, microaneurysms, hemorrhages, and exudates. To create an automatic grading system for various DR phases that is highly accurate and requires little computational effort.

Literature Review

Systems for analyzing retinal images have the ability to process data through image processing and machine learning techniques. There are various uses of image processing algorithms in the literature for diagnosing retinal disorders [7]. The early digital retina fundus images were classified using manually derived features and empirically determined parameters. According to the authors, computer

vision techniques may now be used to automatically find microaneurysms system. Eight characteristics among pixel area and total pixel intensity, recorded for each candidate, were used in their studies using simple morphological and thresholding procedures [8]. The suggested approach produced outcomes equivalent to those attained by medical professionals demonstrating the diagnostic utility of automated lesion identification. Images may be visualized using a variety of image-processing tools and techniques [9, 10]. The photos are subjected to several pre-processing procedures to improve their visualization. A network may pick up more superior qualities when the images are brighter and clearer. We will make a quick mention of the image processing methods employed by the writers and researchers in this part. Compared to the other channels, the Green channel in the RGB color space offers more contrast and information [11].

The chronic damage to the optic nerve caused by the degenerative eye disease glaucoma eventually results in permanent blindness and a loss of visual field. It is the second most common explanation for glaucoma. According to the widely used model, 11.1 million individuals would have glaucoma globally in 2020 [12]. IOP, or elevated Intraocular Pressure, is a primary factor in damage to the fragile nerve fibres of the optic nerve. Glaucoma can occasionally occur in individuals with IOP levels within the normal range. IOP in glaucoma sufferers is greater than 20 mmHg (normal IOP is 10 mmHg), which might harm the optic nerve in the back of the eye and result in blindness [13].

In order to acquire unsupervised features and categories patterns, Deep Learning (DL), a subset of machine learning techniques, uses hierarchical layers of non-linear processing stages [14]. One technique for computer-assisted medical diagnosis is DL. Classification, segmentation, detection, retrieval, and registration of the pictures are only a few of the DL applications used in medical image analysis. Convolutional Neural Networks (CNNs) are employed more frequently than the other techniques in medical image analysis [15], and they are also quite successful. Convolution layers (CONV), pooling layers, and fully linked layers make up the three basic levels of the CNN architecture (Fully Connected). Depending on the author's vision, the CNNs size, number of filters, and layer count can change. In the CNN design, each layer has a distinct function. Different filters convolve a picture to extract its characteristics in the CONV layers. In order to shrink the size of feature maps, the pooling layer is often applied after the CONV layer. There are several pooling algorithms; however average pooling and maximum pooling are most often used [16].

Residual representations

VLAD [17] is a format for image recognition that encodes using residual vectors in relation to a dictionary, and Fisher Vector can be in the form of a probabilistic VLAD formulation.

Strong shallow models for vision classification and retrieval are among them. Vector quantization has demonstrated that residual vector encoding is more efficient than original vector processing.

An essential method for examining the retina arteries and veins is retinal vascular segmentation [17]. Blood vessel segmentation is essential in this sort of analytic method which is used by various medical professions to discover a variety of medical concerns. Due to the significance of fundus vessels, several fundus vascular segmentation techniques have been developed over time [18]. The results of a manual segmentation might be regarded as the accurate results. Although manual segmentation is easy, it is a laborious operation. Additionally, fatigue makes it more prone to mistakes [19]. Additionally, because each person may interpret the image differently, there can be some variations in the segmentation findings from various individuals. Therefore, a simpler and more efficient segmentation method should be developed.

A type of machine learning technique known as "unsupervised learning" is used to draw conclusions from data sets that contain input data without labeled replies. In unsupervised learning the approaches were discussed. According to a method proposed by Zhao et al. [20] for segmenting retinal blood vessels, based on the level set and region growing method, the extracted green channel image is first enhanced using CLAHE and a 2D Gabor wavelet transform before being smoothed out with an anisotropic diffusion filter that maintains the vessel boundary [21].

While UNet architectures may keep the image structural integrity, they are more suited for semantic segmentation than conventional CNNs. They include a contracting path to collect the pertinent context and an expanding path that is symmetrical allowing for exact segmentation. Additionally, UNet architecture processes the image in a single pass rather than processing various patches in a sliding window approach as a CNN would that is why such architectures are referred to as "Fully Convolutional Networks" (FCN) [22] and also have number of parameters and are faster than conventional CNNs.

System Model

The essential components of CNNs will be discussed in detail in this article. Fully linked layers, also known as traditional neural networks, are presumed to be recognizable to the reader based on this. The basic units of neural networks in the past have been matrix multiplications and nonlinearities like sigmoid. These levels of a matrix multiplication are now known as fully-connected layers since every unit in the layer below it is connected to every unit in the layer. In our model, a free library named TensorFlow is accessible on GitHub. When it comes to work with Deep Neural Networks, it is one of the more well-known libraries. On top of Theano or TensorFlow, Keras is a high-level library. It offers a scikit-learn-style Python API for creating neural networks. The primary motive behind the creation of Keras is to make experimenting easier through rapid prototyping.

Bayesian variant

By using deep learning method, a probabilistic pixel-by-pixel segmentation model known as the "Bayesian" network was developed as an alternative to the original network. With the help of this technology, it is feasible to do probabilistic pixel-wise categorization using drop-

out and Monte Carlo sampling. Determine the posterior distribution (P) over the convolutional weights w using the actual training data x and labels z as inputs.

$$P(w|x, z).$$

The Kullback-Leibler divergence between the targeted approximation distribution and the complete Bayesian probability is eliminated.

$$I(x, y) = klP(x, y) || P(x)P(y).$$

I denotes the input image and we applied kl as divergence Bayesian probability. The posterior distribution over the weights would be sampled at test time to create the distribution of softmax class probabilities. Convolutional kernel sizes were set at 3×3 for the Original network and 7×7 for both of the Basic networks to provide a broad context for smooth labelling. We trained our networks using a stochastic Bayesian network model that integrates raw data from color, edge map, and texture in order to improve the accuracy of content-based photo retrieval systems.

Bayesian classifier

We consider k classes, $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k$, with the prior probability $P_i, i = 1, k, X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ is the n -dimensional continuous data with $x = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ being a specific sample. According to [23], a new observation x belongs to the class ω_1 if and only if

$$P(\omega_i|x) > P(\omega_j|x) \text{ for } 1 \leq j \leq k, j \neq i.$$

In the continuous case $P(\omega_i|x)$, is calculated by

$$P(\omega_i|x) = \frac{P(\omega_i)f(x|\omega_i)}{\sum_{i=1}^n P(\omega_i)f(x|\omega_i)} = \frac{P_i f_i(x)}{f(x)}.$$

Connected components

Through pixel-by-pixel analysis of an image, linked component labelling finds related pixel areas, or regions of nearby pixels, that have the same set of intensity values V as connected components. (from top to bottom and left to right). (V is always 1, despite the fact that V may take on multiple values in a grayscale image.)

Let ∂s be a neighbourhood system:

- 4-point neighbourhood system,
- 8-point neighbourhood system.

Let $c(s)$ denote the collection of nearby points s that are linked together, i.e., set of pixels. The set $c(s)$ for all s (set) and r must possess the characteristics that — $c(s) \subset \partial s$ — $r \in c(s) \Leftrightarrow s \in c(r)$ radius. In general, calculating $c(s)$ may be very difficult. Use the following pseudocode to find a linked set by growing an area from a seed point.

Pseudo Code: Connected Set Growing Region

```
ClassLabel = 1
Initialize Yr = 0 for all r ∈ S
ConnectedSet(s0, Y, ClassLabel) {
  B ← {s0}
  While B is not empty {
    s ← any element of B
```

```
    B ← B - {s} Ys ← ClassLabel
    B ← B ∪ {r : r ∈ c(s) and Yr = 0}
  }
}
return (Y)
}
```

The proposed model, after enlarging the region to the nearest pixel, applies the extract the corresponding component sets to cycle through each pixel in the image. For each pixel that isn't labeled, an associated set should be extracted.

Pseudo Code: Extract the connected components Region

```
ClassLabel = 1
Initialize Yr = 0 for r ∈ S
For each s ∈ S {
  if (Ys = 0) {
    ConnectedSet(s, Y, ClassLabel)
    ClassLabel ← ClassLabel + 1
  } }
```

Proposed Procedures

Fig. 1 depicts the finalized proposed Bayesian version based on linked components to identify the diseases in the eye dataset. In large collections of misclassification data, the ensemble model may be optimized and used with ResNet. The next part provides information on the proposed training and testing dataset for employing the linked components based on the Bayesian variation.

Proposed algorithm

Step 1: Read APTIOS retina data set collected from Kaggle.

Step 2: To determine whether an input (x) coincides with a label, evaluate your network input data in the first phase (y). Make that the ground-truth label (y) is suitably encoded to label indexes, assuming dense prediction.

Step 3: A pre-trained model should be chosen based on how well it is handled hyper parameters.

Step 4: After convolution layers, add Dropout layers, modify a few layers, or train the classifier using a small dataset.

Step 5: During training, employ class weights if the data issue is extremely uneven. Alternatively, give the unusual class more weight while reducing the weight of the main class.

Step 6: Utilize Max-pooling to cut down on computations before ReLU. ReLU thresholds zero-valued values. Max-pooling only pools the maximum activations when $f(x) = \max(0, x)$: Use Conv > MaxPool > ReLU when $f(x) = \max(x_1, x_2, \dots, x_i)$ Conv > ReLU > MaxPool is preferred.

Step 7: Use 80–20 for training and testing the ML Bayesian Variant + Connected Component model to forecast the model.

Step 9: To evaluate the correctness of the provided dataset, use the confusion matrix.

Step 10: Finally, provide a categorization report with accuracy, recall, and precision.

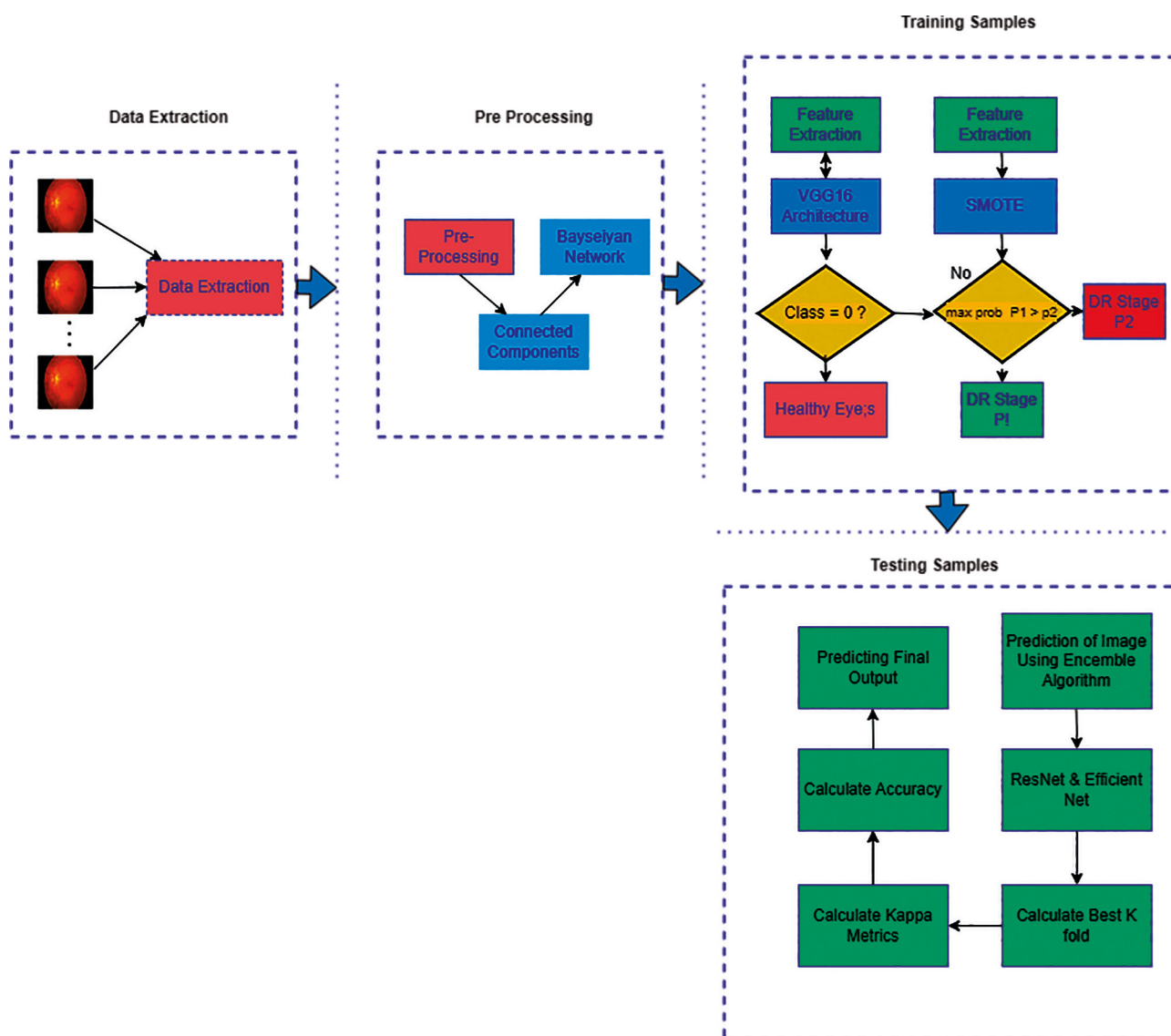


Fig. 1. Bayesian Variant-Based Connected Component Model

Results and Discussion

Pre-processing

Pre-processing the data is an important step that is frequently missed. The caliber of the input is the crucial step of preprocessing the data which is routinely skipped. The effectiveness of the produced machine learning models is significantly influenced by the quality of the input data. Before beginning the modeling process, it is crucial to analyze the data and to take into consideration any potential problems. The material consists of 3662 retinal photographs of clinical patients with labels and 1928 retinal photographs with test labels. A clinical expert assigns labels to the photographs. The severity of DR is denoted by numerical labels on a range from 0 to 4, with 0 denoting no illness and 4 denoting the proliferative stage of DR. It is based on how successfully a pre-trained model handled by hyper-parameters and should select it. Fig. 2 shows the distribution of the classes for the data gathered from the “train.csv” and “sample submission.csv” files. Since different camera models were used to gather the

information from various clinics, there are variations in the image resolution, aspect ratio, and other factors.

Images of 49 % of the patients suggest that they are in good health, according to the imbalance data. The remaining 51 % are stages of DR. With just 5 % of instances falling into Class 3 (the severe stage), it is the least frequent. Because different camera types were utilized to capture the data, the picture resolution, aspect ratio, and other elements of the data from the various clinics vary.

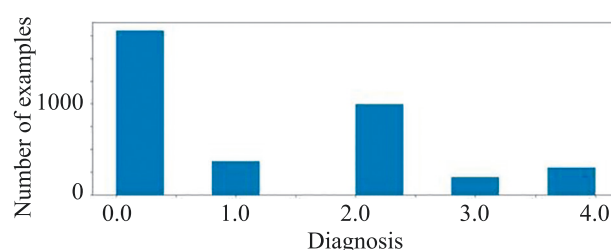


Fig. 2. Class distribution of Blindness Detection Model (524 × 197 px)

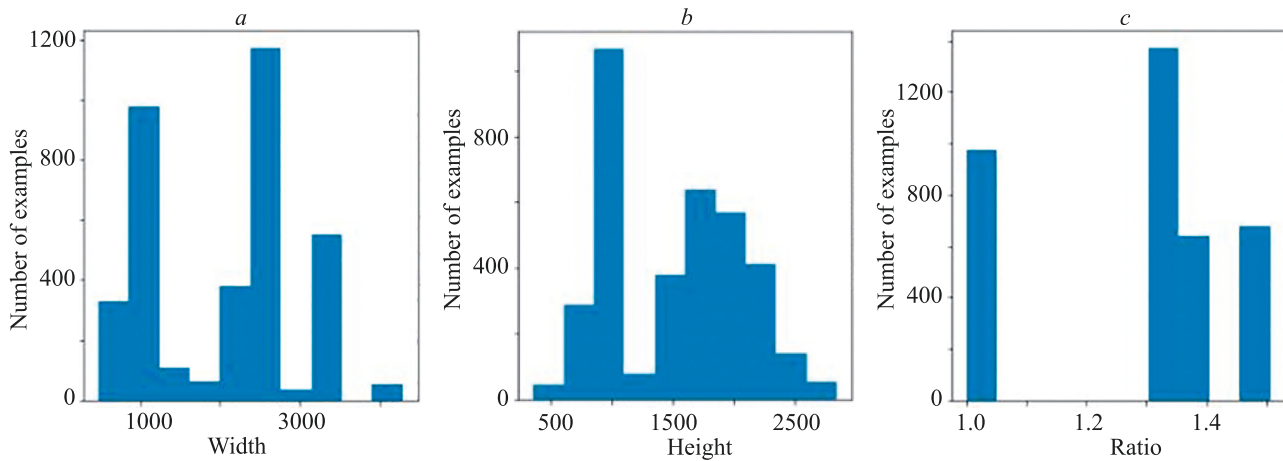


Fig. 3. Image: width (276×288 px) (a); height (276×288 px) (b); ratio (276×288 px) (c)

The following example shows how to accomplish this by plotting the histograms of the images width, height, and aspect ratio. Fig. 3 shows, observation of trained dataset images with calculations of width, height and image ratio. X-axis of each image are width, height and ratio.

In Fig. 3, height and width are observed from the total number of observation images. The ratio is calculated with total number of image width divided by total number of image height. The severity of DR is assessed visually using indicators including abnormal blood vessels, hard exudates, and so-called cotton wool patches. Comparing the examples, we can see that some of the retinal pictures of the sick people include cotton wool patches and exudates.

Bayesian network model training

Although just 2 % of the photos depict the most advanced stage of the DR, the gap between the source and goal data is more pronounced: 73 % of the photos depict healthy individuals while the goal data only contains 2 % of such images. To balance things out during training, we'll use a sample from the target data set as a validation sample. To support different enhancements on the training and inference stages, the model produces two "Dataset" objects, "EyeTrainData" and "EyeTestData". A random crop is present but not included in the test data in the first case. Fig. 4 shows augmented training images.

The leading edge of CNN performance is in computer vision tasks. Recent medical research also shows that CNNs with DR categorization have a lot of potential. The CNN EfficientNet & ResNet model architecture is utilized in this study. It contains 8 different architectures, ranging from B0 to B7, with different default picture sizes and levels of model complexity. The non-linear,

unsupervised approach used in t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE) is primarily used for high-dimensional data visualization and data exploration. If the values of the data points x_1 and x_2 are same beneath this Gaussian circle, which denotes that their proportions and similarities are likewise equivalent, then there are local similarities in the structure of this high-dimensional space. The Gaussian distribution or circle may be altered using the idea of complexity which effectively influences the number of closest neighbors and the variance of the distribution (circle size). We can greatly improve the sharpness of the characteristics and visual details in the eye by using Gaussian blur.

The Gaussian blur feature is created by blurring (or smoothing) a photo using a Gaussian function to reduce noise. After resizing the image, we enhanced it using Gaussian blur. We removed the extraneous features and kept just the relevant parts of the image. Bilinear interpolation was used to scale the photos. Fig. 5 presents the result after applying Gaussian blur image.

$$I_{norm} = \frac{I - \min(I)}{\max(I) - \min(I)}$$

In the formula, I represents normalization of the given image used to remove the dark area of images. The retina image was converted to grayscale, and a tolerance value larger than 7 was decided upon in order to create a mask. The picture primary goal was to get any dark areas totally removed. For the X and Y axes, we decide to utilize a standard deviation of 10. Each point in the input vector was concatenated and added using a Gaussian kernel to produce the output image:

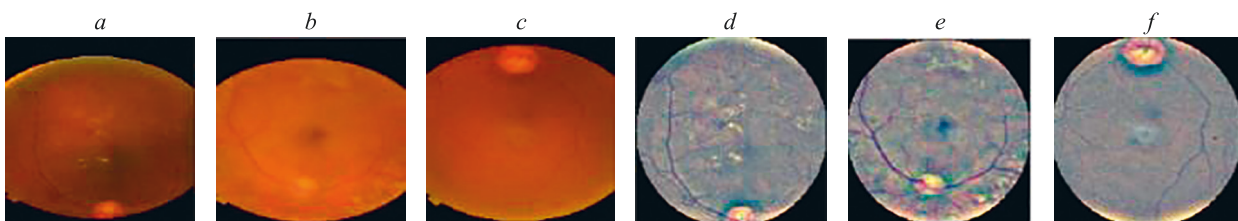


Fig. 4. Augmented Training Images: 112×112 px (a); 110×110 px (b); 112×113 px (c); 113×112 px (d,f); 113×116 px (e)

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

Using this equation, the original and blurred pictures were merged. Parameter σ is determined by single scaling parameter when using it to describe the scale towards directions, the propagation of blurriness is model as circular shape; x is referred as training set of the images. Now represent $G(x)$ as Gaussian image:

$$G(x) = (1 - \alpha)f_0(x) + \alpha f_1(x),$$

where f_0 is original image and f_1 represents noisy image. To get the desired image, we assign the value of $\alpha = 4$, $\beta = 4$, and free term $\gamma = 128$ for the programme which produced the finished image:

$$dst = \alpha img1 + \beta img2 + \gamma.$$

The final pre-processed image utilized in the training model is shown in Fig. 6. Each fundus picture underwent pre-processing to make the features and nerves more prominent and to eliminate the background dark region to cut down on unnecessary data.

Class “0” is distinguishable from other classes by the model (1–4). Separating grades 1–4 seems to be a challenge. After being reduced to 1D and flattened to 2D grayscale, t-SNE (t-distributed Stochastic Neighbour Embedding) is applied. When working with CNN extracted features, t-SNE also is effective. With t-SNE, to create maps that illustrate which input data the network considers to be “similar”. Fig. 7, *a* shows the distribution of t-SNE for perplexity = 5 and Fig. 7, *b* presents t-SNE for perplexity = 10.

Evaluation parameters

Kappa Score is computed based on the precision parameter pre-trained weights for efficient net. After 0 to 4 training every bucket epochs, depending on a fold, the best validation performance is reached; this shows



Fig. 5. After Applying Gaussian Blur (174 × 174 px)

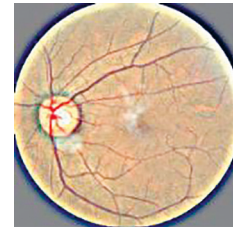


Fig. 6. After Applying Crop and Gaussian Blur (180 × 178 px)

improved performance in categorising mild stages of DR. A classification outcome based on pixels is produced by retinal vascular identification utilising linked components and the Bayesian version. Either the background or the vessel is assigned to each pixel. After 3 epochs, the cross-entropy loss on the validation set is at its lowest. Kappa keeps rising over this time period, reaching the 8th epoch. We utilise kappa to evaluate the performance of our solution, thus we keep weights for 0 to 4 epochs. The confusion matrix of the trained model is also generated. The percentages are represented by the numbers in the cells. According to the findings, the model is unable to differentiate between the mild and moderate phases of DR: images with mild DR are classified as moderate in 86 % of instances. Those who are in good health achieve the best results. Overall, the model frequently conflates closely related severity stages while misclassifying the prolific and

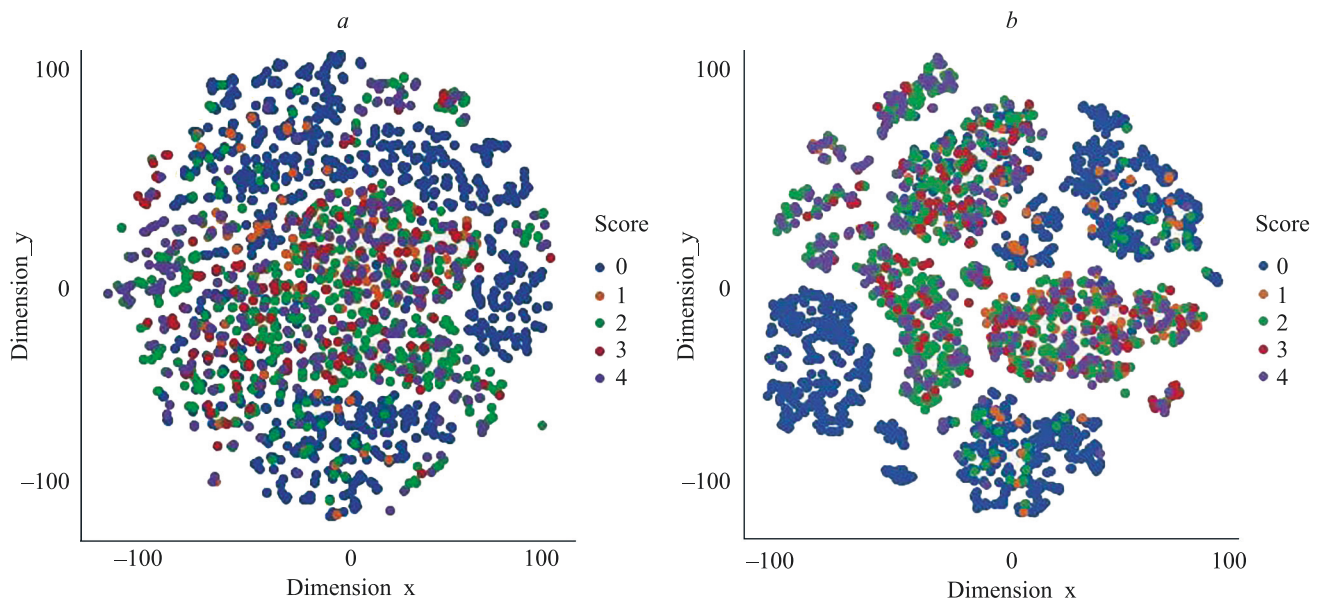


Fig. 7. TSNE Cluster Separation: perplexity = 5 (495 × 432 px) (a) and perplexity = 10 (463 × 436 px) (b)

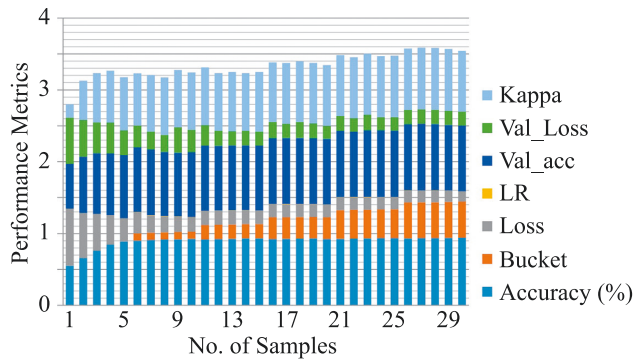


Fig. 8. Bayesian variant based EfficientNet & ResNet with Pre-trained Weights for Accuracy, Loss and Kappa Score

moderate levels. Fig. 8 shows the loss, accuracy, and Kappa score of pre-trained images; Fig. 9 presents the confusion matrix of given samples.

Comparative analysis

CNNs are commonly constructed using fewer resources then scaled up to perform better with more resources. There are several approaches to scale a model, such as arbitrarily increasing CNN depth or breadth, or employing high-resolution input images during training to capture data correlations in detail. In order to ensure the compatibility of the learned Bayesian variant with Resnet and Efficient Net models, the training test Kappa score performed with a 0.755 with an excellent accuracy rate. A minimum mean squared value and excellent kappa train by the recommended method, it has been noticed.

The quadratic weighted kappa calculated as follows. To begin, a $N \times N$ histogram matrix \mathbf{O} is built, where \mathbf{O}_{ij} represents the number of installation ids (actual) that really got a value of j . Based on the difference between the actual

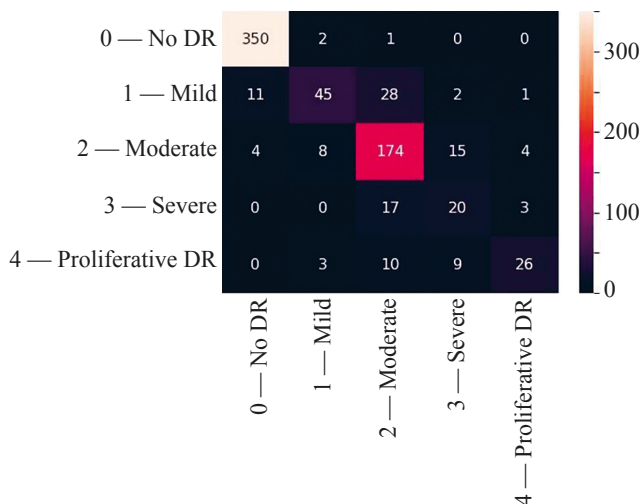


Fig. 9. Confusion Matrix (619 × 468 px)

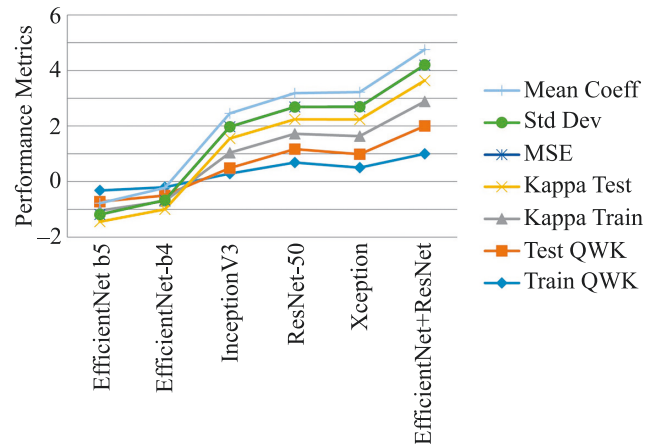


Fig. 10. Compare performance metrics in graphical analysis with other existing methods

and anticipated values, an N by N weights matrix, ω , is generated.

$$\omega_i = \frac{(\mathbf{Q}_i - \mathbf{Q}_j)^2}{(N - 1)^2}.$$

Assuming that there is no connection between values, a histogram matrix of anticipated results, N by N , is constructed as \mathbf{E} . This is determined by taking the outer product normalized such that \mathbf{E} and \mathbf{O} have the same sum between the expected and actual histogram vectors of outcomes. Where \mathbf{O}_i represents actual image and \mathbf{O}_j indicates anticipated values.

$$Kappa = 1 - \frac{\sum_{i,j} \omega_{ij} \mathbf{O}_{i,j}}{\sum_{i,j} \omega_{ij} \mathbf{E}_{i,j}}.$$

The quadratic weighted kappa score is a proportion that ranges from -1 to 1 . The model is “worse than random” if the Quadratic Weighted Kappa (QWK) score is negative. The result of a random model should be close to 0 . Our proposed model predicts the kappa score close to 0.88 to 1.00 expected random possibilities; the suggested method passed testing in Fig. 10.

Conclusion

After reviewing the results using a confusion matrix, an accuracy calculation was performed. Blood vessels scored higher after being converted to frequency. Inferred from the data, blood vessels and frequency transformations are the two characteristics that are most reliable for detecting relationships between illnesses. The model applies transfer learning to modify the newest CNN model by integrating EfficientNet with ResNet. K-fold study to obtain the best EPOCHS fit revealed that the recommended model considerably enhances the classification model test time and prediction performance.

References

1. Stitt A.W., Curtis T.M., Chen M., Medina R.J., McKay G.J., Jenkins A., Gardiner T.A., Lyons T.J., Hammes H.-P., Simó R., Lois N. The progress in understanding and treatment of diabetic retinopathy. *Progress in Retinal and Eye Research*, 2016, vol. 51, pp. 156–186. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2015.08.001>
2. Mahmoud M.H., Alamery S., Fouad H., Altinawi A., Youssef A.E. An automatic detection system of diabetic retinopathy using a hybrid inductive machine learning algorithm. *Personal and Ubiquitous Computing*, 2021, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01519-8>
3. Dai L., Wu L., Li H., Cai C., Wu Q., Kong H., Liu R., Wang X., Hou X., Liu Y., Long X., Wen Y., Lu L., Shen Y., Chen Y., Shen D., Yang X., Zou H., Sheng B., Jia W. A deep learning system for detecting diabetic retinopathy across the disease spectrum. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 3242. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23458-5>
4. Leung D.Y.L., Tham C.C. Normal-tension glaucoma: Current concepts and approaches — A review. *Clinical & Experimental Ophthalmology*, 2022, vol. 50, no. 2, pp. 247–259. <https://doi.org/10.1111/ceo.14043>
5. French J.A., Lawson J.A., Yapici Z., Ikeda H., Polster T., Naboult R., Curatolo P., de Vries P.J., Dlugos D.J., Berkowitz N., Voi M., Peyrard S., Pelov D., Franz D.N. Adjunctive everolimus therapy for treatment-resistant focal-onset seizures associated with tuberous sclerosis (EXIST-3): a phase 3, randomised, double-blind, placebo-controlled study. *The Lancet*, 2016, vol. 388, no. 10056, pp. 2153–2163. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(16\)31419-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(16)31419-2)
6. Nazir T., Nawaz M., Rashid J., Mahum R., Masood M., Mehmood A., Ali F., Kim J., Kwon H.-Y., Hussain A. Detection of diabetic eye disease from retinal images using a deep learning based CenterNet model. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 16, pp. 5283. <https://doi.org/10.3390/s21165283>
7. Barros D., Moura J.C., Freire C.R., Taleb A.C., Valentim R.A., Morais P.S. Machine learning applied to retinal image processing for glaucoma detection: review and perspective. *BioMedical Engineering OnLine*, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 20. <https://doi.org/10.1186/s12938-020-00767-2>
8. Ray J.S.R., Babu S.A., James J.W., Vedaiyan R. ARIMA based Time Series Analysis: Forecast COVID-19 Most Vaccinated Process and Active Cases classify using Probability Distribution Curve Rates (ARIMAPDC). *Proc. of the 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, 2021, pp. 546–551. <https://doi.org/10.1109/ICOSEC51865.2021.9591774>
9. Raj R.J.S., Babu Anantha S., Jegatheesan A., Arul Xavier V.M. A GAN-based triplet FaceNet detection algorithm using deep face recognition for autism child. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022, vol. 905, pp. 177–187. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2177-3_18
10. Babu S.A., Joshua Samuel Raj R., Varalathoumy M., Gopila M., Febiyola Justin B.V. Novel approach for predicting COVID-19 symptoms using ARM based APRIORI algorithm. *Proc. of the 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, 2022, pp. 1577–1580. <https://doi.org/10.1109/ICCMC53470.2022.9753987>
11. Khojasteh P., Aliahmad B., Kumar D.K. A novel color space of fundus images for automatic exudates detection. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2019, vol. 49, pp. 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.12.004>
12. Kouassi Nzoughe J., Guehlouz K., Leruez S., Gohier P., Bocca C., Muller J., Blanchet O., Bonneau D., Simard G., Milea D., Procaccio V., Lenaers G., de la Barca J.M.C., Reynier P. A data mining metabolomics exploration of glaucoma. *Metabolites*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 49. <https://doi.org/10.3390/metabo10020049>
13. Pang R., Labisi S.A., Wang N. Pigment dispersion syndrome and pigmentary glaucoma: overview and racial disparities. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2023, vol. 261, no. 3, pp. 601–614. <https://doi.org/10.1007/s00417-022-05817-0>
14. Wang X., Zhao Y., Pourpanah F. Recent advances in deep learning. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 747–750. <https://doi.org/10.1007/s13042-020-01096-5>
15. Domingues I., Pereira G., Martins P., Duarte H., Santos J., Abreu P.H. Using deep learning techniques in medical imaging: a systematic

Литература

1. Stitt A.W., Curtis T.M., Chen M., Medina R.J., McKay G.J., Jenkins A., Gardiner T.A., Lyons T.J., Hammes H.-P., Simó R., Lois N. The progress in understanding and treatment of diabetic retinopathy // *Progress in Retinal and Eye Research*. 2016. V. 51. P. 156–186. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2015.08.001>
2. Mahmoud M.H., Alamery S., Fouad H., Altinawi A., Youssef A.E. An automatic detection system of diabetic retinopathy using a hybrid inductive machine learning algorithm // *Personal and Ubiquitous Computing*. 2021. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01519-8>
3. Dai L., Wu L., Li H., Cai C., Wu Q., Kong H., Liu R., Wang X., Hou X., Liu Y., Long X., Wen Y., Lu L., Shen Y., Chen Y., Shen D., Yang X., Zou H., Sheng B., Jia W. A deep learning system for detecting diabetic retinopathy across the disease spectrum // *Nature Communications*. 2021. V. 12. N 1. P. 3242. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23458-5>
4. Leung D.Y.L., Tham C.C. Normal-tension glaucoma: Current concepts and approaches — A review // *Clinical & Experimental Ophthalmology*. 2022. V. 50. N 2. P. 247–259. <https://doi.org/10.1111/ceo.14043>
5. French J.A., Lawson J.A., Yapici Z., Ikeda H., Polster T., Naboult R., Curatolo P., de Vries P.J., Dlugos D.J., Berkowitz N., Voi M., Peyrard S., Pelov D., Franz D.N. Adjunctive everolimus therapy for treatment-resistant focal-onset seizures associated with tuberous sclerosis (EXIST-3): a phase 3, randomised, double-blind, placebo-controlled study // *The Lancet*. 2016. V. 388. N 10056. P. 2153–2163. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(16\)31419-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(16)31419-2)
6. Nazir T., Nawaz M., Rashid J., Mahum R., Masood M., Mehmood A., Ali F., Kim J., Kwon H.-Y., Hussain A. Detection of diabetic eye disease from retinal images using a deep learning based CenterNet model // *Sensors*. 2021. V. 21. N 16. P. 5283. <https://doi.org/10.3390/s21165283>
7. Barros D., Moura J.C., Freire C.R., Taleb A.C., Valentim R.A., Morais P.S. Machine learning applied to retinal image processing for glaucoma detection: review and perspective // *BioMedical Engineering OnLine*. 2020. V. 19. N 1. P. 20. <https://doi.org/10.1186/s12938-020-00767-2>
8. Ray J.S.R., Babu S.A., James J.W., Vedaiyan R. ARIMA based Time Series Analysis: Forecast COVID-19 Most Vaccinated Process and Active Cases classify using Probability Distribution Curve Rates (ARIMAPDC) // *Proc. of the 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*. 2021. P. 546–551. <https://doi.org/10.1109/ICOSEC51865.2021.9591774>
9. Raj R.J.S., Babu Anantha S., Jegatheesan A., Arul Xavier V.M. A GAN-based triplet FaceNet detection algorithm using deep face recognition for autism child // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. V. 905. P. 177–187. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2177-3_18
10. Babu S.A., Joshua Samuel Raj R., Varalathoumy M., Gopila M., Febiyola Justin B.V. Novel approach for predicting COVID-19 symptoms using ARM based APRIORI algorithm // *Proc. of the 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*. 2022. P. 1577–1580. <https://doi.org/10.1109/ICCMC53470.2022.9753987>
11. Khojasteh P., Aliahmad B., Kumar D.K. A novel color space of fundus images for automatic exudates detection // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2019. V. 49. P. 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.12.004>
12. Kouassi Nzoughe J., Guehlouz K., Leruez S., Gohier P., Bocca C., Muller J., Blanchet O., Bonneau D., Simard G., Milea D., Procaccio V., Lenaers G., de la Barca J.M.C., Reynier P. A data mining metabolomics exploration of glaucoma // *Metabolites*. 2020. V. 10. N 2. P. 49. <https://doi.org/10.3390/metabo10020049>
13. Pang R., Labisi S.A., Wang N. Pigment dispersion syndrome and pigmentary glaucoma: overview and racial disparities // *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*. 2023. V. 261. N 3. P. 601–614. <https://doi.org/10.1007/s00417-022-05817-0>
14. Wang X., Zhao Y., Pourpanah F. Recent advances in deep learning // *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*. 2020. V. 11. N 4. P. 747–750. <https://doi.org/10.1007/s13042-020-01096-5>
15. Domingues I., Pereira G., Martins P., Duarte H., Santos J., Abreu P.H. Using deep learning techniques in medical imaging: a systematic review of applications on CT and PET // *Artificial Intelligence*

- review of applications on CT and PET. *Artificial Intelligence Review*, 2020, vol. 53, no. 6, pp. 4093–4160. <https://doi.org/10.1007/s10462-019-09788-3>
16. Aloysius N., Geetha M. A review on deep convolutional neural networks. *Proc. of the 2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSPP)*, 2017, pp. 0588–0592. <https://doi.org/10.1109/iccsp.2017.8286426>
 17. Yu Z., Jiang X., Zhou F., Qin J., Ni D., Chen S., Wang T. Melanoma recognition in dermoscopy images via aggregated deep convolutional features. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2019, vol. 66, no. 4, pp. 1006–1016. <https://doi.org/10.1109/tbme.2018.2866166>
 18. Ooi A.Z.H., Embong Z., Abd Hamid A.I., Zainon R., Wang S.L., Ng T.F., Hamzah R.A., Teoh S.S., Ibrahim H. Interactive blood vessel segmentation from retinal fundus image based on canny edge detector. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 19, pp. 6380. <https://doi.org/10.3390/s21196380>
 19. Abdulsahib A.A., Mahmoud M.A., Mohammed M.A., Rasheed H.H., Mostafa S.A., Maashi M.S. Comprehensive review of retinal blood vessel segmentation and classification techniques: intelligent solutions for green computing in medical images, current challenges, open issues, and knowledge gaps in fundus medical images. *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 20. <https://doi.org/10.1007/s13721-021-00294-7>
 20. Artaechevarria X., Munoz-Barrutia A., Ortiz-de-Solorzano C. Combination strategies in multi-atlas image segmentation: application to brain MR data. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2009, vol. 28, no. 8, pp. 1266–1277. <https://doi.org/10.1109/tmi.2009.2014372>
 21. Jia S., Jiang S., Lin Z., Li N., Xu M., Yu S. A survey: Deep learning for hyperspectral image classification with few labeled samples. *Neurocomputing*, 2021, vol. 448, pp. 179–204. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.03.035>
 22. Sazak Ç., Nelson C.J., Obara B. The multiscale bowler-hat transform for blood vessel enhancement in retinal images. *Pattern Recognition*, 2019, vol. 88, pp. 739–750. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2018.10.011>
 23. Alshaikhli T., Liu W., Maruyama Y. Automated method of road extraction from aerial images using a deep convolutional neural network. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 22, pp. 4825. <https://doi.org/10.3390/app9224825>
 - Review. 2020. V. 53. N 6. P. 4093–4160. <https://doi.org/10.1007/s10462-019-09788-3>
 16. Aloysius N., Geetha M. A review on deep convolutional neural networks // *Proc. of the 2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSPP)*. 2017. P. 0588–0592. <https://doi.org/10.1109/iccsp.2017.8286426>
 17. Yu Z., Jiang X., Zhou F., Qin J., Ni D., Chen S., Wang T. Melanoma recognition in dermoscopy images via aggregated deep convolutional features // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2019. V. 66. N 4. P. 1006–1016. <https://doi.org/10.1109/tbme.2018.2866166>
 18. Ooi A.Z.H., Embong Z., Abd Hamid A.I., Zainon R., Wang S.L., Ng T.F., Hamzah R.A., Teoh S.S., Ibrahim H. Interactive blood vessel segmentation from retinal fundus image based on canny edge detector // *Sensors*. 2021. V. 21. N 19. P. 6380. <https://doi.org/10.3390/s21196380>
 19. Abdulsahib A.A., Mahmoud M.A., Mohammed M.A., Rasheed H.H., Mostafa S.A., Maashi M.S. Comprehensive review of retinal blood vessel segmentation and classification techniques: intelligent solutions for green computing in medical images, current challenges, open issues, and knowledge gaps in fundus medical images // *Network Modeling Analysis in Health Informatics and Bioinformatics*. 2021. V. 10. N 1. P. 1–32. <https://doi.org/10.1007/s13721-021-00294-7>
 20. Artaechevarria X., Munoz-Barrutia A., Ortiz-de-Solorzano C. Combination strategies in multi-atlas image segmentation: application to brain MR data // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2009. V. 28. N 8. P. 1266–1277. <https://doi.org/10.1109/tmi.2009.2014372>
 21. Jia S., Jiang S., Lin Z., Li N., Xu M., Yu S. A survey: Deep learning for hyperspectral image classification with few labeled samples // *Neurocomputing*. 2021. V. 448. P. 179–204. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.03.035>
 22. Sazak Ç., Nelson C.J., Obara B. The multiscale bowler-hat transform for blood vessel enhancement in retinal images // *Pattern Recognition*. 2019. V. 88. P. 739–750. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2018.10.011>
 23. Alshaikhli T., Liu W., Maruyama Y. Automated method of road extraction from aerial images using a deep convolutional neural network // *Applied Sciences*. 2019. V. 9. N 22. P. 4825. <https://doi.org/10.3390/app9224825>

Authors

Shanmugavel Anantha Babu — PhD, Associate Professor, Koneru Lakshmaiah Education Foundation, Hyderabad, 500075, Telangana, India, [sc 57198087959](https://orcid.org/0000-0002-7446-0283), <https://orcid.org/0000-0002-7446-0283>, ananthmtech@gmail.com

Subramanian Murali — PhD, Associate Professor, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, [sc 55752705600](https://orcid.org/0000-0002-1631-8078), <https://orcid.org/0000-0002-1631-8078>, murali.s@vit.ac.in

Ellappan Vijayan — PhD, Associate Professor, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, [sc 56318694500](https://orcid.org/0000-0002-0207-0411), <https://orcid.org/0000-0002-0207-0411>, evijayan@vit.ac.in

Mahendran Anand — PhD, Associate Professor, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, [sc 56318694500](https://orcid.org/0000-0002-7629-9606), <https://orcid.org/0000-0002-7629-9606>, manand@vit.ac.in

Lakshmanan Ramanathan — PhD, Associate Professor, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, India, [sc 55808530000](https://orcid.org/0000-0002-1532-5495), <https://orcid.org/0000-0002-1532-5495>, lramanathan@vit.ac.in

Received 23.11.2022

Approved after reviewing 26.04.2023

Accepted 27.05.2023

Авторы

Ананта Бабу Шанмугавел — PhD, доцент, Университет Конеру Лакшмаиан (KL), Хайдарабад, 500075, шт. Телангана, Индия, [sc 57198087959](https://orcid.org/0000-0002-7446-0283), <https://orcid.org/0000-0002-7446-0283>, ananthmtech@gmail.com

Мурали Субраманиан — PhD, доцент, Технологический институт Веллур, Веллур, 632014, Индия, [sc 55752705600](https://orcid.org/0000-0002-1631-8078), <https://orcid.org/0000-0002-1631-8078>, murali.s@vit.ac.in

Виджаян Элappaн — PhD, доцент, Технологический институт Веллур, Веллур, 632014, Индия, [sc 56318694500](https://orcid.org/0000-0002-0207-0411), <https://orcid.org/0000-0002-0207-0411>, evijayan@vit.ac.in

Анаид Махендрaн — PhD, доцент, Технологический институт Веллур, Веллур, 632014, Индия, [sc 56318694500](https://orcid.org/0000-0002-7629-9606), <https://orcid.org/0000-0002-7629-9606>, manand@vit.ac.in

Раманатaн Лакшманaн — PhD, доцент, Технологический институт Веллур, Веллур, 632014, Индия, [sc 55808530000](https://orcid.org/0000-0002-1532-5495), <https://orcid.org/0000-0002-1532-5495>, lramanathan@vit.ac.in

Статья поступила в редакцию 23.11.2022

Одобрена после рецензирования 26.04.2023

Принята к печати 27.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-585-594

Joint recognition of text and layout in historical Russian documents

Samah Mohammed¹✉, Nikolay Teslya²

¹ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

¹ samahslimanmhd93@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8009-7222>

² teslya@ias.spb.su, <https://orcid.org/0000-0003-0619-8620>

Abstract

In this paper, we evaluated the Document Attention Network (DAN), the first end-to-end segmentation-free architecture on Historical Russian Documents. The DAN model jointly recognizes both text and layout from whole documents, it takes whole documents from any size as an input and output the text as well as logical layout tokens. For comparison purposes, we conduct our experiments on Digital Peter dataset as it has been recognized at line-level. Dataset consists of documents of Peter the Great manuscripts; ground truths are represented according to a sophisticated XML schema which enables an accurate detailed definition of layout and text regions. We achieved good results at page-level: 18.71 % for Character Error Rate (CER), 39.7 % for Word Error Rate (WER), 14.11 % For Layout Ordering Error Rate (LOER), and 66.67 % for mean Average Precision (mAP).

Keywords

document understanding, handwritten text recognition, layout analysis, fully connected networks, transformers

Acknowledgments

The study was carried out at the expense of state funding, topic project No. FFZF-2022-0005.

For citation: Mohammed S., Teslya N. Joint recognition of text and layout in historical Russian documents. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 585–594. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-585-594

УДК 004.932.75

Совместное распознавание текста и оформления в исторических документах на русском языке

Самах Мохаммед¹✉, Николай Тесля²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация

¹ samahslimanmhd93@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-8009-7222>

² teslya@ias.spb.su, <https://orcid.org/0000-0003-0619-8620>

Аннотация

Рассмотрена сквозная, свободная от сегментации архитектура Document Attention Network (DAN), на примере распознавания исторических документов на русском языке. Архитектура DAN способна распознать текст или макет документа любого размера и вывести распознанный текст, а также логические области макета оформления. Выполнено сравнение полученных результатов экспериментов с набором данных Digital Peter, по которому обучены модели распознавания рукописного текста, имеющие высокую точность распознавания на уровне строк. Набор данных состоит из документов рукописей Петра Великого. Эталонные данные для архитектуры DAN представлены в соответствии со сложной схемой формата XML, которая обеспечила точное определение макета оформления и текстовых областей. Получены следующие результаты распознавания текста на уровне страницы: 18,71 % для коэффициента ошибок символов (Character Error Rate, CER), 39,7 % — коэффициента

ошибок в словах (Word Error Rate, WER), 14,11 % при упорядочении макета слов (Layout Ordering Error Rate, LOER) и 66,67 % для средней точности (mean Average Precision, mAP).

Ключевые слова

понимание документов, распознавание рукописного текста, анализ макета оформления, полносвязные сети, преобразователи

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств государственного финансирования, тема FFZF-2022-0005.

Ссылка для цитирования: Мохаммед С., Тесля Н. Совместное распознавание текста и оформления в исторических документах на русском языке // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 585–594 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-585-594

Introduction

Document Understanding [1] is a maturing field that includes a set of tasks whose purpose is to extract, classify, interpret, contextualize, and search information from documents. It implies, among others, document layout analysis and Handwritten Text Recognition (HTR).

The most state-of-the-art approaches for the task of recognition of handwritten documents are handling this task through a complex pipeline implying two main steps: segmentation and recognition. These current approaches require a huge amount of segmentate annotated documents which are very costly to produce. Moreover, the prediction error rate will be higher because of accumulating errors from both stages, this prevents a holistic understanding of the document. Also, the recognition at line-level and even paragraph-level can't preserve the global coherence of the content which is only feasible with an understanding of the layout. In addition, methods with segmentation stage have no notion of the ordered sequence among the different text regions in the same document, and that limits the ability to learn the reading order. The recognition of historical Russian documents is useful for historian's needs, to avoid experts to transcribe the texts themselves, which is very time-consuming. The Document Attention Network (DAN) model proposed by Coquenat et al. [2] jointly recognizes both text and layout at document level. The model is based on a Fully Connected Network (FCN) encoder whereas the transformer proposed by Vaswani et al. [3] had been chosen to be the decoder since it has proven its robustness HTR tasks.

In this paper, we describe the first historical Russian dataset at document level; manuscripts written by Peter the Great were used, ground truth for each document is represented by a sophisticated XML schema which is a part of the Page Analysis and Ground truth Elements (PAGE) format framework [4]. To generate this schema, a ground-truthing system Aletheia proposed by Clausner et al. [5] had been used. The XML schema is flexible, extensible, and it provides a detailed explanation of layout regions and thus it generates a serialized representation of the document that is further used as a ground truth to recognize this document.

Recent works to recognize the handwritten Russian data have applied segmentation at character level. Later on, segmentation was applied at line level [6, 7]. To our knowledge, this is the first attempt to recognize the Russian manuscripts at document level.

As we aim to recognize both text and layout from historical Russian documents, we briefly make the following contributions:

- An end-to-end architecture (DAN) [2] is trained to jointly recognize the text at document level and to label logical layout information without the need of any segmentation labels.
- We rework a historical Russian dataset at page level where the ground truth is represented by an XML paradigm to generate a serialized representation of the document.

Related work

Since our purpose is to recognize both text and layout from historical documents, this section is first devoted to HTR, and then it concentrates on Document layout Analysis.

Handwritten Text Recognition

Most works have focused on isolated line recognition and only a few studies have dedicated to multi-line recognition [8]. In the literature, many approaches have been proposed: combination of Convolutional Neural Networks (CNNs) to extract the features from an image and Bidirectional Long Short-Term Memory (BLSTM) to predict the sequence of the characters [9–11], or Multi-Dimensional LSTM [12], the problem with the MD-LSTM is the high computational cost. Alternative model proposed by Puigcerver et al. [13] which relies only on convolutional and one-dimensional recurrent layers, achieves better results and runs faster. These previous models are utilizing the Connectionist Temporal Classification (CTC) objective function [14] where probability distribution is computed over all possible output sequences for a given input sequence. However, CTC-based architectures are subject to internal limitations, such as strict Input/Output alignment and output sequence length correlated with input length.

On the contrary, sequence-to-sequence (Seq2Seq) models that follow the encoder-decoder structure are more flexible, suited to the temporal nature of text and are able to focus on the most relevant features of the input by incorporating attention mechanisms. Although, attention mechanism allows the networks to model the language structures. The encoder in the TrOCR model proposed by Li et al. [15] can be initialized with pre-trained ViT models [16–18], while the decoder can be initialized with pre-trained BERT models [19–21]. The model proposed by Bluche et al. [12] based on covert and overt attention with

MDLSTM network to recognize at paragraph level without any prior segmentation but this approach is limited by the prohibitive memory requirements. Similar model proposed by [22] to perform full page handwritten recognition without image segmentation but this model need to be trained with longer sequence length and reduce the encoder size (22 million parameters). Rouhou et al. [23] proposed a transformer-based model that jointly operates Handwriting and Named Entity Recognition only at paragraph level. All the approaches that proposed so far for the task of Russian historical documents recognition use explicit line segmentation and this is very costly to produce. The authors in [6] used the Convolutional Recurrent Neural Network (CRNN) model proposed by Shi et al. [11] to recognize Peter the Great manuscripts at line level. Later, the authors introduced two novel data augmentation methods [7], strikethrough text algorithm Handwritten Blots, and handwritten text generation algorithm StackMix; the two methods are applied to the Resnet-BiLSTM-CTC model.

Document Layout Analysis

Document Layout Analysis (DLA) is the process of extracting and identifying the physical regions of interest in a textual document. This process is based on physical ground truth annotations that describe the related semantic labels to each document. DLA is a maturing field and here are some recent approaches. DeepDeSRT proposed by Schreiber et al. [24] is the first end-to-end model for table understanding. Later Fully Convolutional Neural Networks (FCNNs) are proposed for pixel-wise segmentation on historical documents in order to detect tables and figures in these documents [25]. A Multimodal-FCN (MFCN) introduced by Yang et al. [26] for document semantic structure, it uses both textual and visual information. In [27], the LayoutLM model introduced for Visual Document Understanding (VDU) tasks like named entity recognition and key-value pair information extraction, the model uses the masked visual-language model and the multi-label document classifications as the training objectives and the BERT architecture used as the backbone. Later on, an improved version of LayoutMv2 [28] presented where the visual information is integrated in the pre-training stage to learn the cross-modality interaction between visual and textual information.

For instance level recognition, the first End-to-End Document Image Segmentation Transformer (DocSegTr) introduced by Biswas et al. [29], this model shows high performance with overlapped layout objects but doesn't manifest much improvements for smaller regions. The self-supervised pre-training for Document image Transformer proposed by Li et al. [30], the model is pre-trained with large scale unlabeled document images where each document image is divided into nonoverlapping patches before passing it into a stack of transformers. Table 1 provides a brief comparison between the previous approaches.

Data Preparation

In this section we describe the procedures using the ground-truthing system tool Aletheia to obtain XML paradigm for each handwritten document of Peter the Great manuscripts that is further used as a ground truth of the document image. We suppose this dataset may be beneficial for researchers to train HTR at document level.

Mark et al. [6] convert the manuscripts of Peter the Great (662 full copies) into lines, they had to split each document image manually using Computer Vision Annotation Tool (CVAT)¹, the resulting dataset consists of 9694 images and text files. Because the text for each document image, as the document images have the following format x_y_z, where x is the series number, y is the page number, and z is the line number on this page, then we could be able to reassign each line with its document image and obtain a full transcription of the document.

As a prior stage, some documents need to be cropped to remove all the items that can effect on the recognition process, such as the stamp of Federal Archival Agency, irrelevant writing in the background, etc., and we keep only Peter the Great writing. Then, we manually detect all the text regions in the document image by drawing a rectangle around each one; we also manually provide the reading orientation and the corresponding labels for all the text regions. Based on these regions, we automatically

¹ Available at: URL: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4009388> (accessed: 01.11.2022).

Table 1. State-of-art approaches for Document Layout Analysis

DLA Model	Main architectures	Document of Artificial Intelligence tasks
dhSegment [25]	Single Res-Net 50	— Page and baseline extraction. — Document Layout Analysis. — Ornament detection. — Photo-collection extraction.
MFCN [26]	Multimodal Fully Convolutional Networks	Extract semantic structures from document images
LayoutLM [27]	BERT architecture	Information extraction from scanned documents
LayoutLMv2 [28]	Multi-Modal Transformer	Model the interaction among text, layout and image in a single multimodal framework.
DocSegTr [29]	Hybrid CNN based Transformer	— Instance-level extraction. — Document Layout analysis.
DiT [30]	Vanilla Transformer architecture	— Document image classification. — Document Layout Analysis. — Table extraction.

added a class to each text region among these five classes: Page (P), Page Number (N), Body (B), Annotation (A) and Section (S) where the section is a group of linked annotations and body. For the text lines, we also draw a rectangle or polygons surrounding each line, we assign the baseline points, the labels and reading order for each line in each text region. We also highlight that reading order is defined by hand, based on the sequence of the text lines and text regions, this could cause some errors in case of slanted lines. Then, a PAGE XML diagram is generated for each document and this diagram is further used as a ground of the document image.

The dataset consists of 350 documents at page level with the corresponding PAGE XML diagram for each document.

Model Architecture

We opted for DAN model [2] as it is the first end-to-end encoder-decoder architecture to recognize both the text and layout from a document image, each document is represented by a sequence y of tokens with length L_y , as shown in Fig. 1.

The FCN had been chosen as an encoder because it is known for its ability to handle input images of different sizes. In [31], the FCN encoder takes as input a document image $X \in \mathbb{R}^{H \times W \times C}$, where H , W , C are the height, width, and number of channels, respectively ($C = 3$ for an RGB image). The encoder extracts 2D features maps from the input document: $f_{2D} \in \mathbb{R}^{H_f \times W_f \times C_f}$, where $H_f = \frac{H}{32}$, $W_f = \frac{W}{8}$ and $C_f = 256$. The positional encoding describes the position of an entity in a sequence so that each position is assigned a unique representation; mathematically it can be explained as sine and cosine functions with different frequencies. Then, the 2D features maps are added to a 2D positional encoding to get 1D features maps. The 1D features maps with the previously predict tokens ($\hat{y}_0, \hat{y}_1, \dots, \hat{y}_{t-1}$) form the input to the decoder which made up of a stack of 8 transformers based on multihead attention mechanism followed by a 1×1 convolutional layer to compute the next token probabilities, the multihead attention is based on previous predictions where queries Q , keys K and values V are from the same input. Also, an attention window is used to reduce to computation time, It means that given an input sequence s of length L_s , the t^{th} output frame o_t is computed over the range $[s_a, s_{t-1}]$ with $a = \max(0; t-100)$. The DAN model is trained using the cross-entropy function over the sequence of tokens.

$$\zeta = \sum_{t=1}^{L_y+1} \zeta_{CE}(y_t, p_t),$$

where ζ_{CE} is the cross entropy loss for each token and ζ is the total cross-entropy loss over the sequence of tokens.

Training strategies and Metrics

Training strategies

As a prior stage before training, synthetic printed lines and synthetic documents are generated where the synthetic

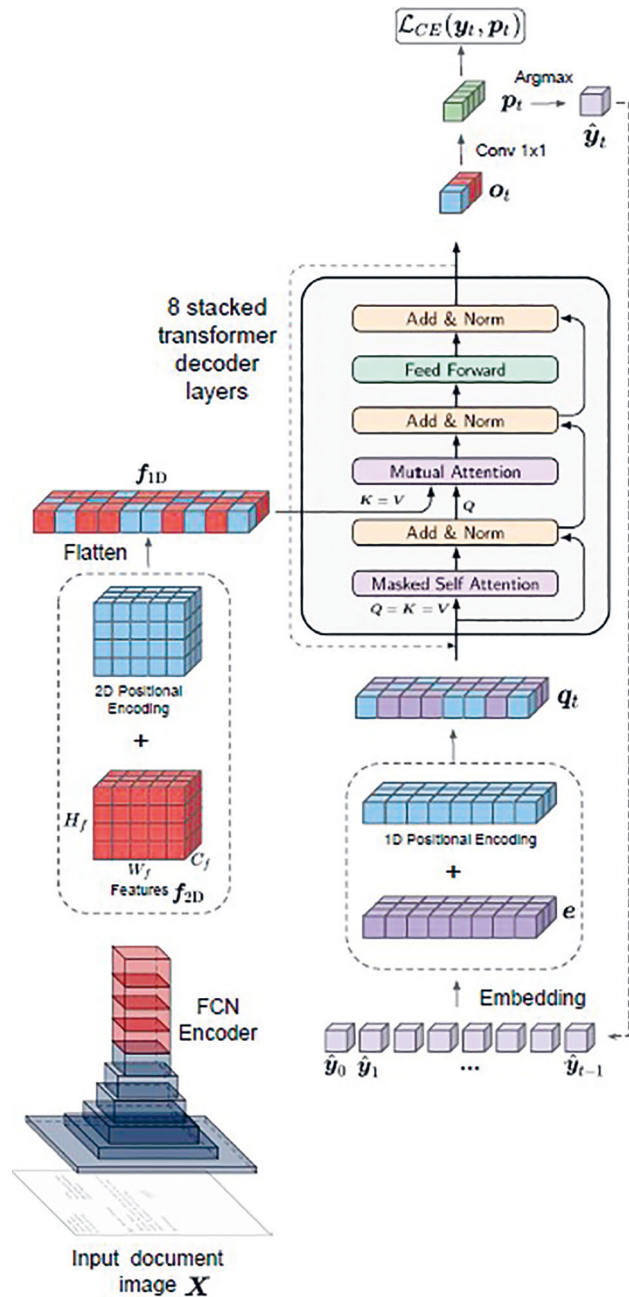


Fig. 1. Document Attention Network [1]
(Abbreviations of the variables explained later in the text)

printed lines are used to train the feature extraction part of the DAN, and the synthetic documents are used to learn the reading order as the reading order is the same between the real and synthetic documents. For synthetic printed lines, the real documents dataset D_{doc} is used to extract isolated text lines transcriptions and generate lines dataset D_{line} which is used to generate arbitrarily synthetic printed lines; we chose a set of more than 40 different fonts with different sizes to have more variability and make the model more robust. The generation of synthetic documents is explained by the algorithm proposed in [2] where a document image is chosen randomly from the input documents to be a template to generate the synthetic documents.

The main points in the training process can be summarized as follows:

- Synthetic printed text lines are generated to train a line-level OCR model as proposed in [31], the weights then used to initialize the weights of the FCN encoder and the last convolutional layer of the decoder for training the DAN on our dataset.
- In order to reduce the overfitting, a data augmentation strategy with a probability of 90 % is used, transformations, such as color jittering, erosion, dilation, gaussian blur, gaussian noise and resolution modification, are applied in random order with a probability 10 % for each one.
- A teacher forcing is used at training to parallelize the computations by predicting the whole sequence at once where the previously predicted tokens are replaced by the ground truth.
- A curriculum strategy is applied to improve the convergence where the training process begins with 90 % synthetic documents to learn the reading order first, then the percentage is reduced gradually to 20 % to fine tune on the real documents.
- The DAN model is trained on heterogenous documents; from historical German dataset (READ_16 dataset) and historical Russian dataset (Digital Peter dataset).
- After training, the unpaired predicted layout tokens are handled through a forward pass on the entire document by adding a missing end token or removing an isolated one. The predicted layout tokens will be used to evaluate the layout recognition.

Metrics

As the DAN model jointly recognizes text and layout, the evaluation of the model is correlated with the evaluation of the text recognition, the layout recognition, and the evaluation of joint recognition of both layout and text.

The evaluation of text recognition. The performance of text recognition is evaluated using the Character Error Rate (CER) which is the most common metric to evaluate the text recognition approaches [8, 13, 31, 32]. It is the sum of Levenshtein distance (d_{lev}) among the ground truth y^{text} and the predictions \hat{y}^{text} (after removing all the layout tokens) from The XML diagram, normalized by the total length of the ground truth $y_{len_1}^{text}$.

$$CER = \frac{\sum_{i=1}^K d_{lev}(y^{text}, \hat{y}^{text})}{\sum_{i=1}^K y_{len_1}^{text}},$$

where d_{lev} is the minimum number of single-character (or word) edits (i.e., insertions, deletions, or substitutions) required to change one word (or sentence) into another.

Word Error Rate (WER) is also used to evaluate text recognition and it is computed in the same way but at word level.

The evaluation of layout recognition. The evaluation of the layout recognition should be considering the evaluation of reading order and the hierarchical relations between layout entities. We have to model the layout as an oriented graph by first computing the ground truth y^{graph} and the predictions \hat{y}^{graph} (after all but layout tokens are

removed). e.g. $y^{graph} = \langle D \rangle \langle S \rangle \langle P \rangle \langle P \rangle \langle S \rangle \langle D \rangle$, where D is a document, P is a paragraph, S is a section, N is number, A is annotation, and B is body. Then by following the hierarchical rules of dataset, we map the sequence of layout tokens into an oriented graph as shown in Fig. 2 where the nodes are the document entities (Document, Section, Annotation, Number).

The dashed arrows represent the hierarchy of the entities within the document and the solid arrows represent the reading order of these entities. The Layout Ordering Error Rate (LOER) (represented below) is used to evaluate the layout recognition, it is calculated as the Graph Edit Distance (GED) for K samples, normalized by the sum of the number of the edges n_{e_i} and nodes n_{en_i} in the ground truth:

$$LOER = \frac{\sum_{i=1}^K GED(y^{graph}, \hat{y}^{graph})}{\sum_{i=1}^K n_{e_i} + n_{en_i}}.$$

a

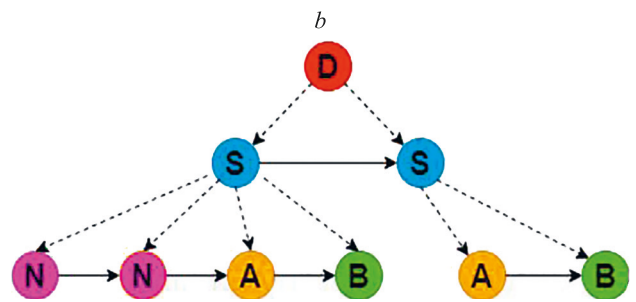
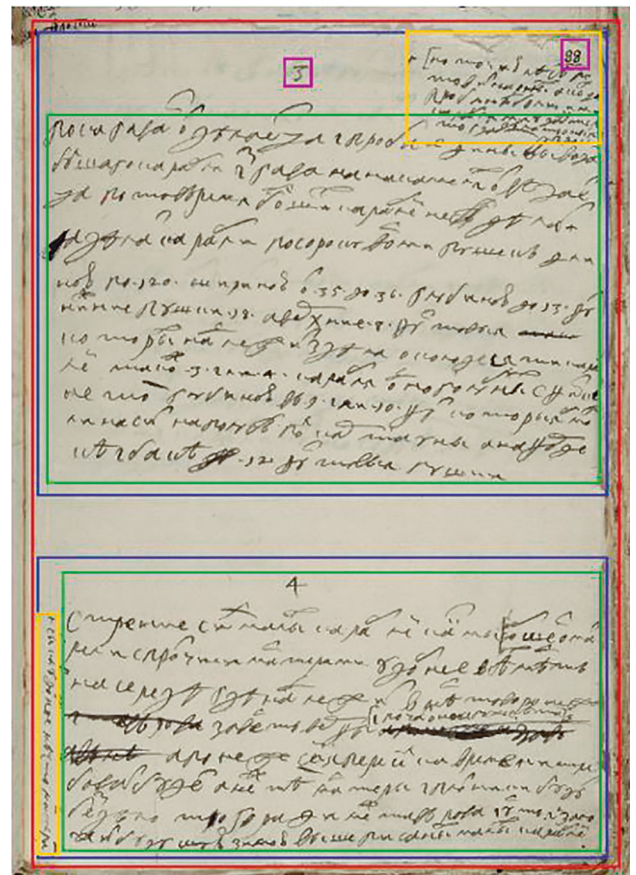


Fig. 2. Document image (a) with associated layout graph annotation (b)

The graph edit distance is computed using a unit cost of edition whether it is for addition, removing or substitution, and whether it is for edges or for nodes. However, computing CER and LOER is not sufficient to evaluate the correct recognition of document. These metrics can't evaluate the association between the layout and the text parts of the document.

The evaluation of joint recognition of both text and layout. Based on the mean average precision mAP score proposed by [33] for object detection approaches, Coquen et al. [1] proposed a similar new metric to evaluate the joint recognition of both text and layout where the predicted sequence \hat{y} and the ground truth y sequence are split into sub-sequences extracted using the begin and the end tokens of the same class c , and thus the mean average precision metric is computed as a weighted sum over the different layout classes weighted by the number of characters len_c in each class c :

$$mAP_{CER} = \frac{\sum_{c \in S} AP_{CER_c}^{\theta_{\min}, \theta_{\max}, \Delta\theta} len_c}{\sum_{c \in S} len_c},$$

where $\theta_{\min}, \theta_{\max}, \Delta\theta$ are different CER thresholds.

Experiments

In this section we evaluate the DAN model on the Digital Peter dataset at document level, we considered the same configurations for pre-training and training on DAN model. Also, we provide an ablation study to emphasize the key components that made it feasible for these outcomes to be achieved. The DAN model is evaluated on the test set of RIMES dataset [34] and READ 2016 dataset [32] and compared with the most state-of-the-art approaches at line-level as shown in Table 2 and 3.

One can notice that the values of CER, WER are slightly better for the page level dataset, and this can be explained by the higher necessity to understand the layout.

The Digital Peter dataset is split in training, validation, and test sets on-line level and page level (Table 3). Also, we provide the number of characters for each and the number of layout tokens.

To generate synthetic documents, we set the maximum number of lines per page $l_{\max} = 35$ to match the dataset properties. For all our experiments on DAN model, we use the Adam optimizer with an initial learning rate ($lr = 0.00005$). Pre-training and training are performed on a single GPU RTX 3090 (24 GB).

The DAN model had been trained with mini-batch size of 16 for line-level training and mini-batch size of 1 for training at page level. The DAN model is first trained a line-level OCR model on synthetic printed lines, this pre-training step is carried out during 24 hours and then for transfer learning purposes, the weights are used to initialize the FCN encoder and the last convolutional layer of the decoder where training at page level is carried out during 5 days. Moreover, we didn't use any language model.

For the Digital Peter dataset, we evaluated the DAN model on the test set at page-level and compared the results with the state-of-the-art models at line-level as detailed in Table 4.

The DAN is based on an autoregressive prediction process. This is not a problem at training time since computation are parallelized through teacher forcing. However, this recurrence issue is significant at prediction time: it grows linearly with the number of tokens to be predicted. This way, the average prediction time for a test sample is 4.4s. We aim at reducing this prediction time in future works. An example of an input document with the output of the DAN model is shown in Fig. 3.

Table 2. Evaluation of the DAN model on the test datasets READ 2016 and RIMES with the line-level recognition approaches, %

Model	CER	WER	LOER	mAP _{CER}
READ 2016 dataset				
Line level				
CNN + RNN [32]	5.10	21.10	—	—
FCN + BLSTM [31]	4.10	16.29	—	—
Page level				
DAN	3.53	13.33	5.94	92.75
RIMES dataset				
Line level				
FCN + BLSTM [31]	3.04	8.32	—	—
CNN + BLSTM [13]	2.30	9.60	—	—
Page level				
DAN	4.54	11.85	3.82	93.74

Table 3. Dataset partitions with associated number of characters and layout tokens

Dataset	level	training	validation	test	no. of char	no. of layout tokens
Digital Peter	Line	6237	1527	1930	84	—
	Page	250	50	50	84	10

Table 4. Evaluation of the DAN model on the test set of Digital Peter dataset with the line-level recognition approaches, %

Model	CER	WER	LOER	mAPCER
<u>Line level</u> CRNN [6]	7.10	39.7	—	—
Resnet + BLSTM [7]	2.50	14.6	—	—
<u>Page level</u> DAN	18.71	39.7	14.11	66.67

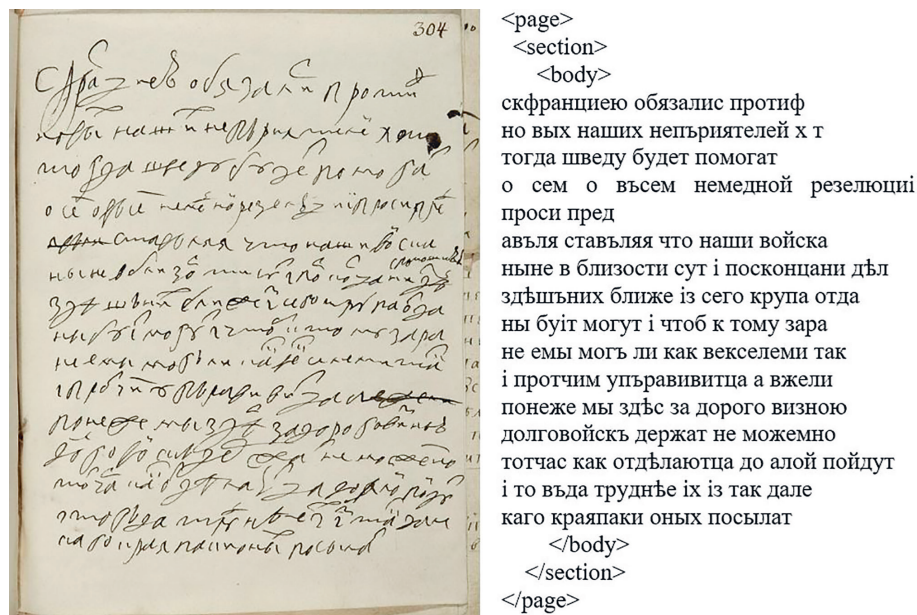


Fig. 3. Example of the input and prediction of the DAN model

Table 5. Ablation study of the DAN model on the Digital Peter dataset, %

Case number	DAN model	CER	WER	LOER	mAPCER
1	Base	84.34	90.73	39.24	3.95
2	Without synthetic data	86.37	93.82	50.32	0.61
3	Without pre-training stage	88.96	89.43	45.57	2.49

Then, we provide an ablation study as detailed in Table 5. All the experiments are carried out for 2 days. In case 2, the model is trained only on the available real documents without generating synthetic documents. In case 3, we train the DAN model on Digital Peter dataset from scratch, without transfer learning from a prior pre-training step.

As one can notice, results are dramatically worse, which highlights that the obtained results are very dependent on the synthetic data and its quality, i.e., they must be close to the original dataset, notably in terms of layout.

Conclusion

In this paper, we evaluated the DAN model on the Digital Peter dataset. DAN is the first end-to-end free segmentation model to tackle Handwritten Document Recognition (HDR) which corresponds to the joint recognition of text and layout. HDR is a new step toward

the holistic understanding of whole handwritten documents; meanwhile the recognition at line-level and even paragraph-level can't preserve the global coherence of the content which is only feasible with an understanding of the layout. The obtained results for text recognition are comparable to those obtained at line level, this can be explained by the higher necessity to understand the layout. Also, this increases the speed of deciphering historical documents. For example, it took a team of 10–15 historians about 3 months to decipher 662 full digital copies of Peter the Great's manuscripts but when working on the same dataset on a single GPU RTX 3090, the average decryption speed was 13 pages/min, which is encouraging by historical scientists. In future works, we will work on improving the result.

Also, it would be interesting to go a step further, by recognizing handwritten documents with heterogeneous sizes and layouts.

References

Литература

1. Sánchez J., Romero V., Toselli A.H., Vidal E. ICFHR2016 competition on handwritten text recognition on the READ dataset. *Proc. of the 15th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR)*, 2016, pp. 630–635. <https://doi.org/10.1109/icfhr.2016.0120>
2. Coquenat D., Chatelain C., Paquet T. DAN: a segmentation-free document attention network for handwritten document recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2023, in press. <https://doi.org/10.1109/tpami.2023.3235826>
3. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*, 2017, pp. 5998–6008.
4. Pletschacher S., Antonacopoulos A. The PAGE (Page Analysis and Ground-truth Elements) format framework. *Proc. of the 20th International Conference on Pattern Recognition*, 2010, pp. 257–260. <https://doi.org/10.1109/icpr.2010.72>
5. Clausner C., Pletschacher S., Antonacopoulos A. Aletheia - An advanced document layout and text ground-truthing system for production environments. *Proc. of the International Conference on Document Analysis and Recognition*, 2011, pp. 48–52. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2011.19>
6. Potanin M., Dimitrov D., Shonenkov A., Bataev V., Karachev D., Novopoltsev M., Chertok A. Digital Peter: New dataset, competition and handwriting recognition methods. *Proc. of the HIP'21: The 6th International Workshop on Historical Document Imaging and Processing*, 2021, pp. 43–48. <https://doi.org/10.1145/3476887.3476892>
7. Shonenkov A., Karachev D., Novopoltsev M., Potanin M., Dimitrov D. StackMix and blot augmentations for handwritten text recognition. *arXiv*, 2021, arXiv:2108.11667. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.11667>
8. Teslya N., Mohammed S. Deep learning for handwriting text recognition: Existing approaches and challenges. *Proc. of the 31st Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 2022, pp. 339–346. <https://doi.org/10.23919/FRUCT54823.2022.9770912>
9. Bluche T., Messina R. Gated convolutional recurrent neural networks for multilingual handwriting recognition. *Proc. of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. V. 1, 2017, pp. 646–651. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2017.111>
10. De Sousa Neto A.F., Bezerra B.L.D., Toselli A.H., Lima E.B. HTR-Flor: A deep learning system for offline handwritten text recognition. *Proc. of the 33rd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*, 2020, pp. 54–61. <https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI51738.2020.00016>
11. Shi B., Bai X., Yao C. An end-to-end trainable neural network for image-based sequence recognition and its application to scene text recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, vol. 39, no. 11, pp. 2298–2304. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2646371>
12. Bluche T., Louradour J., Messina R. Scan, attend and read: End-to-end handwritten paragraph recognition with MDLSTM attention. *Proc. of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. V. 1, 2017, pp. 1050–1055. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2017.174>
13. Puigcerver J. Are multidimensional recurrent layers really necessary for handwritten text recognition? *Proc. of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. V. 1, 2017, pp. 67–72. <https://doi.org/10.1109/icdar.2017.20>
14. Graves A., Fernández S., Gomez F., Schmidhuber J. Connectionist temporal classification: labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks. *ICML '06: Proc. of the 23rd International Conference on Machine Learning*, 2006, pp. 369–376. <https://doi.org/10.1145/1143844.1143891>
15. Li M., Lv T., Chen J., Cui L., Lu Y., Florencio D., Zhang C., Li Z., Wei F. TrOCR: Transformer-based optical character recognition with pre-trained models. *arXiv*, 2021, arXiv:2109.10282. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.10282>
16. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthiner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S., Uszkoreit J., Houlsby N. An image is worth more than 16X16 words: transformers for image recognition. *ICLR 2021*. Available at: <https://openreview.net/pdf?id=YicbFdNTTy> (accessed: 23.12.2022).
1. Sánchez J., Romero V., Toselli A.H., Vidal E. ICFHR2016 competition on handwritten text recognition on the READ dataset // *Proc. of the 15th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR)*. 2016. P. 630–635. <https://doi.org/10.1109/icfhr.2016.0120>
2. Coquenat D., Chatelain C., Paquet T. DAN: a segmentation-free document attention network for handwritten document recognition // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2023. in press. <https://doi.org/10.1109/tpami.2023.3235826>
3. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A.N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need // *Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)*. 2017. P. 5998–6008.
4. Pletschacher S., Antonacopoulos A. The PAGE (Page Analysis and Ground-truth Elements) format framework // *Proc. of the 20th International Conference on Pattern Recognition*. 2010. P. 257–260. <https://doi.org/10.1109/icpr.2010.72>
5. Clausner C., Pletschacher S., Antonacopoulos A. Aletheia - An advanced document layout and text ground-truthing system for production environments // *Proc. of the International Conference on Document Analysis and Recognition*. 2011. P. 48–52. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2011.19>
6. Potanin M., Dimitrov D., Shonenkov A., Bataev V., Karachev D., Novopoltsev M., Chertok A. Digital Peter: New dataset, competition and handwriting recognition methods // *Proc. of the HIP'21: The 6th International Workshop on Historical Document Imaging and Processing*. 2021. P. 43–48. <https://doi.org/10.1145/3476887.3476892>
7. Shonenkov A., Karachev D., Novopoltsev M., Potanin M., Dimitrov D. StackMix and blot augmentations for handwritten text recognition // *arXiv*. 2021. arXiv:2108.11667. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.11667>
8. Teslya N., Mohammed S. Deep learning for handwriting text recognition: Existing approaches and challenges // *Proc. of the 31st Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. 2022. P. 339–346. <https://doi.org/10.23919/FRUCT54823.2022.9770912>
9. Bluche T., Messina R. Gated convolutional recurrent neural networks for multilingual handwriting recognition // *Proc. of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. V. 1. 2017. P. 646–651. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2017.111>
10. De Sousa Neto A.F., Bezerra B.L.D., Toselli A.H., Lima E.B. HTR-Flor: A deep learning system for offline handwritten text recognition // *Proc. of the 33rd SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*. 2020. P. 54–61. <https://doi.org/10.1109/SIBGRAPI51738.2020.00016>
11. Shi B., Bai X., Yao C. An end-to-end trainable neural network for image-based sequence recognition and its application to scene text recognition // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017. V. 39. N 11. P. 2298–2304. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2646371>
12. Bluche T., Louradour J., Messina R. Scan, attend and read: End-to-end handwritten paragraph recognition with MDLSTM attention // *Proc. of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. V. 1. 2017. P. 1050–1055. <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2017.174>
13. Puigcerver J. Are multidimensional recurrent layers really necessary for handwritten text recognition? // *Proc. of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. V. 1. 2017. P. 67–72. <https://doi.org/10.1109/icdar.2017.20>
14. Graves A., Fernández S., Gomez F., Schmidhuber J. Connectionist temporal classification: labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks // *ICML '06: Proc. of the 23rd International Conference on Machine Learning*. 2006. P. 369–376. <https://doi.org/10.1145/1143844.1143891>
15. Li M., Lv T., Chen J., Cui L., Lu Y., Florencio D., Zhang C., Li Z., Wei F. TrOCR: Transformer-based optical character recognition with pre-trained models // *arXiv*. 2021. arXiv:2109.10282. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.10282>
16. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthiner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S., Uszkoreit J., Houlsby N. An image is worth more than 16X16 words: transformers for image recognition // *ICLR 2021* [Электронный ресурс]. URL: <https://openreview.net/pdf?id=YicbFdNTTy> (дата обращения: 23.12.2022).

17. Touvron H., Cord M., Douze M., Massa F., Sablayrolles A., Jégou H. Training data-efficient image transformers & distillation through attention. *arXiv*, 2020, arXiv:2012.12877. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.12877>
18. Bao H., Dong L., Wei F. BEiT: BERT Pre-training of image transformers. *arXiv*, 2021, arXiv:2106.08254. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.08254>
19. Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *Proc. of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL)*. V. 1, 2019, pp. 4171–4186. <https://doi.org/https://aclanthology.org/N19-1423>
20. Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Levy O., Lewis M., Zettlemoyer L., Stoyanov V. RoBERTa: A robustly optimized bert pretraining approach. *arXiv*, 2019, arXiv:1907.11692. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.11692>
21. Dong L., Yang N., Wang W., Wei F., Liu X., Wang Y., Gao J., Zhou M., Hon H.-W. Unified language model pre-training for natural language understanding and generation. *Advances in Neural Information Processing Systems 32 (NeurIPS)*, 2019.
22. Singh S.S., Karayev S. Full page handwriting recognition via image to sequence extraction. *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, vol. 12823, pp. 55–69. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86334-0_4
23. Rouhou A.C., Dhiaf M., Kessentini Y., Ben Salem S. Transformer-based approach for joint handwriting and named entity recognition in historical document. *Pattern Recognition Letters*, 2022, vol. 155, pp. 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.11.010>
24. Schreiber S., Agne S., Wolf I., Dengel A., Ahmed S. DeepDeSRT: Deep learning for detection and structure recognition of tables in document images. *Proc. of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. V. 1, 2017, pp. 1162–1167. <https://doi.org/10.1109/icdar.2017.192>
25. Ares Oliveira S., Seguin B., Kaplan F. DhSegment: A generic deep-learning approach for document segmentation. *Proc. of the 16th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR)*, pp. 7–12. <https://doi.org/10.1109/icfhr-2018.2018.00011>
26. Yang X., Yumer E., Asente P., Kralej M., Kifer D., Giles C.L. Learning to extract semantic structure from documents using multimodal fully convolutional neural networks. *Proc. of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 4342–4351. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.462>
27. Xu Y., Li M., Cui L., Huang S., Wei F., Zhou M. LayoutLM: Pre-training of text and layout for document image understanding. *Proc. of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2020, pp. 1192–1200. <https://doi.org/10.1145/3394486.3403172>
28. Xu Y., Xu Y., Lv T., Cui L., Wei F., Wang G., Lu Y., Florencio D., Zhang C., Che W., Zhang M., Zhou L. LayoutLMv2: Multi-modal pre-training for visually-rich document understanding. *Proc. of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing*. V. 1, 2021, pp. 2579–2591. <https://doi.org/10.18653/v1/2021.acl-long.201>
29. Biswas S., Banerjee A., Lladós J., Pal U. DocSegTr: An Instance-level end-to-end document image segmentation transformer. *arXiv*, 2022, arXiv:2201.11438. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.11438>
30. Li J., Xu Y., Lv T., Cui L., Zhang C., Wei F. DiT: Self-supervised pre-training for document image transformer. *MM '22: Proc. of the 30th ACM International Conference on Multimedia*, 2022, pp. 3530–3539. <https://doi.org/10.1145/3503161.3547911>
31. Coquenat D., Chatelain C., Paquet T. End-to-end handwritten paragraph text recognition using a vertical attention network. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2023, vol. 45, no. 1, pp. 508–524. <https://doi.org/10.1109/tpami.2022.3144899>
32. Grosicki E., Abed H.E. ICDAR 2011 - French handwriting recognition competition. *Proc. of the International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, 2011, pp. 1459–1463. <https://doi.org/10.1109/icdar.2011.290>
33. Everingham M., Gool Van L., Williams C.K.I., Winn J. The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge. *International Journal of Computer Vision*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 303–338. <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>
17. Touvron H., Cord M., Douze M., Massa F., Sablayrolles A., Jégou H. Training data-efficient image transformers & distillation through attention // *arXiv*. 2020. arXiv:2012.12877. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.12877>
18. Bao H., Dong L., Wei F. BEiT: BERT Pre-training of image transformers // *arXiv*. 2021. arXiv:2106.08254. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.08254>
19. Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding // *Proc. of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL)*. V. 1. 2019. P. 4171–4186. <https://doi.org/https://aclanthology.org/N19-1423>
20. Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Levy O., Lewis M., Zettlemoyer L., Stoyanov V. RoBERTa: A robustly optimized bert pretraining approach // *arXiv*. 2019. arXiv:1907.11692. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.11692>
21. Dong L., Yang N., Wang W., Wei F., Liu X., Wang Y., Gao J., Zhou M., Hon H.-W. Unified language model pre-training for natural language understanding and generation // *Advances in Neural Information Processing Systems 32 (NeurIPS)*. 2019.
22. Singh S.S., Karayev S. Full page handwriting recognition via image to sequence extraction // *Lecture Notes in Computer Science*. 2021. V. 12823. P. 55–69. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86334-0_4
23. Rouhou A.C., Dhiaf M., Kessentini Y., Ben Salem S. Transformer-based approach for joint handwriting and named entity recognition in historical document // *Pattern Recognition Letters*. 2022. V. 155. P. 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.11.010>
24. Schreiber S., Agne S., Wolf I., Dengel A., Ahmed S. DeepDeSRT: Deep learning for detection and structure recognition of tables in document images // *Proc. of the 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. V. 1. 2017. P. 1162–1167. <https://doi.org/10.1109/icdar.2017.192>
25. Ares Oliveira S., Seguin B., Kaplan F. DhSegment: A generic deep-learning approach for document segmentation // *Proc. of the 16th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR)*. P. 7–12. <https://doi.org/10.1109/icfhr-2018.2018.00011>
26. Yang X., Yumer E., Asente P., Kralej M., Kifer D., Giles C.L. Learning to extract semantic structure from documents using multimodal fully convolutional neural networks // *Proc. of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017. P. 4342–4351. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.462>
27. Xu Y., Li M., Cui L., Huang S., Wei F., Zhou M. LayoutLM: Pre-training of text and layout for document image understanding // *Proc. of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2020. P. 1192–1200. <https://doi.org/10.1145/3394486.3403172>
28. Xu Y., Xu Y., Lv T., Cui L., Wei F., Wang G., Lu Y., Florencio D., Zhang C., Che W., Zhang M., Zhou L. LayoutLMv2: Multi-modal pre-training for visually-rich document understanding // *Proc. of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing*. V. 1. 2021. P. 2579–2591. <https://doi.org/10.18653/v1/2021.acl-long.201>
29. Biswas S., Banerjee A., Lladós J., Pal U. DocSegTr: An Instance-level end-to-end document image segmentation transformer // *arXiv*. 2022. arXiv:2201.11438. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.11438>
30. Li J., Xu Y., Lv T., Cui L., Zhang C., Wei F. DiT: Self-supervised pre-training for document image transformer // *MM '22: Proc. of the 30th ACM International Conference on Multimedia*. 2022. P. 3530–3539. <https://doi.org/10.1145/3503161.3547911>
31. Coquenat D., Chatelain C., Paquet T. End-to-end handwritten paragraph text recognition using a vertical attention network // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2023. V. 45. N 1. P. 508–524. <https://doi.org/10.1109/tpami.2022.3144899>
32. Grosicki E., Abed H.E. ICDAR 2011 - French handwriting recognition competition // *Proc. of the International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. 2011. P. 1459–1463. <https://doi.org/10.1109/icdar.2011.290>
33. Everingham M., Gool Van L., Williams C.K.I., Winn J. The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge // *International Journal of Computer Vision*. 2010. V. 8. N 2. P. 303–338. <https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4>

34. Sánchez J.A., Romero V., Toselli A.H., Vidal E. ICFHR2016 competition on handwritten text recognition on the READ dataset. *Proc. of the 15th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR)*, 2016, pp. 630–635. <https://doi.org/10.1109/icfhr.2016.0120>

34. Sánchez J.A., Romero V., Toselli A.H., Vidal E. ICFHR2016 competition on handwritten text recognition on the READ dataset // *Proc. of the 15th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR)*. 2016. P. 630–635. <https://doi.org/10.1109/icfhr.2016.0120>

Authors

Samah Mohammed — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57700909900](https://orcid.org/0000-0002-8009-7222), <https://orcid.org/0000-0002-8009-7222>, Samahslimanmhmd93@gmail.com

Nikolay Teslya — PhD, Senior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, [sc 56946917500](https://orcid.org/0000-0003-0619-8620), <https://orcid.org/0000-0003-0619-8620>, teslya@iiias.spb.su

Авторы

Мохаммед Самах — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57700909900](https://orcid.org/0000-0002-8009-7222), <https://orcid.org/0000-0002-8009-7222>, Samahslimanmhmd93@gmail.com

Тесля Николай — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация, [sc 56946917500](https://orcid.org/0000-0003-0619-8620), <https://orcid.org/0000-0003-0619-8620>, teslya@iiias.spb.su

Received 09.11.2022

Approved after reviewing 01.03.2023

Accepted 16.05.2023

Статья поступила в редакцию 09.11.2022

Одобрена после рецензирования 01.03.2023

Принята к печати 16.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-595-607

УДК 004.822:616-07

Интеллектуальная поддержка клинических решений при небольших выборках числа пациентов

Александра Сергеевна Ватьян¹, Александр Андреевич Голубев²,
Наталья Федоровна Гусарова³✉, Наталья Викторовна Добренко⁴,
Алексей Александрович Зубаненко⁵, Екатерина Сергеевна Кустова⁶,
Анна Андреевна Татаринова⁷, Иван Вячеславович Томилов⁸,
Григорий Филиппович Шовкопляс⁹

^{1,2,3,4,6,8,9} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁵ ООО «ИМВИЖН», Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация

⁷ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация

¹ alexvatyan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5483-716X>

² 9459539@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7417-6947>

³ natfed@list.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-1361-6037>

⁴ grazziokisa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6206-8033>

⁵ zubdocmri@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6953-5239>

⁶ Katya.Kustova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6117-1266>

⁷ antsvet.18@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9046-2457>

⁸ ivan-tomilov3@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1886-2867>

⁹ grigory.96@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7777-6972>

Аннотация

Введение. Рассмотрены пути обоснования клинического решения врачей в условиях отсутствия клинических протоколов лечения. **Метод.** Выполнена сравнительная оценка статистических методов ранжирования клинических симптомов по степени значимости для прогнозирования исхода заболевания в условиях небольшой выборки числа пациентов с COVID-19 и сердечно-сосудистыми заболеваниями в анамнезе. Набор данных (141 пациент, 81 фактор) сформирован по материалам электронных медицинских карт пациентов ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова». Выделен поднабор контролируемых факторов риска (51 фактор). Для ранжирования факторов использованы методы дескриптивной статистики (однофакторный дисперсионный анализ, тесты Манна-Уитни и χ^2) и методы снижения размерности (одномерная линейная регрессия в сочетании с множественной логистической регрессией, обобщенный дискриминантный анализ, а также различные варианты алгоритмов дерева решений). Для сравнения результатов ранжирования и оценки статистической устойчивости применена корреляция Кендалла, визуализированная в виде тепловой карты и позиционного графика. **Основные результаты.** Установлено, что использование методов дескриптивной статистики правомерно при ранжировании на небольших размерах выборки пациентов. Показано, что ансамблирование результатов ранжирования может оказаться статистически несостоятельным. Сделан вывод, что позиции одних и тех же признаков, полученных при ранжировании их в составе полного набора и поднабора признаков, не совпадают, поэтому при выборе метода статистической обработки для экспертной оценки следует учитывать содержательную постановку задачи. Показано, что статистическая устойчивость ранжирования в условиях малых выборок зависит от количества учитываемых признаков, и эта зависимость существенно отличается для разных методов ранжирования. **Обсуждение.** Предложенная методика интеллектуальной поддержки и верификации клинических решений в аспекте выбора наиболее значимых клинических признаков может найти применение для выбора и обоснования тактики ведения пациентов при отсутствии клинических протоколов.

© Ватьян А.С., Голубев А.А., Гусарова Н.Ф., Добренко Н.В., Зубаненко А.А., Кустова Е.С., Татаринова А.А., Томилов И.В., Шовкопляс Г.Ф., 2023

Ключевые слова

поддержка клинических решений, клиническая экспертиза, ранжирование признаков, небольшие группы, статистические методы

Благодарности

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-5723.2021.1.6.

Ссылка для цитирования: Ватян А.С., Голубев А.А., Гусарова Н.Ф., Добренко Н.В., Зубаненко А.А., Кустова Е.С., Татаринова А.А., Томилов И.В., Шовкопьяс Г.Ф. Интеллектуальная поддержка клинических решений при небольших выборках числа пациентов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 595–607. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-595-607

Intelligent clinical decision support for small patient datasets

Alexandra S. Vatian¹, Alexander A. Golubev², Natalia F. Gusarova³✉,
Natalia V. Dobrenko⁴, Aleksei A. Zubanenko⁵, Ekaterina S. Kustova⁶,
Anna A. Tatarinova⁷, Ivan V. Tomilov⁸, Grigori F. Shovkoplyas⁹

^{1,2,3,4,6,8,9} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

⁵ Imaging Medical Vision (IMV) LLC, Saint Petersburg, 191119, Russian Federation

⁷ Almazov National Medical Research Center, Saint Petersburg, 197341, Russian Federation

¹ alexvatyan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5483-716X>

² 9459539@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7417-6947>

³ natfed@list.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-1361-6037>

⁴ graziokisa@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6206-8033>

⁵ zubdocmri@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6953-5239>

⁶ Katya.Kustova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6117-1266>

⁷ antsvet.18@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9046-2457>

⁸ ivan-tomilov3@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1886-2867>

⁹ grigory.96@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7777-6972>

Abstract

The ways of substantiating the clinical decision of doctors in the absence of clinical treatment protocols are considered. A comparative evaluation of various statistical methods for ranking clinical symptoms in terms of significance for predicting the outcome of the disease in a small sample of patients with COVID-19 and a history of cardiovascular diseases was performed. The data set (141 patients, 81 factors) was formed based on the materials of electronic medical records of patients of the Federal State Budgetary Institution “National Medical Research Center named after V.A. Almazov”. A subset of controllable risk factors (51 factors) was identified. Descriptive statistics methods (one-way ANOVA, Mann-Whitney and χ^2 tests) and dimensionality reduction methods (univariate linear regression combined with multiple logistic regression, generalized discriminant analysis, and various decision tree algorithms) were used to rank the factors. To compare the ranking results and evaluate the statistical stability, Kendall’s correlation was used, visualized as a heat map and a positional graph. It has been established that the use of descriptive statistics methods is justified when ranking on a small sample size of patients. It is shown that the ensemble of ranking results may be statistically inconsistent. It is concluded that the positions of the same features obtained by ranking them as part of a complete set and a subset of features do not match; therefore, when choosing a statistical processing method for expert evaluation, one should take into account the meaningful formulation of the problem. It is shown that the statistical stability of ranking under conditions of small samples depends on the number of features taken into account, and this dependence is significantly different for different ranking methods. The proposed method of intellectual support and verification of clinical decisions in terms of choosing the most significant clinical signs can be used to select and justify the tactics of managing patients in the absence of clinical protocols.

Keywords

clinical decision support, clinical expertise, feature ranking, small cohorts, statistical methods

Acknowledgements

The work was supported by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists — candidates of sciences МК-5723.2021.1.6

For citation: Vatian A.S., Golubev A.A., Gusarova N.F., Dobrenko N.V., Zubanenko A.A., Kustova E.S., Tatarinova A.A., Tomilov I.V., Shovkoplyas G.F. Intelligent clinical decision support for small patient datasets. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 595–607 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-595-607

Введение

Переход на ценностно-ориентированную модель оказания медицинских услуг, в которой удовлетворенность пациентов рассматривается как один из главных

приоритетов, — общемировая тенденция здравоохранения. Одним из ключевых вопросов в рамках этой модели является ответственность врача в том случае, если в результате его решения причинен вред жизни и здоровью пациента. Пленум Верховного суда Российской

Федерации в постановлении¹ (Постановление № 33) разъяснил, что медицинские организации, медицинские и фармацевтические работники напрямую несут эту ответственность: «На медицинскую организацию возлагается не только бремя доказывания отсутствия своей вины, но и бремя доказывания правомерности тех или иных действий (бездействия), которые повлекли возникновение ... вреда».

Реализация требований Постановления № 33 связана, в первую очередь, с соблюдением в ходе обследования и лечебного процесса установленных стандартов оказания медицинской помощи и клинических рекомендаций (протоколов лечения). Однако в современных условиях врач постоянно сталкивается с нестандартными проявлениями известных заболеваний у конкретных больных или даже с неизвестными ранее заболеваниями, для которых отсутствуют клинические протоколы. Ярким примером здесь может служить COVID-19, который не только сам по себе явился новым для врачей заболеванием, но и по-другому проявил течение известных ранее хронических заболеваний. В подобных ситуациях врачи вынужденно прибегают к симптоматическому лечению. Но, как показала практика работы в период эпидемии COVID-19, спектр манифестируемых симптомов, особенно у пациентов, страдающих хроническими заболеваниями, бывает достаточно широким, и необходимо понять, на какие из них обращать внимание в первую очередь. Естественно, этому помогает личный опыт и интуиция врачей, но в связи с требованиями ценностно-ориентированной медицины врач обязан объективизировать свое решение.

Один из вариантов выхода из данной сложной ситуации — использование средств статистического анализа для ранжирования факторов влияния (таких как клинические симптомы, данные анамнеза и другая информация о пациенте) по степени значимости для ожидаемого и (или) желаемого исхода заболевания. В частности, уже в первый период пандемии COVID-19 появился ряд научных статей, в которых выделялись наиболее значимые факторы влияния [1, 2]. Эти исследования в подавляющем большинстве использовали методы классической дескриптивной статистики [3], которая базируется на строгих трактовках статистической достоверности, удовлетворяемых при наличии большой и статистически однородной группы пациентов. В реальной практике при принятии нестандартизованных решений врачи часто не располагают такой группой пациентов для верификации своего решения. Отметим, что на основании Постановления № 33 большую помощь им могут оказать другие, пусть даже предварительные и не столь строгие, средства инструментальной оценки принимаемого решения. Таким образом, разработка подходов к интеллектуальной поддержке

клинических решений в условиях небольшой группы пациентов является актуальной задачей.

В настоящей работе проведена сравнительная оценка различных методов ранжирования клинических симптомов по степени значимости для исхода заболевания в условиях небольшой группы пациентов с COVID-19 и сердечно-сосудистыми заболеваниями (ССЗ) в анамнезе. Показано, что в этом случае для обоснования клинического решения методов дескриптивной статистики недостаточно, и необходим комплексный подход, сочетающий принципиально различные статистические процедуры. Работа выполнена по материалам ретроспективного пилотного исследования в ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия (ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России).

Состояние проблемы

Как показал анализ научных работ, проблема ранжирования признаков (feature ranking) в медицине в основном обсуждается в рамках более широкой проблемы — выделения признаков (feature selection) [4–8]. С этой целью могут использоваться различные методы дескриптивной статистики и машинного обучения [4, 9], но теоретическое обоснование выбора оптимального метода для конкретной ситуации, равно как и единая методика их сравнения, до сих пор не выработаны [5, 10]. Эксперименты показали, что нестабильность подмножеств признаков при разных методах выделения может достигать 50 % и более даже для сравнительно больших наборов данных [9], причем с уменьшением их размеров ситуация усугубляется. В связи с этим для небольших наборов медицинских данных в работах [5, 8] обосновано параллельное использование нескольких альтернативных методов ранжирования признаков с последующей агрегацией результатов на основе внешних знаний.

Отметим, что в работах, посвященных анализу влияния ССЗ как сопутствующей патологии на течение COVID-19, эта рекомендация реализуется редко. Согласно [11], наличие ССЗ в целом является статистически высоко значимым ($p < 0,001$), независимым фактором риска у пациентов с COVID-19. Так как течение ССЗ обуславливается широким набором факторов, то при интеллектуальном анализе кардиологических данных вначале производится снижение их размерности, т. е. выделение значимых факторов. Здесь преобладают алгоритмы наивного байесовского классификатора и логистической регрессии [12–20], а для более детального анализа выделенного поднабора факторов — методы дескриптивной статистики.

Так, в работах [21, 22] для выявления различий между выжившими и умершими пациентами использованы критерии Манна–Уитни, критерий χ^2 и точный тест Фишера. В [23, 24] для выделения факторов риска тяжелых и нетяжелых случаев при поступлении, а также факторов риска смерти у тяжелобольных пациентов в качестве средства снижения размерности использована

¹ Постановление пленума Верховного суда Российской Федерации «О практике применения судами норм о компенсации морального вреда» (от 15 ноября 2022 № 33) [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_431485/ (дата обращения: 01.03.2023).

одномерная регрессия. Затем к отобранным переменным с $p < 0,05$ применена многомерная логистическая регрессия и регрессия Кокса. В работе [25] использован однофакторный дисперсионный анализ, в [26] — нелинейная модель регрессии Кокса. Ряд аналогичных работ обобщен в обзорах [1, 2].

В результате, несмотря на большое разнообразие исходных данных, включая эпидемиологические, демографические и клинические характеристики, а также рентгенологические и лабораторные данные пациентов, в большинстве работ выявлен идентичный набор факторов влияния, таких как возраст, время пребывания в палате интенсивной терапии, повышенное артериальное давление, наличие ССЗ и сахарного диабета в анамнезе. Такое единообразие результатов можно связать с принятой методологией статистических оценок: практически все работы используют дескриптивную статистику с достаточно жестким критерием статистической значимости (как правило, $p < 0,05$), которому соответствует небольшой набор факторов влияния. Подчеркнем, что эти факторы, согласно предложенной в [27] классификации, относятся к категории неконтролируемых факторов риска, т. е. знание их относительной важности мало что дает для принятия клинических решений. В то же время факторы с $p > 0,05$, в том числе потенциально значимые с точки зрения тактики ведения пациента, выводятся из дальнейшего рассмотрения. Лишь в небольшом числе исследований к рассмотренному выше списку добавляются отдельные контролируемые факторы риска, такие как д-димер [24], лактатдегидрогеназа [23], тропонин [22], но расширение их номенклатуры и, тем более, их ранжирование в рассмотренных работах не производится.

Другие методы статистического анализа в рамках рассматриваемой проблематики используются значительно реже. Можно отметить работу [24], в которой для разделения группы пациентов на подгруппы с умеренным, тяжелым и критическим состояниями использован метод главных компонент с последующей кластеризацией. Такая методика позволила выявить и визуально оценить соотношение переменных в каждой подгруппе, а также положительное или отрицательное влияние каждой переменной на степень тяжести состояния. Разведочный анализ и его визуализация в виде диаграммы «ящик-усы» использованы в работе [22] для исследования влияния основных лабораторных параметров на исходы пациентов с подтвержденным COVID-19. В [27] в качестве средства ранжирования факторов влияния использован теоретико-игровой метод SHAP (Shapley Additive Explanations) [28], а также предложено специализированное программное средство для раздельного анализа влияния контролируемых и неконтролируемых факторов риска. Однако экспериментальная часть работы описывает ранжирование исключительно немедикаментозных средств контроля COVID-19, что не позволяет провести сопоставление полученных результатов с рассмотренными выше работами.

Общепризнанной методикой, которая с единых методологических позиций оценивала бы различные методы ранжирования факторов влияния, до сих пор

не существует. Среди наиболее распространенных подходов выделим методы оценки взаимной корреляции результатов ранжирования, интегральной оценки точности классификации с применением выделенных поднаборов, а также оценки взаимной информации [29–32]. В последние годы к автоматизированным методам можно добавить методы, основанные на экспертных знаниях и визуальной информации [33, 34].

Таким образом, проведенный анализ научных работ подтверждает актуальность настоящей работы и позволяет сформулировать следующие задачи исследования:

- 1) сформировать набор данных о пациентах с COVID-19, страдающих сердечно-сосудистой патологией, пригодный для статистической обработки методами интеллектуального анализа медицинских данных;
- 2) провести проблемно-ориентированный отбор методов статистической обработки медицинских данных для обеспечения репрезентативного охвата спектра методов статистического анализа медицинских данных и сохранения сопоставимости с уже опубликованными ранее базовыми работами;
- 3) уменьшить размерность подготовленного набора данных каждым из выбранных методов, выделив наиболее значимые признаки, и ранжировать их;
- 4) выбрать средства для сравнительной оценки ранжирований признаков, полученных разными методами, и провести содержательную оценку полученных результатов.

Материалы и методы

Формирование набора данных. Использованные в работе данные собраны по материалам электронных медицинских карт пациентов, поступивших в ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России, в период с 11 мая по 14 июня 2020 г.

Диагнозы больных, поступившие в ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России, установлены на основании клинического и инструментального обследований, данных анамнеза и результатов лабораторных исследований. Все случаи COVID-19, включенные в это исследование, диагностировались на основании временных рекомендаций Всемирной организации здравоохранения. Учитывались демографические, клинико-лабораторные и рентгенологические данные при поступлении, а также данные о сопутствующих заболеваниях, осложнениях основного и сопутствующего заболеваний, лечении и исходах при госпитализации. Все данные проанализированы независимо и введены в первичную базу данных двумя аналитиками, на что было получено информированное согласие пациентов. Все наборы данных были обезличены.

Пациенты разделены на две группы по клиническим исходам — смерть (группа 1) и выписка после реанимации (группа 2), при этом каждый пациент группы 2 находился на лечении в отделении реанимации с учетом тяжести течения заболевания.

Предварительная обработка исходного набора данных включала следующие операции: преобразование excel в csv с помощью библиотеки Pandas (Python);

слияние данных из разных таблиц; нормализация (замена среднего) непрерывных характеристик; удаление записей с 5 и более пустыми столбцами.

Таким образом, сформированный полный набор данных для дальнейшего анализа (таблицы приложения¹) включает информацию о группе из 141 пациента, 98 из которых относятся к группе 1, а 43 — к группе 2. Всего исследование включало 81 фактор, сгруппированный в четыре раздела, причем в последний вошли только наиболее распространенные для всех пациентов препараты. Для получения более практико-ориентированных результатов, следуя рекомендациям работы [27], был выделен из исходного набора данных поднабор контролируемых факторов риска в объеме 51 фактора. Основанием для выделения стало наличие возможности повлиять на их значение приемом тех или иных препаратов или отказа от них. Для удобства сравнения в обоих наборах данных сохранена единая нумерация факторов. Обобщенная структура использованных признаков представлена в табл. 1.

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://disk.yandex.ru/i/EFVnfofP1LZkWA> (дата обращения: 01.03.2023).

Отметим, что конкретный состав выделяемого поднабора переменных является самостоятельным вопросом. В рамках настоящей работы выделенный поднабор рассмотрен как методический инструмент для статистического анализа.

Отбор методов статистического анализа. При выборе методов статистического анализа будем руководствоваться двоякими требованиями задачи 2 (раздел «Состояние проблемы»), что позволит заранее исключить из рассмотрения ряд методов. Например, в работе не будут использованы методы, основанные на нейронных сетях, из-за небольшого размера группы пациентов и не рассмотрен метод SVM (Support Vector Machine), так как он не поддерживает вероятностное объяснение получаемых результатов.

Общая схема реализованных в работе методов статистического анализа представлена на рис. 1. Выбранные методы были разделены на две категории — дескриптивная статистика и снижение размерности. В категории дескриптивной статистики использованы традиционные для медицинской проблематики инструменты: однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), тесты Манна–Уитни и χ^2 [3]. Дисперсионный

Таблица 1. Общая характеристика исходной базы данных
Table 1. General characteristics of the original database

Специфичность	Группы признаков	Признаки
Общие	Половозрастные показатели	возраст, доля мужчин в группе
	Данные клинического анализа крови	гемоглобин, тропонин, С-реактивный белок, тромбоциты, креатинин
	Гемодинамические показатели	средняя частота сердечных сокращений, категория аритмии по частоте, тип сердечного ритма
	Электрокардиографические признаки	угол альфа, P/Q/QRS в отведении II, удлинение интервала QTc, рубцовые изменения, изменения сегмента ST, фрагментированный QRS комплекс, низкий вольтаж, увеличение левого/правого предсердия, гипертрофия левого/правого желудочка, правосторонняя перегрузка сердца, QIII-SI, поворот сердца SI-SII-SIII, поворот правого желудочка, ранняя реполяризация желудочков, альтернация зубца Т, изменение фазы реполяризации зубца Т, чередующиеся комплексы QRS, полная/неполная блокада левой/правой ножки пучка Гиса, неспецифическая внутрижелудочковая блокада, желудочковая эктопия
Специфичные	Данные рентгенологических исследований	категория поражения легких по компьютерной томографии (КТ), процент поражения легких по КТ
	Сопутствующие заболевания	онкологическое заболевание, артериальная гипертензия, ишемическая болезнь сердца, инфаркт миокарда, сахарный диабет, хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ), желудочковая аритмия, предсердная аритмия, фибрилляция предсердий
	Сведения о тяжести заболевания	продолжительность госпитализации, перевод в реанимационное отделение, койко-дни в отделении реанимации, преобладающий статус тяжести заболевания
	Осложнения	желудочковая тахикардия, острое нарушение мозгового кровообращения, инфаркт миокарда, выпотной перикардит, миокардит, легочная эмболия, другие тромбозы, кровотечения, гематомы, обострение хронической сердечной недостаточности, сепсис, респираторный дистресс-синдром, фибрилляция предсердий, синдром полиорганной дисфункции
	Назначенное лечение	лопинавир/ритонавир, лорохин/гидроксихлорохин, азитромицин, тоцилизумаб, антикоагулянты, диуретики, хлорохин/гидроксихлорохин, искусственная вентиляция легких (ИВЛ)

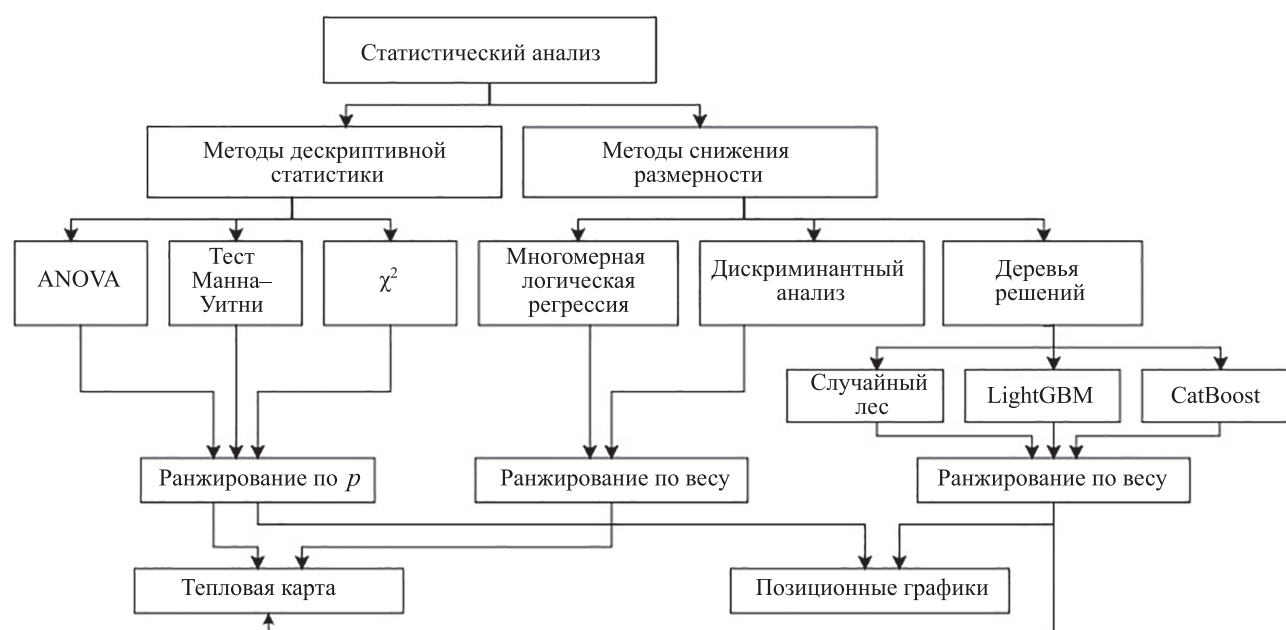


Рис. 1. Структура исследования

Fig. 1. Structure of the study

анализ определяет достоверность различий средних значений путем оценки внутривыборочной дисперсии в сравниваемых группах; как параметрический метод он предполагает нормальность распределений анализируемых переменных. В то же время содержательно идентичный дисперсионному анализу тест Манна–Уитни определяет достоверность различий среднего ранга в двух группах, т. е. является непараметрическим и справедлив при любом распределении. Тест χ^2 как непараметрический метод, без нулевой гипотезы, позволяет оценить принадлежность наблюдаемой выборки некоторому закону распределения, т. е. учесть характер распределения в целом.

Таким образом, отобранный набор методов дескриптивной статистики учитывает широкий набор условий и допущений, имеющих место в конкретной задаче медицинской практики (раздел «Результаты и обсуждение»).

При проверке гипотезы о различиях между группами 1 и 2 в качестве критериальной переменной используем уровень значимости p , рассчитанный с помощью критериев Манна–Уитни или χ^2 , или ANOVA. В соответствии с традиционным для медицинской статистики подходом (раздел «Состояние проблемы») исключим из рассмотрения переменные, для которых $p > 0,05$. С другой стороны, [35] предлагаем интерпретировать значения p как непрерывные величины, характеризующие уровень доказательности различия между альтернативными гипотезами. Например, группы 1 и 2 рассмотрим как альтернативные гипотезы, что позволит ранжировать признаки, для которых $p < 0,05$, в порядке возрастания p -значений, соответствующих снижению их значимости для исхода заболевания.

В категории методов снижения размерности для ранжирования признаков выберем следующие: одномерная линейная регрессия в сочетании с множе-

ственной логистической регрессией, обобщенный дискриминантный анализ, а также различные варианты алгоритмов дерева решений.

В работах [21, 23–25] использована двухстадийная процедура, а именно одномерная линейная регрессия каждого признака для целевой переменной с последующей множественной логистической регрессией для наиболее значимых признаков, отобранных по результатам анализа. При этом наиболее значимыми считались признаки с самыми высокими коэффициентами одномерной регрессии, из которых выбраны топ-5 и топ-10 признаков, по которым выполнена многомерная логистическая регрессия. В этом случае, как показывает анализ результатов этих работ, на первый план выходят такие признаки, на которые в ходе лечения повлиять невозможно (например, пол и возраст пациента), а также признаки, констатирующие уже имеющееся состояние (например, количество дней на ИВЛ). В связи с этим в настоящей работе использована не двухстадийная процедура, а параллельный регрессионный анализ полного набора данных (82 фактора) и поднабора контролируемых факторов риска (51 фактор).

Выполним параллельный дискриминантный анализ двух выбранных наборов данных. Хотя в смежных работах, посвященных анализу COVID, преобладают регрессионные модели, дискриминантный анализ находит свое место и в современных исследованиях, посвященных ССЗ [36, 37]. Используем обобщенный вариант дискриминантного анализа, который позволит работать с количественными и качественными переменными. Данный метод анализа даст возможность найти признаки, обеспечивающие оптимизацию сепарабельности классов в признаковом пространстве, т. е. выделить те признаки, которые наилучшим образом разделяют группы 1 и 2. В качестве критериальной переменной для ранжирования важности признаков

применим параметр coef , с помощью которого получим веса векторов, соответствующих каждому из признаков.

Из группы нелинейных методов используем алгоритмы деревьев решений в трех версиях — Random Forest [38], Light Gradient Boosting Machine (LightGBM) [39] и CatBoost [40]. Основанием для такого выбора послужили результаты, экспериментально показавшие эффективность Random Forest и LightGBM в задачах классификации медицинской информации в небольших наборах данных. Кроме того, CatBoost фокусируется на оптимизации деревьев решений для категориальных переменных, которые часто используются в медицинских данных. Еще одно преимущество древовидных алгоритмов в нашей задаче заключается в том, что они обеспечивают прозрачно объяснимое ранжирование признаков: чем выше признак в дереве решений, тем он важнее.

Расчеты по алгоритмам регрессионных моделей, дискриминантного анализа и Random Forest выполним в пакете Scikit-learn library v. 0.22.0, по алгоритмам LightGBM и CatBoost — с использованием специализированных библиотек LightGBM framework и Eponymous library.

Результаты и обсуждение

Применим все отобранные методы ранжирования к полному набору данных и к поднабору контролируемых факторов риска. Первые 20 позиций ранжирования в

убывающем порядке по важности представлены соответственно в табл. 2 и 3, размещенных в репозитории¹.

Для сравнительной оценки результатов ранжирования вычислим взаимную (попарную) корреляцию Кендалла между ними, визуализированную в виде тепловой карты (рис. 2), а также в виде позиционного графика (рис. 3). График демонстрирует изменение позиции каждого из 20 признаков в ранжированных списках, полученных при помощи разных методов. В качестве базовых выбраны признаки, выделенные как самые значимые при помощи многомерной логистической регрессии.

Проведем оценку влияния размера выборки на ранжирование факторов. С этой целью из исходной выборки путем бутстрэппинга сформируем 50 выборок, по которым для каждого из методов выполним усреднение и ранжирование. Вычислим значения коэффициентов корреляции Кендалла ($|K|$) между результатами ранжирования исходной и усредненной выборок после бутстрэппинга. Результаты представлены на рис. 4 в виде тепловой карты с нанесенными на ней значениями $|K|$.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

1. Корреляция результатов, полученных методами дескриптивной статистики и методами снижения размерности, достаточно хорошая (рис. 2). Следовательно,

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://disk.yandex.ru/i/EFVnfofPILZkWA> (дата обращения: 01.03.2023).

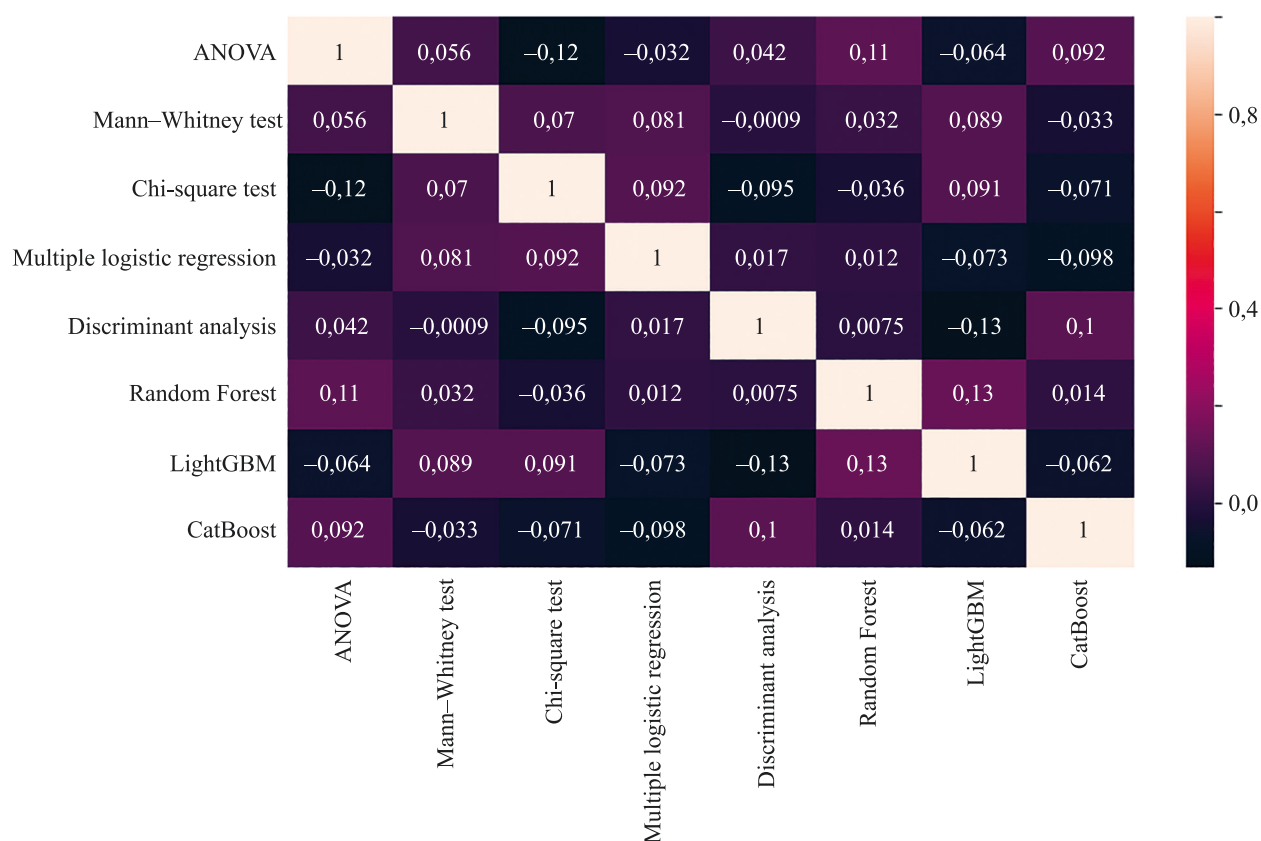


Рис. 2. Тепловая карта попарного сравнения ранжирований

Fig. 2. Pairwise comparison heat map of rankings

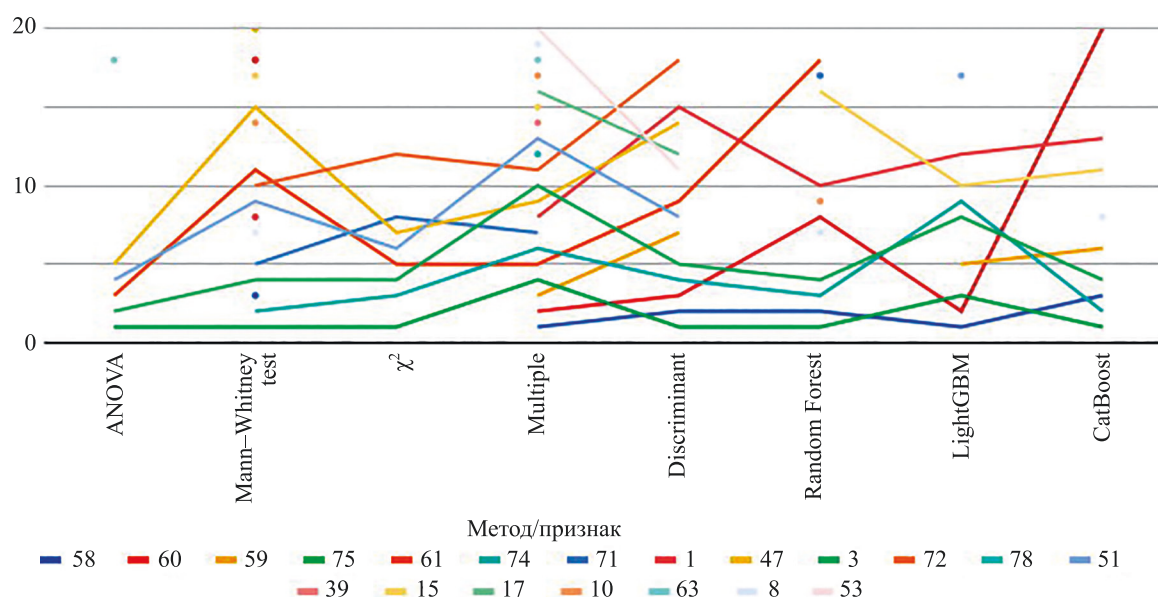


Рис. 3. Позиционный график признаков для различных методов ранжирования.

1 — возраст; 3 — COVID подтвержденный; 8 — тропонин; 10 — легочный сурфактант; 15 — средняя частота сердечных сокращений; 17 — тип сердечного ритма; 39 — изменение фазы реполяризации зубца Т; 47 — неспецифическая внутрижелудочковая блокада; 51 — ишемическая болезнь сердца; 53 — сахарный диабет; 58 — продолжительность госпитализации; 59 — перевод в реанимационное отделение; 60 — койко-дни в отделении реанимации; 61 — статус тяжести заболевания; 63 — острое нарушение мозгового кровообращения; 71 — сепсис; 72 — респираторный дистресс-синдром; 74 — синдром полиорганной дисфункции; 75 — искусственная вентиляция легких; 78 — азитромицин

Fig. 3. Positional feature plot for various ranking methods.

1 — age; 3 — COVID confirmed; 8 — troponin; 10 — pulmonary surfactant; 15 — average heart rate; 17 — type of heart rhythm; 39 — change in the repolarization phase of the T wave; 47 — nonspecific intraventricular blockade; 51 — ischemic heart disease; 53 — diabetes mellitus; 58 — duration of hospitalization; 59 — transfer to the intensive care unit; 60 — bed days in the intensive care unit; 61 — disease severity status; 63 — acute cerebrovascular accident; 71 — sepsis; 72 — respiratory distress syndrome; 74 — multiple organ dysfunction syndrome; 75 — mechanical ventilation; 78 — azithromycin

несмотря на то, что в условиях небольшой группы пациентов многие переменные с точки зрения классической дескриптивной статистики демонстрируют $p > 0,05$, их правомерно включать в статистический анализ при ранжировании.

2. Корреляционная матрица (рис. 2) наглядно показала, что некоторые методы более согласованы с другими, чем остальные. Это может рассматриваться как некоторая предпосылка для повышения статистической устойчивости получаемых результатов путем их ансамблирования. Однако использовать ансамблирование (например, голосованием) следует крайне осторожно, так как отдельные тесты выявляют содержательно различные статистические характеристики, и результаты такого ансамблирования могут оказаться несостоятельными в статистическом смысле.

3. Позиции одних и тех же признаков, полученные при их ранжировке в составе полного набора и поднабора признаков, не совпадают (рис. 3). Например, при использовании метода ANOVA на полном наборе признаков ранжирование наиболее значимых признаков выглядит 47–76–79–35, а на поднаборе — 79–76–47–35. Исходя из этого, при выборе статистики для экспертной оценки следует учитывать содержательную постановку задачи.

Например, малые значения ANOVA (т. е. малая внутривыборочная дисперсия) говорят о том, что результа-

ты прогноза действительны для всей группы больных, и можно уверенно использовать полученный положительный опыт на других больных. Если среди признаков имеются переменные со смещением (например, в группе больных преобладают повышенные значения сахара в крови), то более робастным подходом будет использование теста Манна–Уитни, который строится на оценке отклонения медиан. Для выявления признака с наибольшей разделяющей способностью внутри поднабора целесообразно использовать дисперсионный анализ, в то же время общее соотношение вклада всех признаков лучше всего демонстрирует логистическая регрессия.

4. Статистическая устойчивость ранжирования в условиях малых выборок ожидаемо зависит от количества учитываемых признаков (рис. 4): на поднаборе контролируемых факторов риска статистическая устойчивость для всех методов достаточно высока (рис. 4, «Отобранные признаки»), на полном наборе факторов риска она падает (рис. 4, «Полный датасет»). Однако эта зависимость существенно различна для разных методов ранжирования. Так, наибольшую устойчивость на поднаборе демонстрируют дискриминантный анализ ($|K| = 1$) и χ^2 -тест ($|K| = 0,75$), а на полном наборе она теряется ($|K| = 0,0057$ и $|K| = 0,073$ соответственно). В то же время метод ANOVA и тест Манна–Уитни сохраняют приемлемую статистическую устойчивость как на

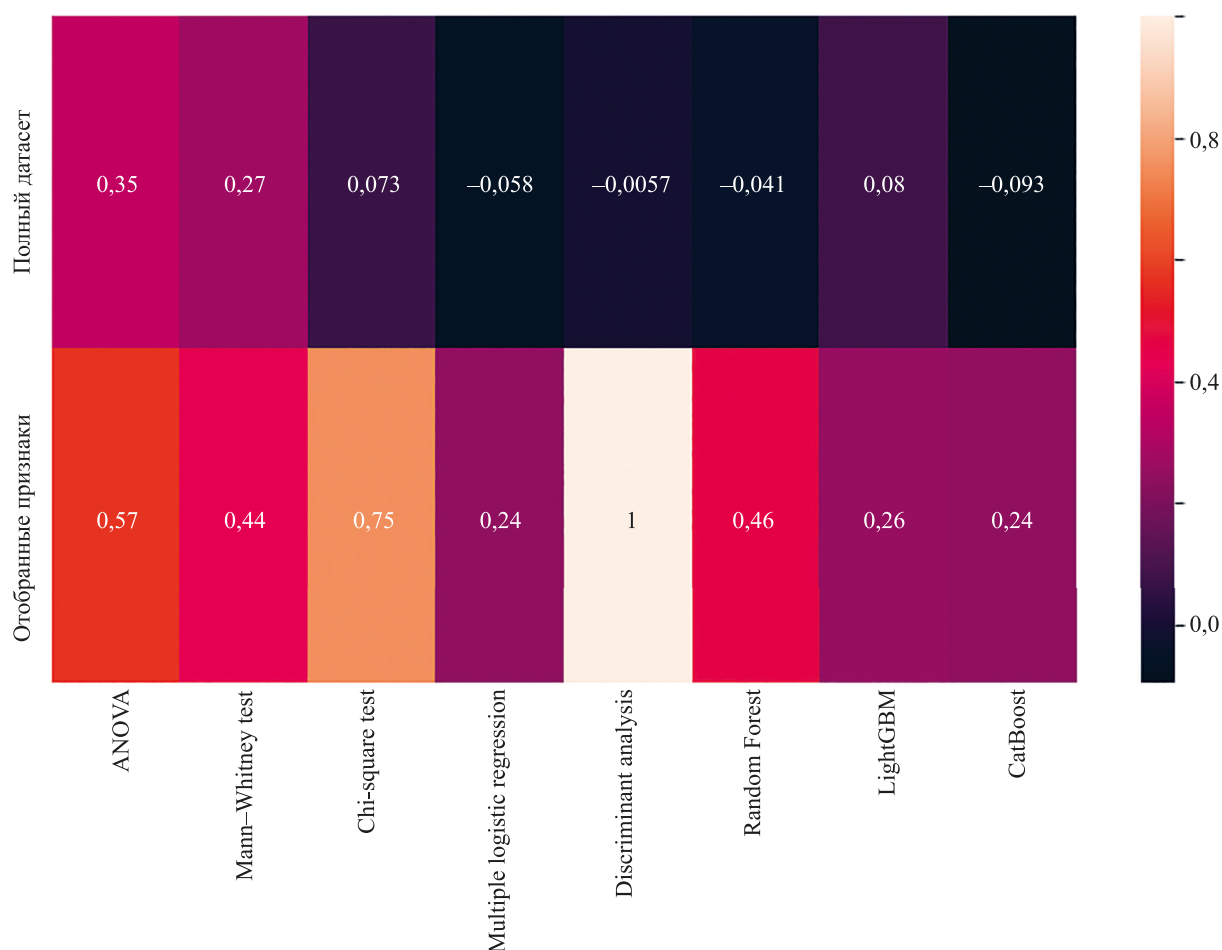


Рис. 4. Сравнение результатов ранжирования исходной и усредненной выборок после бутстрэппинга

Fig. 4. Comparison of the ranking results of the original sample and the average after bootstrapping

поднаборе ($|_K = 0,57$ и $|_K = 0,44$), так и на полном наборе признаков ($|_K = 0,35$ и $|_K = 0,27$ соответственно).

Как показали опросы, проведенные среди практикующих врачей, современная клиническая практика лечения пациентов в условиях недостаточной статистики аналогичных случаев, в том числе при отсутствии клинических протоколов и при лечении больных с сопутствующими заболеваниями, опирается прежде всего на экспертное мнение лечащего врача. Для верификации врача необходимо использовать консилиум, т. е. по существу, ансамблирование экспертных ранжирований, без формализации этой процедуры. Результаты проведенной работы позволяют сформировать для таких ситуаций методику интеллектуальной поддержки и верификации клинических решений в аспекте выбора наиболее значимых клинических признаков, состоящую из следующих шагов:

1. экспертным путем выделить из доступного множества признаков значимый поднабор, учитывая контекст и целеполагание в конкретной клинической ситуации;
2. на имеющемся датасете выполнить ранжирование выделенного поднабора признаков различными статистическими методами;
3. оценить статистическую устойчивость полученных ранжирований путем вычисления коэффициентов корреляции Кендалла ($|_K$) между результатами ранжи-

рования исходной выборки и усредненной выборки после бутстрэппинга;

4. результаты ранжирования, полученные с помощью наиболее устойчивого метода, предъявить врачам-экспертам в качестве «дополнительного мнения».

В дальнейшем планируется клиническая апробация методики и ее программная реализация в виде набора библиотечных функций в составе интеллектуальной системы поддержки принятия клинических решений при ведении пациентов с ССЗ, которая разрабатывается совместно Университетом ИТМО и ФГБУ «НИМЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России.

Заключение

Современный врач постоянно сталкивается с нестандартными проявлениями известных заболеваний у конкретных больных или даже с неизвестными ранее заболеваниями, для которых отсутствуют клинические протоколы. В то же время в связи с требованиями ценностно-ориентированной медицины врач обязан объективизировать свое решение. Рассмотрены возможности выхода из этой противоречивой ситуации путем использования средств статистического анализа для ранжирования факторов влияния (таких как клинические симптомы, данные анамнеза и другая информация

о пациенте) по степени значимости для ожидаемого и (или) желаемого исхода заболевания.

По материалам электронных медицинских карт пациентов ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации о пациентах с COVID-19, страдающих острой и хронической сердечно-сосудистой патологией, сформирован набор данных для статистической обработки методами интеллектуального анализа. В результате проблемно-ориентированного отбора выбраны восемь методов ранжирования медицинских данных, пригодных для работы в условиях небольших групп и сохраняющих сопоставимость с

уже опубликованными ранее базовыми работами. Все отобранные методы ранжирования применены к полному набору данных и к поднабору контролируемых факторов риска. В качестве средств для сравнительной оценки ранжирований признаков, полученных разными методами, а также их статистической устойчивости использована корреляция Кендалла, визуализированная в виде тепловой карты и позиционного графика. На основе результатов оценки предложена методика интеллектуальной поддержки и верификации клинических решений в аспекте выбора наиболее значимых клинических признаков.

Литература

1. Adu-Amankwaah J., Mprah R., Adekunle A.O., Noah M.L.N., Adzika G.K., Machuki J.O., Sun H. The cardiovascular aspect of COVID-19 // *Annals of Medicine*. 2021. V. 53. N 1. P. 227–236. <https://doi.org/10.1080/07853890.2020.1861644>
2. Madjid M., Safavi-Naeini P., Solomon S.D., Vardeny O. Potential effects of coronaviruses on the cardiovascular system: a review // *JAMA Cardiology*. 2020. V. 5. N 7. P. 831–840. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2020.1286>
3. Румянцев П.О., Саенко В.Д., Румянцева У.В. Статистические методы анализа в клинической практике. Часть I. Одномерный статистический анализ // *Проблемы эндокринологии*. 2009. Т. 55. № 5. С. 48–55. <https://doi.org/10.14341/probl200955548-55>
4. Remeseiro B., Bolon-Canedo V. A review of feature selection methods in medical applications // *Computers in Biology and Medicine*. 2019. V. 112. P. 103375. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.103375>
5. Soares I., Dias J., Rocha H., do Carmo Lopes M., Ferreira B. Feature selection in small databases: a medical-case study // *IFMBE Proceedings*. 2016. V. 57. P. 814–819. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32703-7_158
6. Nezhad M.Z., Zhu D., Li X., Yang K., Levy Ph. SAFS: A deep feature selection approach for precision medicine // *Proc. of the 2016 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*. 2016. P. 501–506. <https://doi.org/10.1109/bibm.2016.7822569>
7. Alelyani S. Stable bagging feature selection on medical data // *Journal of Big Data*. 2021. V. 8. N 11. P. 11. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00385-8>
8. Wu L., Hu Y., Liu X., Zhang X., Chen W., Yu A.S.L., Kellum J.A., Waitman L.R., Liu M. Feature ranking in predictive models for hospital-acquired acute kidney injury // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. P. 17298. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35487-0>
9. Golugula A., Lee G., Madabhushi A. Evaluating feature selection strategies for high dimensional, small sample size datasets // *Proc. of the 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2011. P. 949–952. <https://doi.org/10.1109/iembs.2011.6090214>
10. Gao L., Wu W. Relevance assignment feature selection method based on mutual information for machine learning // *Knowledge-Based Systems*. 2020. V. 209. P. 106439. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2020.106439>
11. Wang B., Li R., Lu Z., Huang Y. Does comorbidity increase the risk of patients with covid-19: Evidence from meta-analysis // *Aging*. 2020. V. 12. N 7. P. 6049–6057. <https://doi.org/10.18632/aging.103000>
12. Amin M.S., Chiam Y., Varathan K.D. Identification of significant features and data mining techniques in predicting heart disease // *Telematics and Informatics*. 2019. V. 36. P. 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.007>
13. Joloudari J.H., Joloudari E.H., Saadatfar H., Ghasemigol M., Razavi S.M., Mosavi A., Nabipour N., Shamshirband S., Nadai L. Coronary artery disease diagnosis; ranking the significant features using a random trees model // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. V. 17. N 3. P. 731. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030731>

References

1. Adu-Amankwaah J., Mprah R., Adekunle A.O., Noah M.L.N., Adzika G.K., Machuki J.O., Sun H. The cardiovascular aspect of COVID-19. *Annals of Medicine*, 2021, vol. 53, no. 1, pp. 227–236. <https://doi.org/10.1080/07853890.2020.1861644>
2. Madjid M., Safavi-Naeini P., Solomon S.D., Vardeny O. Potential effects of coronaviruses on the cardiovascular system: a review. *JAMA Cardiology*, 2020, vol. 5, no. 7, pp. 831–840. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2020.1286>
3. Rummyantsev P.O., Saenko U.V., Rummyantseva U.V. Statistical methods for the analyses in clinical practice. Part I. Univariate statistical analysis. *Problems of Endocrinology*, 2009, vol. 55, no. 5, pp. 48–55. (in Russian). <https://doi.org/10.14341/probl200955548-55>
4. Remeseiro B., Bolon-Canedo V. A review of feature selection methods in medical applications. *Computers in Biology and Medicine*, 2019, vol. 112, pp. 103375. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.103375>
5. Soares I., Dias J., Rocha H., do Carmo Lopes M., Ferreira B. Feature selection in small databases: a medical-case study. *IFMBE Proceedings*, 2016, vol. 57, pp. 814–819. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32703-7_158
6. Nezhad M.Z., Zhu D., Li X., Yang K., Levy Ph. SAFS: A deep feature selection approach for precision medicine. *Proc. of the 2016 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, 2016, pp. 501–506. <https://doi.org/10.1109/bibm.2016.7822569>
7. Alelyani S. Stable bagging feature selection on medical data. *Journal of Big Data*, 2021, vol. 8, no. 11, pp. 11. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00385-8>
8. Wu L., Hu Y., Liu X., Zhang X., Chen W., Yu A.S.L., Kellum J.A., Waitman L.R., Liu M. Feature ranking in predictive models for hospital-acquired acute kidney injury. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, pp. 17298. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35487-0>
9. Golugula A., Lee G., Madabhushi A. Evaluating feature selection strategies for high dimensional, small sample size datasets. *Proc. of the 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2011, pp. 949–952. <https://doi.org/10.1109/iembs.2011.6090214>
10. Gao L., Wu W. Relevance assignment feature selection method based on mutual information for machine learning. *Knowledge-Based Systems*, 2020, vol. 209, pp. 106439. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2020.106439>
11. Wang B., Li R., Lu Z., Huang Y. Does comorbidity increase the risk of patients with covid-19: Evidence from meta-analysis. *Aging*, 2020, vol. 12, no. 7, pp. 6049–6057. <https://doi.org/10.18632/aging.103000>
12. Amin M.S., Chiam Y., Varathan K.D. Identification of significant features and data mining techniques in predicting heart disease. *Telematics and Informatics*, 2019, vol. 36, pp. 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.007>
13. Joloudari J.H., Joloudari E.H., Saadatfar H., Ghasemigol M., Razavi S.M., Mosavi A., Nabipour N., Shamshirband S., Nadai L. Coronary artery disease diagnosis; ranking the significant features using a random trees model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 731. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030731>
14. Pasha S.J., Mohamed E.S. Novel feature reduction (NFR) model with machine learning and data mining algorithms for effective disease

14. Pasha S.J., Mohamed E.S. Novel feature reduction (NFR) model with machine learning and data mining algorithms for effective disease risk prediction // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 184087–184108. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028714>
15. Alam Z., Rahman S., Rahman S. A Random Forest based predictor for medical data classification using feature ranking // *Informatics in Medicine Unlocked*. 2019. V. 15. P. 100180. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2019.100180>
16. Saqlain S.M., Sher M., Shah F.A., Khan I., Ashraf M.U., Awais M., Ghani A. Fisher score and Matthews correlation coefficient-based feature subset selection for heart disease diagnosis using support vector machines // *Knowledge and Information Systems*. 2019. V. 58. N 1. P. 139–167. <https://doi.org/10.1007/s10115-018-1185-y>
17. Shah S.S.M., Batool S.S., Khan I., Muhammad Ashraf U., Abbas S.H., Hussain S.A. Feature extraction through parallel Probabilistic Principal Component Analysis for heart disease diagnosis // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2017. V. 482. P. 796–807. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.04.113>
18. Abdollahi J., Nouri-Moghaddam B. Feature selection for medical diagnosis: Evaluation for using a hybrid Stacked-Genetic approach in the diagnosis of heart disease // *arXiv*. 2021. arXiv:2103.08175. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.08175>
19. Velusamy D., Ramasamy K. Ensemble of heterogeneous classifiers for diagnosis and prediction of coronary artery disease with reduced feature subset // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2021. V. 198. P. 105770. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105770>
20. Ghosh P., Azam S., Jonkman M., Karim A., Shamrat F.M.J., Ignatious E., Shultana S., Beeravolu A.R., De Boer F. Efficient prediction of cardiovascular disease using machine learning algorithms with relief and LASSO feature selection techniques // *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 19304–19326. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053759>
21. Zhou F., Yu T., Du R., Fan G., Liu Y., Liu Z., Xiang J., Wang Y., Song B., Gu X., Guan L., Wei Y., Li H., Wu X., Xu J., Tu S., Zhang Y., Chen H., Cao B. Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan, China: a retrospective cohort study // *Lancet*. 2020. V. 395. P. 1054–1062. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30566-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30566-3)
22. Ruan Q., Yang K., Wang W., Jiang L., Song J. Clinical predictors of mortality due to COVID-19 based on an analysis of data of 150 patients from Wuhan, China // *Intensive Care Medicine*. 2020. V. 46. N 5. P. 846–848. <https://doi.org/10.1007/s00134-020-05991-x>
23. Li X., Xu S., Yu M., Wang K., Tao Y., Zhou Y., Shi J., Zhou M., Wu B., Yang Z., Zhang C., Yue J., Zhang Z., Renz H., Liu X., Xie J., Xie M., Zhao J. Risk factors for severity and mortality in adult COVID-19 inpatients in Wuhan // *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 2020. V. 146. N 1. P. 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2020.04.006>
24. Liu X., Xue S., Xu J., Ge H., Mao Q., Xu X., Jiang H. Clinical characteristics and related risk factors of disease severity in 101 COVID-19 patients hospitalized in Wuhan, China // *Acta Pharmacologica Sinica*. 2022. V. 43. N 1. P. 64–75. <https://doi.org/10.1038/s41401-021-00627-2>
25. Alshaikh M.K., Alotair H., Alnajjar F., Sharaf H., Alhafi B., Alashgar L., Aljuaid M. Cardiovascular risk factors among patients infected with COVID-19 in Saudi Arabia // *Vascular Health and Risk Management*. 2021. V. 17. P. 161–168. <https://doi.org/10.2147/vhrm.s300635>
26. Phelps M., Christensen D.M., Gerds T., Fosbøl E., Torp-Pedersen Ch., Schou M., Køber L., Kragholm K., Andersson Ch., Biering-Sørensen T., Christensen H.C., Andersen M.P., Gislason G. Cardiovascular comorbidities as predictors for severe COVID-19 infection or death // *European Heart Journal – Quality of Care and Clinical Outcomes*. 2021. V. 7. N 2. P. 172–180. <https://doi.org/10.1093/ehjqcco/qcaa081>
27. Kovvuri V.R.R., Liu S., Seisenberger M., Fan X., Muller B., Fu H. On understanding the influence of controllable factors with a feature attribution algorithm: a medical case study // *Proc. of the 2022 International Conference on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*. 2022. P. 1–8. <https://doi.org/10.1109/inista55318.2022.9894147>
28. Lundberg S.M., Lee S.I. A unified approach to interpreting model predictions // *NIPS'17: Proc. of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*. 2017. P. 4768–4777.
29. Bhadra T., Mallik S., Hasan N., Zhao Z. Comparison of five supervised feature selection algorithms leading to top features and gene signatures from multi-omics data in cancer // *BMC risk prediction*. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 184087–184108. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028714>
15. Alam Z., Rahman S., Rahman S. A Random Forest based predictor for medical data classification using feature ranking. *Informatics in Medicine Unlocked*, 2019, vol. 15, pp. 100180. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2019.100180>
16. Saqlain S.M., Sher M., Shah F.A., Khan I., Ashraf M.U., Awais M., Ghani A. Fisher score and Matthews correlation coefficient-based feature subset selection for heart disease diagnosis using support vector machines. *Knowledge and Information Systems*, 2019, vol. 58, no. 1, pp. 139–167. <https://doi.org/10.1007/s10115-018-1185-y>
17. Shah S.S.M., Batool S.S., Khan I., Muhammad Ashraf U., Abbas S.H., Hussain S.A. Feature extraction through parallel Probabilistic Principal Component Analysis for heart disease diagnosis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, vol. 482, pp. 796–807. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.04.113>
18. Abdollahi J., Nouri-Moghaddam B. Feature selection for medical diagnosis: Evaluation for using a hybrid Stacked-Genetic approach in the diagnosis of heart disease. *arXiv*, 2021, arXiv:2103.08175. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.08175>
19. Velusamy D., Ramasamy K. Ensemble of heterogeneous classifiers for diagnosis and prediction of coronary artery disease with reduced feature subset. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2021, vol. 198, pp. 105770. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105770>
20. Ghosh P., Azam S., Jonkman M., Karim A., Shamrat F.M.J., Ignatious E., Shultana S., Beeravolu A.R., De Boer F. Efficient prediction of cardiovascular disease using machine learning algorithms with relief and LASSO feature selection techniques. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 19304–19326. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053759>
21. Zhou F., Yu T., Du R., Fan G., Liu Y., Liu Z., Xiang J., Wang Y., Song B., Gu X., Guan L., Wei Y., Li H., Wu X., Xu J., Tu S., Zhang Y., Chen H., Cao B. Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan, China: a retrospective cohort study. *Lancet*, 2020, vol. 395, pp. 1054–1062. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30566-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30566-3)
22. Ruan Q., Yang K., Wang W., Jiang L., Song J. Clinical predictors of mortality due to COVID-19 based on an analysis of data of 150 patients from Wuhan, China. *Intensive Care Medicine*, 2020, vol. 46, no. 5, pp. 846–848. <https://doi.org/10.1007/s00134-020-05991-x>
23. Li X., Xu S., Yu M., Wang K., Tao Y., Zhou Y., Shi J., Zhou M., Wu B., Yang Z., Zhang C., Yue J., Zhang Z., Renz H., Liu X., Xie J., Xie M., Zhao J. Risk factors for severity and mortality in adult COVID-19 inpatients in Wuhan. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2020, vol. 146, no. 1, pp. 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2020.04.006>
24. Liu X., Xue S., Xu J., Ge H., Mao Q., Xu X., Jiang H. Clinical characteristics and related risk factors of disease severity in 101 COVID-19 patients hospitalized in Wuhan, China. *Acta Pharmacologica Sinica*, 2022, vol. 43, no. 1, pp. 64–75. <https://doi.org/10.1038/s41401-021-00627-2>
25. Alshaikh M.K., Alotair H., Alnajjar F., Sharaf H., Alhafi B., Alashgar L., Aljuaid M. Cardiovascular risk factors among patients infected with COVID-19 in Saudi Arabia. *Vascular Health and Risk Management*, 2021, vol. 17, pp. 161–168. <https://doi.org/10.2147/vhrm.s300635>
26. Phelps M., Christensen D.M., Gerds T., Fosbøl E., Torp-Pedersen Ch., Schou M., Køber L., Kragholm K., Andersson Ch., Biering-Sørensen T., Christensen H.C., Andersen M.P., Gislason G. Cardiovascular comorbidities as predictors for severe COVID-19 infection or death. *European Heart Journal – Quality of Care and Clinical Outcomes*, 2021, vol. 7, no. 2, pp. 172–180. <https://doi.org/10.1093/ehjqcco/qcaa081>
27. Kovvuri V.R.R., Liu S., Seisenberger M., Fan X., Muller B., Fu H. On understanding the influence of controllable factors with a feature attribution algorithm: a medical case study. *Proc. of the 2022 International Conference on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, 2022, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/inista55318.2022.9894147>
28. Lundberg S.M., Lee S.I. A unified approach to interpreting model predictions. *NIPS'17: Proc. of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, 2017, pp. 4768–4777.
29. Bhadra T., Mallik S., Hasan N., Zhao Z. Comparison of five supervised feature selection algorithms leading to top features and gene signatures from multi-omics data in cancer. *BMC Bioinformatics*,

- Bioinformatics. 2022. V. 23. N 3S. P. 153. <https://doi.org/10.1186/s12859-022-04678-y>
30. Barraza N., Moro S., Ferreyra M., de la Peña A. Mutual information and sensitivity analysis for feature selection in customer targeting: A comparative study // *Journal of Information Science*. 2019. V. 45. N 1. P. 53–67. <https://doi.org/10.1177/0165551518770967>
 31. Bouchlaghem Y., Akhiat Y., Amjad S. Feature selection: A Review and comparative study // *E3S Web of Conferences*. 2022. V. 351. P. 01046. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235101046>
 32. Chen R.-C., Dewi Ch., Huang S.-W., Caraka R.E. Selecting critical features for data classification based on machine learning methods // *Journal of Big Data*. 2020. V. 7. N 1. P. 52. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00327-4>
 33. Sun P., Wang D., Mok V.C., Shi L. Comparison of feature selection methods and machine learning classifiers for radiomics analysis in glioma grading // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 102010–102020. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2928975>
 34. Nguyen G., Kim D., Nguyen A. The effectiveness of feature attribution methods and its correlation with automatic evaluation scores // *Proc. of the 35th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2021)*. 2021.
 35. Amrhein V., Korner-Nievergelt F., Roth T. The earth is flat ($p > 0.05$): significance thresholds and the crisis of unreplicable research // *PeerJ*. 2017. V. 5. P. e3544. <https://doi.org/10.7717/peerj.3544>
 36. Kolukisa B., Hacilar H., Goy G., Kus M., Bakir-Gungor B., Aral A., Gungor V.C. Evaluation of classification algorithms, linear discriminant analysis and a new hybrid feature selection methodology for the diagnosis of coronary artery disease // *Proc. of the 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*. 2018. P. 2232–2238. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622609>
 37. Ricciardi C., Valente A.S., Edmunds K., Cantoni V., Green R., Fiorillo A., Picone I., Santini S., Cesarelli M. Linear discriminant analysis and principal component analysis to predict coronary artery disease // *Health Informatics Journal*. 2020. V. 26. N 3. P. 2181–2192. <https://doi.org/10.1177/1460458219899210>
 38. Breiman L. Random Forests // *Machine Learning*. 2001. V. 45. P. 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
 39. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T.-Y. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree // *Proc. of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*. 2017. P. 3149–3157.
 40. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A.V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // *Proc. of the 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018)*. 2018.
 - 2022, vol. 23, no. 3S, pp. 153. <https://doi.org/10.1186/s12859-022-04678-y>
 30. Barraza N., Moro S., Ferreyra M., de la Peña A. Mutual information and sensitivity analysis for feature selection in customer targeting: A comparative study. *Journal of Information Science*, 2019, vol. 45, no. 1, pp. 53–67. <https://doi.org/10.1177/0165551518770967>
 31. Bouchlaghem Y., Akhiat Y., Amjad S. Feature selection: A Review and comparative study. *E3S Web of Conferences*, 2022, vol. 351, pp. 01046. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235101046>
 32. Chen R.-C., Dewi Ch., Huang S.-W., Caraka R.E. Selecting critical features for data classification based on machine learning methods. *Journal of Big Data*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 52. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00327-4>
 33. Sun P., Wang D., Mok V.C., Shi L. Comparison of feature selection methods and machine learning classifiers for radiomics analysis in glioma grading. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 102010–102020. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2928975>
 34. Nguyen G., Kim D., Nguyen A. The effectiveness of feature attribution methods and its correlation with automatic evaluation scores. *Proc. of the 35th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2021)*, 2021.
 35. Amrhein V., Korner-Nievergelt F., Roth T. The earth is flat ($p > 0.05$): significance thresholds and the crisis of unreplicable research. *PeerJ*, 2017, vol. 5, pp. e3544. <https://doi.org/10.7717/peerj.3544>
 36. Kolukisa B., Hacilar H., Goy G., Kus M., Bakir-Gungor B., Aral A., Gungor V.C. Evaluation of classification algorithms, linear discriminant analysis and a new hybrid feature selection methodology for the diagnosis of coronary artery disease. *Proc. of the 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2018, pp. 2232–2238. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622609>
 37. Ricciardi C., Valente A.S., Edmunds K., Cantoni V., Green R., Fiorillo A., Picone I., Santini S., Cesarelli M. Linear discriminant analysis and principal component analysis to predict coronary artery disease. *Health Informatics Journal*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 2181–2192. <https://doi.org/10.1177/1460458219899210>
 38. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001, vol. 45, pp. 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
 39. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T.-Y. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Proc. of the 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*, 2017, pp. 3149–3157.
 40. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A.V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *Proc. of the 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018)*, 2018.

Авторы

Ватян Александра Сергеевна — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191870868](https://orcid.org/0000-0002-5483-716X), <https://orcid.org/0000-0002-5483-716X>, alexvatyan@gmail.com

Голубев Александр Андреевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7417-6947>, 9459539@gmail.com

Гусарова Наталия Федоровна — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57162764200](https://orcid.org/0000-0002-1361-6037), <https://orcid.org/0000-0002-1361-6037>, natfed@list.ru

Добренко Наталья Викторовна — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56499375200](https://orcid.org/0000-0001-6206-8033), <https://orcid.org/0000-0001-6206-8033>, graziokisa@yandex.ru

Зубаненко Алексей Александрович — медицинский директор, ООО «ИМВИЖН», Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация, [sc 57215436184](https://orcid.org/0000-0001-6953-5239), <https://orcid.org/0000-0001-6953-5239>, zubdocmri@gmail.com

Кустова Екатерина Сергеевна — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-6117-1266>, Katya.Kustova@gmail.com

Татаринова Анна Андреевна — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, 197341, Российская Федерация, [sc 6603195545](https://orcid.org/0000-0002-9046-2457), <https://orcid.org/0000-0002-9046-2457>, antsvet.18@mail.ru

Authors

Alexandra S. Vatian — PhD, Assistant Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191870868](https://orcid.org/0000-0002-5483-716X), <https://orcid.org/0000-0002-5483-716X>, alexvatyan@gmail.com

Alexander A. Golubev — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7417-6947>, 9459539@gmail.com

Natalia F. Gusarova — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57162764200](https://orcid.org/0000-0002-1361-6037), <https://orcid.org/0000-0002-1361-6037>, natfed@list.ru

Natalia V. Dobrenko — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56499375200](https://orcid.org/0000-0001-6206-8033), <https://orcid.org/0000-0001-6206-8033>, graziokisa@yandex.ru

Aleksei A. Zubanenko — Clinical Director, Imaging Medical Vision (IMV) LLC, Saint Petersburg, 191119, Russian Federation, [sc 57215436184](https://orcid.org/0000-0001-6953-5239), <https://orcid.org/0000-0001-6953-5239>, zubdocmri@gmail.com

Ekaterina S. Kustova — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6117-1266>, Katya.Kustova@gmail.com

Anna A. Tatarinova — PhD (Medicine), Senior Researcher, Senior Researcher, Almazov National Medical Research Center, Saint Petersburg, 197341, Russian Federation, [sc 6603195545](https://orcid.org/0000-0002-9046-2457), <https://orcid.org/0000-0002-9046-2457>, antsvet.18@mail.ru

Томилов Иван Вячеславович — старший лаборант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57772599000](https://orcid.org/0000-0003-1886-2867), <https://orcid.org/0000-0003-1886-2867>, ivan-tomilov3@yandex.ru

Шовкоплас Григорий Филиппович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57222048908](https://orcid.org/0000-0001-7777-6972), <https://orcid.org/0000-0001-7777-6972>, grigory.96@gmail.com

Ivan V. Tomilov — Senior Laboratory Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57772599000](https://orcid.org/0000-0003-1886-2867), <https://orcid.org/0000-0003-1886-2867>, ivan-tomilov3@yandex.ru

Grigori F. Shovkoplyas — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57222048908](https://orcid.org/0000-0001-7777-6972), <https://orcid.org/0000-0001-7777-6972>, grigory.96@gmail.com

Статья поступила в редакцию 16.12.2022
Одобрена после рецензирования 07.04.2023
Принята к печати 29.05.2023

Received 16.12.2022
Approved after reviewing 07.04.2023
Accepted 29.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617

УДК 004.7

Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов

Владимир Анатольевич Богатырев¹✉, Станислав Владимирович Богатырев²,
Анатолий Владимирович Богатырев³

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

^{2,3} ООО «Центр разработки облачных хранилищ Ядро», Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация

¹ vladimir.bogatyrev@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>

² realloc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0836-8515>

³ gangleon@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5447-7275>

Аннотация

Введение. Исследованы возможности повышения готовности резервированной компьютерной системы к своевременному выполнению запросов, критичных к задержкам обслуживания. Рассмотрен отказоустойчивый компьютерный кластер, в котором узлы представляют собой дублированные вычислительные системы, объединяющие компьютерные узлы и узлы памяти. Предположено двухэтапное восстановление узлов памяти: физическое, а затем информационное, осуществляемое с использованием ресурсов вычислительных узлов. **Метод.** Предложены обоснования выбора дисциплин восстановления и обслуживания потока функциональных запросов на основе марковских моделей. Предложенные модели позволяют учесть влияние разделения вычислительных ресурсов на совместное выполнение требуемых функций и на информационное восстановление памяти, реализуемое после ее физического восстановления. Выбор дисциплин обслуживания компьютерной системы направлен на достижение компромисса между стремлением увеличить коэффициент готовности и вероятностью своевременного выполнения поступающего потока функциональных запросов. Рассмотрено доказательство выбора вариантов распределения (разделения) сохраненных после отказов вычислительных ресурсов на решение функциональных запросов (требуемых функций) и информационное восстановление памяти. **Основные результаты.** На основе предложенных марковских моделей исследована зависимость готовности системы к своевременному выполнению запросов от вариантов распределения сохраненных в системе вычислительных ресурсов на восстановление информации в памяти и выполнение функциональных задач. Исследование проведено в зависимости от допустимого времени ожидания функциональных запросов и интенсивности трафика. Проанализировано влияние готовности системы к своевременному выполнению запросов балансировки трафика функциональных задач между работоспособными вычислительными узлами. Показано существование оптимальной доли распределения трафика между вычислительными узлами. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы при обосновании выбора дисциплин обслуживания функциональных запросов и восстановления после отказов отказоустойчивых кластерных систем, критичных к задержкам выполнения функциональных запросов.

Ключевые слова

кластер, коэффициент готовности, восстановление, информационное восстановление памяти, марковская модель, дисциплина восстановления, критичность к задержкам обслуживания, вероятность своевременного выполнения запросов, дублированная система, отказоустойчивость

Ссылка для цитирования: Богатырев В.А., Богатырев С.В., Богатырев А.В. Оценка готовности компьютерной системы к своевременному обслуживанию запросов при его совмещении с информационным восстановлением памяти после отказов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 608–617. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617

Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures

Vladimir A. Bogatyrev¹✉, Stanislav V. Bogatyrev², Anatoly V. Bogatyrev³

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

^{2,3} Yadro Cloud Storage Development Center, Saint Petersburg, 195027, Russian Federation

¹ vladimir.bogatyrev@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>

² realloc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0836-8515>

³ gangleon@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5447-7275>

Abstract

The possibilities of increasing the readiness of a redundant computer system for the timely execution of requests critical to service delays are being investigated. A fault-tolerant computer cluster is considered in which nodes are duplicated computing systems that combine computer nodes and memory nodes. Two-stage recovery of memory nodes is assumed: first physical, and then informational, carried out using the resources of computing nodes. The novelty of the approach lies in the fact that for systems with a limitation of the allowable service time of functional requests, the impact of recovery disciplines on the readiness of the system with various options for dividing computing resources to restore information after memory failures and to perform the required functions is evaluated. At the same time, the reliability of the computer systems under study is assessed not only by the probability of their readiness to perform functional tasks (by the readiness coefficient), but also by the probability of the system readiness to perform tasks in a timely manner. Justification of the choice of disciplines for the restoration and maintenance of the flow of functional requests is carried out on the basis of Markov models. At the same time, models are proposed that allow taking into account the impact of the division of computing resources on the joint performance of the required functions and on the information recovery of memory, implemented after its physical recovery. The choice of computer system maintenance disciplines based on the proposed Markov model is aimed at achieving a compromise between the desire to increase the availability factor and the probability of timely execution of the incoming flow of functional requests. The justification of the choice of options for the distribution (separation) of computing resources stored after failures to solve functional queries (required functions) and information recovery of memory, implemented after its physical recovery, is carried out. Based on the proposed Markov models, the dependence of the system readiness for timely execution of requests on the distribution options of computing resources stored in the system for restoring information in memory and for performing functional tasks is investigated. The study was conducted depending on the allowable waiting time for functional requests and the intensity of their traffic. The influence on the system readiness for timely execution of traffic balancing requests of functional tasks between functional computing nodes is analyzed, taking into account the options for their possible joint use for information recovery of memory nodes after their physical recovery. The existence of an optimal share of traffic distribution between computing nodes is shown, taking into account the options for dividing their resources to service functional requests and to restore information in memory nodes after their physical recovery. The results obtained can be used to justify the choice of disciplines for servicing functional requests and recovery after failures of fault-tolerant cluster systems critical to delays in the execution of functional requests.

Keywords

cluster, availability factor, recovery, information recovery of memory, Markov model, recovery discipline, criticality to service delays, probability of timely execution of requests, duplicated system, fault tolerance

For citation: Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 608–617 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-608-617

Введение

Надежность и эффективность распределенных компьютерных систем (КС) во многом определяется организацией их резервирования, а также дисциплинами обслуживания запросов и восстановления системы после отказов [1–4]. Обеспечение надежности и отказоустойчивости при восстановлении КС необходимо осуществлять с учетом влияния процедур контроля, реконфигурации и восстановления эффективного выполнения требуемых функций, в том числе надежности, задержки и своевременности вычислений [5–8]. Таким образом, проектирование инфокоммуникационных систем связано с многокритериальностью, обуславливающей необходимость поиска компромиссов по разрешению возникающих технических противоречий распределения ограниченных ресурсов на достижение

высокой готовности системы и на качество (задержки) выполнения требуемых задач [9–12]. В настоящее время необходимость решения подобного класса задач проектирования мотивирует исследователей на интенсивное развитие и внедрение концепции модельно ориентированного оптимального проектирования отказоустойчивых распределенных КС обработки и хранения данных [13–15]. Концепция предусматривает построение моделей для обоснования выбора проектных решений и их структурно параметрической оптимизации [13–18]. При разработке отказоустойчивых кластерных КС представляют интерес модели, ориентированные на поиск оптимальных решений по организации процессов обработки, передачи и хранения данных. Такой поиск должен проводиться с учетом влияния на эффективность КС дисциплин обслуживания и восстановления системы при возникновении и накоплении

отказов. Разрабатываемые модели должны отражать особенности совместного функционирования средств обработки и хранения данных, особенностью которых является необходимость не только физического, но и ее информационного восстановления. Известны модели систем хранения [19–22], построенные на основе RAID-массивов (RAID, Redundant Array of Independent Disks, избыточный массив независимых дисков), которые позволяют учесть характерные для них процессы физического и информационного восстановления дисков при различных вариантах структурно-информационной избыточности. [19–22]. Вместе с тем известные модели надежности RAID-массивов не учитывают возможное торможение выполнения функциональных запросов в КС во время реализации процедур информационного восстановления накопителя.

Оценка эффективности процедур восстановления резервированных КС должна проводиться с учетом их влияния на реализацию вычислительных процессов, в том числе на их замедление и возможность сохранения непрерывности выполнения функциональных задач. Для систем с ограничением допустимого времени обслуживания запросов на решение функциональных запросов важно оценить влияние дисциплин восстановления на вероятность выполнения запросов за установленное предельно допустимое время. Такие требования обуславливают потребность оценки надежности исследуемых КС не только по вероятности готовности к выполнению функциональных задач (по коэффициенту готовности), но и по вероятности готовности к своевременному выполнению задач [23, 24]. Для оценки эффективности рассматриваемых резервированных КС, в том числе реального времени, предложено использовать коэффициент готовности к своевременному выполнению запросов ($K_{ГВЗ}$) K_c .

Определим K_c как вероятность готовности системы в произвольный момент времени к выполнению функциональных задач с не превышением заданного предельно допустимого времени.

Для рассматриваемых КС, предусматривающих обработку и хранение данных, модели надежности должны учитывать двухэтапное восстановление памяти: физическое и информационное [23, 24]. На втором этапе задействованы ресурсы вычислительных узлов и может происходить динамическая миграция данных и виртуальных машин при репликации данных в узлах памяти дублированных систем, объединяемых в кластер [23–25].

Особый интерес представляет разработка моделей, позволяющих учесть влияние разделения вычислительных ресурсов на совместное выполнение требуемых функций и информационное восстановление памяти, реализуемое после физического. Заметим, что известные модели, отражающие двухэтапность восстановления памяти, такую возможность распределения вычислительных ресурсов не учитывают.

Разделение ресурсов работоспособных вычислительных узлов на поддержку двух указанных задач связано с техническим противоречием. Действительно, преимущественное выделение вычислительных ресурсов на выполнение функциональных задач замед-

ляет процесс информационного восстановления и как следствие приводит к снижению готовности системы. Приоритетность же информационного восстановления может привести к росту задержек решения функциональных задач, что нежелательно, особенно для систем реального времени. Рассматриваемые модели функциональной надежности должны быть направлены на достижение компромисса между стремлением увеличить коэффициент готовности и вероятность своевременного выполнения поступающего потока функциональных запросов. Достижение указанного компромисса особенно важно при поступлении потоков функциональных запросов реального времени, критичных к допустимым задержкам обслуживания запросов.

Цель работы — повышение готовности резервированной КС к своевременному выполнению запросов, критичных к задержкам обслуживания, при обосновании распределения (разделения) сохраненных после отказов вычислительных ресурсов на решение функциональных запросов (требуемых функций) и информационное восстановление памяти, проводимое после ее физического восстановления.

Кластер дублированных компьютерных систем

Рассмотрим отказоустойчивый вычислительный кластер, в котором узлы представляют собой дублированные КС. Комплектация кластера (рис. 1) на основе дублированных систем, объединяющих пару вычислительных узлов (В) и пару узлов памяти (М), направлена на повышение надежности кластерных узлов и кластерной системы в целом. Использование в узлах кластера двухвходовой памяти может повысить их отказоустойчивость, так как обеспечит возможность работы любого вычислителя с любым узлом памяти. Такое решение при репликации данных в двух узлах памяти дублированной КС позволит сохранить непрерывность вычислительного процесса при сохранении после отказов минимум одного вычислителя и одного узла памяти.

В рассматриваемых дублированных кластерных узлах (дублированных КС) при отказе узла памяти выполним его двухэтапное восстановление. На первом этапе осуществим физическое восстановление узла памяти,

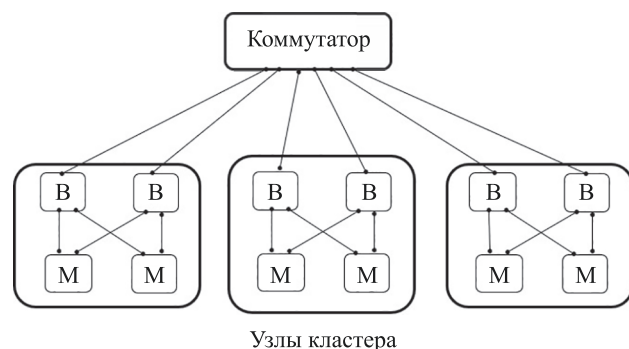


Рис. 1. Структура кластера, комплектуемого из дублированных узлов

Fig. 1. The structure of a cluster made up of duplicated nodes

а на втором — восстановление информации в физически восстановленной памяти. Для информационного восстановления используем часть ресурсов одного из вычислительных узлов. Восстановление информации, требуемой для выполнения функциональных запросов, проведем из сохранившего работоспособность узла памяти дублированной КС. Если репликация данных выполнена только в двух узлах памяти дублированного узла, то возможности восстановления памяти (и дублированной системы в целом) ограничены недопустимостью отказов двух узлов памяти дублированной системы.

При построении модели будем считать, что информация, необходимая для восстановления функционирования памяти после ее физического восстановления, в системе имеется. Такое предположение допустимо, если для решения функциональных задач не требуются результаты предыдущих вычислений, накопленных в узлах памяти, или если для этого достаточны данные, сохраненные во внутренней памяти вычислительных узлов. Снизить отрицательное влияние потери данных после отказов двух узлов позволяет периодическое проведение резервного копирования на внешний носитель. Используя результаты резервного копирования, возможно восстановить потерянные данные в два этапа: в узлы памяти заносятся данные, сохраненные при резервном копировании, и проводится восстановление данных, накопленных в период от резервного копирования до отказа двух узлов памяти. Для восстановления данных могут быть использованы данные с внутренней памяти вычислительных узлов и данные, сохраненные при их передачах через сеть. Таким образом, при отказе двух узлов памяти и потери накопленных в них данных восстановление актуальных данных возможно, но оно сопряжено с определенными временными затратами.

Марковская модель с учетом совмещения информационного восстановления памяти и решения функциональных задач

Отличие предлагаемой модели дублированных КС заключается в том, что в ней учитывается возможность совместного использования вычислительных узлов для обслуживания поступающих в систему запросов и информационного восстановления памяти, реализуемого после ее физического восстановления.

При построении марковской модели надежности рассмотрим дисциплину обслуживания, при которой приоритет восстановления предоставлен памяти для снижения риска (вероятности) перехода в состояния потери всех (двух) реплик данных, хранимых в разных узлах памяти. Потеря функциональности дублированной КС в результате утраты накопленных данных происходит, когда каждый узел памяти отказал, либо физически восстановлен, но информация, требуемая для решения поставленных задач, не загружена.

Диаграмма состояний и переходов предлагаемой марковской модели дублированной КС представлена на рис. 2. При кодировании состояний системы верхняя строка отображает работоспособность узлов вычислителей, а нижняя — узлов памяти. Состояние работоспо-

собности обозначено «1», отказа «0». Для узлов памяти дополнительно введено состояние «F» — узел физически восстановлен, но данные, требуемые для обслуживания запросов, не загружены (физически восстановленная память информационно не восстановлена). На схеме модели обозначены интенсивности отказов вычислительных узлов и памяти λ_1, λ_2 , а интенсивности их физического восстановления — μ_1, μ_{21} . Интенсивность информационного восстановления памяти обозначена μ_{22} , а снижение интенсивности по результатам резервного копирования — $b\mu_{22}$. Вероятности состояний 1, 2, ..., 13 дублированной системы обозначены — $P_0, P_1, P_2, \dots, P_{13}$.

К работоспособным состояниям системы, при которых она способна обслуживать поток поступающих запросов, относятся состояния «0», «1», «2», «3», «6», «9». Причем для состояний «0», «1», «3» возможно разделение поступающего в систему потока запросов (нагрузки) между двумя вычислительными узлами. При этом для состояния «1» может быть разделение вычислительных ресурсов двух узлов на выполнение запросов и на информационное восстановление физически восстановленной памяти.

Выделим следующие варианты распределения вычислительных ресурсов для состояния «1»:

A1: ресурсы одного вычислителя выделены на восстановление информации, а второго — на выполнение функциональных задач;

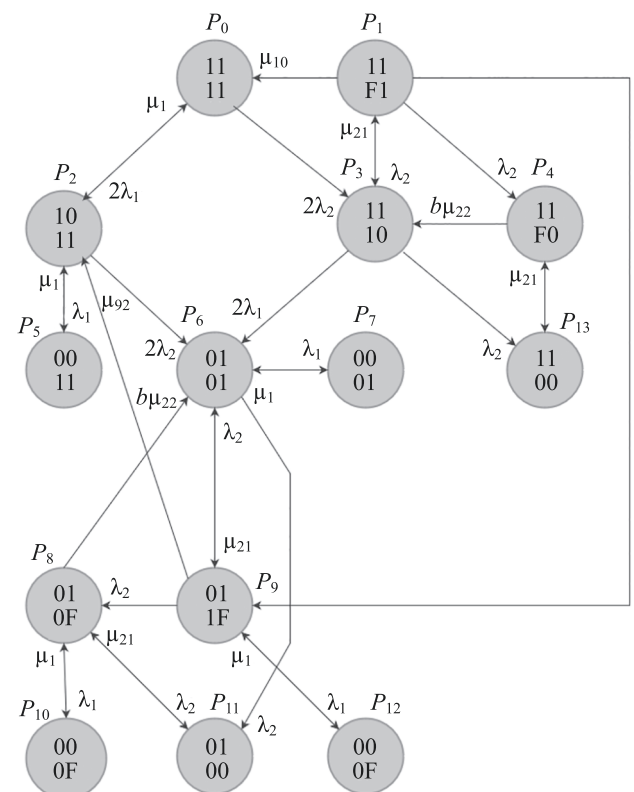


Рис. 2. Марковская модель дублированной компьютерной системы с двухэтапным восстановлением узлов памяти

Fig. 2. Markov model of a duplicated computing system with two-stage recovery of memory nodes

A2: доля β_1 ресурсов одного вычислителя направлена на восстановление информации, а доля $(1-\beta_1)$ — на выполнение функциональных задач. Ресурсы второго вычислителя полностью выделяются на выполнение функциональных задач.

Для состояния «9» возможны два варианта распределения ресурсов единственного работоспособного вычислительного узла:

B1: ресурсы вычислителя полностью задействованы в информационном восстановлении физически восстановленного узла памяти;

B2: на информационное восстановление выделена доля β_2 ресурсов работоспособного вычислителя.

При $\beta_2 = 1$ вариант B2 сводится к варианту B1. Выделим следующие комбинации вариантов организации восстановления рассматриваемой системы: (A1, B1), (A1, B2), (A2, B1), (A2, B2).

Выделение всех ресурсов вычислительных узлов на выполнение функциональных задач не рассмотрено, так как это может увеличить риски потери информации в двух узлах памяти.

Составим по известным правилам [26] из диаграммы состояний и переходов систему алгебраических (или дифференциальных для нестационарного режима) уравнений [26]. Решим систему уравнений (в любой системе компьютерной математики) и найдем вероятности всех состояний $P_0, P_1, P_2, \dots, P_{13}$.

Коэффициент готовности дублированной КС рассчитаем как сумму всех работоспособных состояний, т. е. состояний, при которых возможно выполнение функциональных задач [26].

$$K = \sum_{i \in W} P_i,$$

где W — множество работоспособных состояний дублированной системы (для комбинаций восстановления системы, включающей варианты B1 $W = \{0, 1, 2, 3, 6\}$, B2 — $W = \{0, 2, 3, 6, 9\}$).

Коэффициент K_c определим по вероятности готовности системы к осуществлению функциональных задач при условии, что они будут выполнены с не превышением заданного предельно допустимого времени

$$K_c = \sum_{j=1}^z \sum_{i \in W_j} R_j P_i = \sum_{j=1}^z \left(R_j \sum_{i \in W_j} P_i \right),$$

где z — число выделяемых градаций состояний системы по ресурсам, задействованным при выполнении функциональных запросов; W_j — множество работоспособных состояний системы, относящихся к j -й градации, характеризуемой вероятностью своевременного выполнения запросов R_j ; P_i — вероятность i -го состояния системы, относящегося к множеству работоспособных состояний W_j .

Для рассматриваемой дублированной КС выделим множества состояний $W_2 = \{0, 3\}$ и $W_1 = \{2, 6\}$, для которых поток запросов может быть распределен на выполнение в два или только в один вычислительный узел. Для состояний «1» и «9» при оценке вероятности своевременного выполнения запросов учтем доли ре-

сурсов, выделенные на информационное восстановление и на выполнение функциональных запросов.

Определим КГСВЗ для рассматриваемых дублированных КС:

$$K_c = R_2 \sum_{i \in W_2} P_i + R_1 \sum_{i \in W_1} P_i + R_{2\beta} P_1 + R_{1\beta} P_9,$$

где R_2 — вероятность выполнения функциональных запросов за время меньше предельно допустимого, если поток запросов распределяется на два вычислительных узла; R_1 — поток обслуживается одним вычислительным узлом; $R_{2\beta}$, $R_{1\beta}$ — вероятности выполнения функциональных запросов за допустимое время для состояний «1» и «9» с учетом долей вычислительных ресурсов, выделяемых на информационное восстановление памяти.

Вероятности R_1 и R_2 выполнения функциональных запросов за время меньше t_0 при интенсивности входного потока функциональных запросов Λ имеют вид

$$R_1 = 1 - \Lambda v \exp(t_0(\Lambda - v^{-1})),$$

$$R_2 = 1 - 0,5 \Lambda v \exp(t_0(0,5 \Lambda - v^{-1})),$$

где v — среднее время выполнения функционального запроса.

Для варианта восстановления B2 для состояния «9» интенсивность перехода в состояние «2» $\mu_{92} = \beta_2 \mu_{22}$. Вычислим вероятность своевременного обслуживания запросов в состоянии «9»:

$$R_{1\beta} = 1 - \Lambda \frac{v}{1 - \beta_2} \exp\left(t_0 \left(\Lambda - \frac{1 - \beta_2}{v} \right)\right).$$

Для комбинаций дисциплин, включающих вариант обслуживания B1, вероятность $R_{1\beta} = 0$.

Для варианта восстановления A1 ресурсы одного вычислителя выделим на решение функциональных задач, а второго — на восстановление информации в памяти. В этом случае $R_{2\beta} = R_1$, а $\mu_{10} = \mu_{22}$.

Для варианта восстановления A2 ресурсы одного вычислителя распределяются только на восстановление информации, а ресурсы второго в долях β_1 и $(1 - \beta_1)$ на восстановление информации и решение функциональных задач. В этом случае $\mu_{10} = \beta_1 \mu_{22}$.

Наличие двух вычислительных узлов с разными долями, предоставляемых для решения функциональных ресурсов, вызывает потребность рационального (оптимального) распределения потока запросов между этими узлами.

При доле α потока запросов, распределяемой в выделенный только для выполнения запросов узел, вероятность своевременного выполнения запросов в нем имеет вид

$$R_{21\beta} = 1 - \alpha \Lambda v \exp\left(t_0 \left(\Lambda - \frac{1}{v} \right)\right).$$

Получим вероятность своевременного обслуживания запросов для используемого узла, информационного восстановления памяти и выполнения функциональных запросов:

$$R_{22\beta} = 1 - (1 - \alpha)\Lambda \frac{v}{1 - \beta_1} \exp\left(t_0 \left(\Lambda(1 - \alpha) - \frac{1 - \beta_1}{v}\right)\right).$$

Рассчитаем математическое ожидание вероятности выполнения функциональных запросов с учетом использования для этого вычислительных ресурсов двух узлов:

$$R_{2\beta} = \alpha R_{21\beta} + (1 - \alpha)R_{22\beta}.$$

Оценка коэффициента готовности к своевременному выполнению запросов

На основе предложенной марковской модели оценим влияния вариантов дисциплин восстановления на эффективность функционирования дублированной КС с возможным совмещением информационного восстановления памяти и решения требуемых функциональных задач.

Выполним расчеты для следующих параметров $\lambda_1 = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$, $\mu_1 = \mu_{21} = 1 \text{ ч}^{-1}$, $\mu_{22} = 0,1 \text{ ч}^{-1}$, $b = 1$.

Рассмотрим простейшее сочетание дисциплин (A1, B1), при котором для состояний «1» и «9» разделение ресурсов вычислителей на выполнение функциональных запросов и на информационное восстановление памяти не реализуется.

Для комбинации дисциплин восстановления (A1, B1) зависимость КГСВЗ K_c от интенсивности Λ потока запросов на выполнение функциональных задач представлена на рис. 3. Из графиков видно существенность влияния t_0 на K_c .

Исследуем влияние разделения ресурсов вычислителя на выполнение запросов и на информационное восстановление памяти при рассмотрении дисциплины (A2, B1). Для этой дисциплины в состоянии «1» один вычислитель полностью задействован в выполнении функциональных запросов, а ресурсы второго разделены в долях β_1 и $(1 - \beta_1)$ на информационное восста-

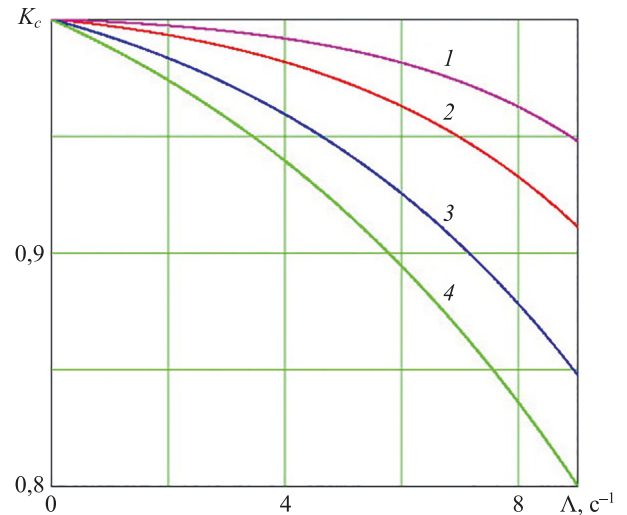


Рис. 3. Зависимости K_c от интенсивности Λ потока запросов на выполнение функциональных задач для дисциплины восстановления (A1, B1) при t_0 равным: 0,15 с (кривая 1); 0,2 с (кривая 2); 0,3 с (кривая 3); 0,4 с (кривая 4)

Fig. 3. Dependences of K_c vs. the intensity Λ of the flow of requests for the execution of functional tasks for the restoration discipline (A1, B1) at t_0 equal to: 0.15 s (curve 1); 0.2 s (curve 2); 0.3 s (curve 3); 0.4 s (curve 4)

новление памяти и на выполнение функциональных запросов.

В зависимости от назначенных долей β_1 и $(1 - \beta_1)$ для дисциплины (A2, B1) представляет интерес анализ влияния на коэффициент K_c долей потока функциональных запросов α и $(1 - \alpha)$, направляемых на выполнение в первый и второй вычислительные узлы.

Зависимость K_c от интенсивности потока запросов Λ на выполнение функциональных задач при $t_0 = 0,32 \text{ с}$, $v = 0,1 \text{ с}$ представлена на рис. 4. На рис. 4, а кривые 1–6 соответствуют долям потока запросов $\alpha = 0,1, 0,2, 0,4, 0,5, 0,6, 1$. Расчет выполнен при $\beta_1 = 0,9$. На рис. 4, б кривая 1 показывает зависимость K_c от интенсивности

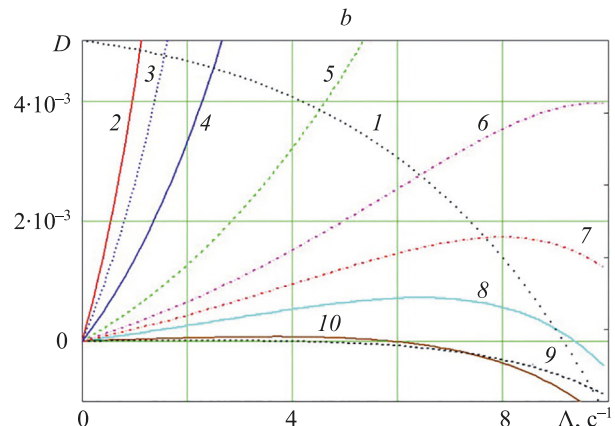
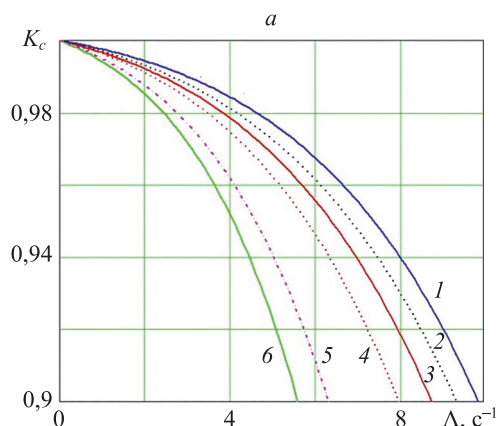


Рис. 4. Зависимости K_c и D от Λ для дисциплины (A2, B1) при $\beta_1 = 0,9$: кривые 1–6 соответствуют $\alpha = 0,1, 0,2, 0,4, 0,5, 0,6, 1$ (а); кривая 1 соответствует K_c при $\alpha = 1$, кривые 2–10 разностям D коэффициентов K_c дисциплин A2 и B1 при $\alpha = 0,01, 0,2, 0,4, 0,6, 0,7, 0,75, 0,8, 0,9$ и $0,95$ (б)

Fig. 4. Dependences of K_c and D vs. Λ for discipline (A2, B1) at $\beta_1 = 0,9$: а — curves 1–6 correspond to $\alpha = 0,1, 0,2, 0,4, 0,5, 0,6, 1$ (а); curve 1 corresponds to K_c at $\alpha = 1$, curves 2–10 to the differences in D coefficients of K_c disciplines A2 and B1 at $\alpha = 0,01, 0,2, 0,4, 0,6, 0,7, 0,75, 0,8, 0,9$ and $0,95$ (б)

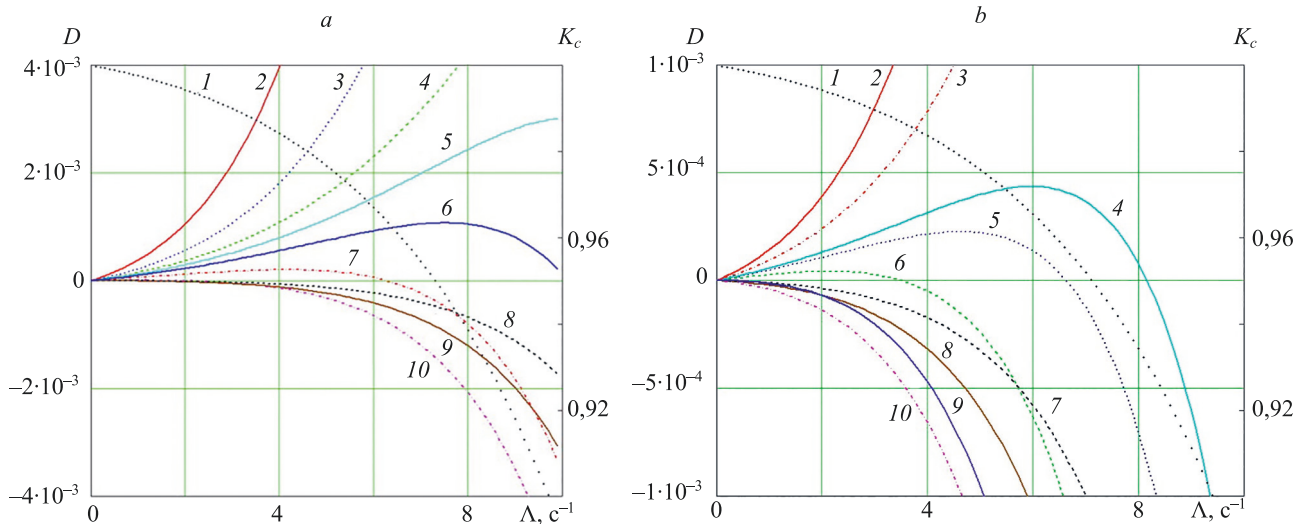


Рис. 5. Зависимости D от Λ для дисциплины (A2, B1) при $\beta_1 = 0.5$ (a) и $\beta_1 = 0.2$ (b): для $\beta_1 = 0.5$ кривыми 2–10 показаны разницы D при $\alpha = 0.01, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9$ и 0.95 (a); для $\beta_1 = 0.2$ кривыми 2–10 — разницы D при $\alpha = 0.01, 0.1, 0.18, 0.2, 0.26, 0.4, 0.7, 0.9$ и 0.95 (b)

Fig. 5. Dependences of D vs. Λ for discipline (A2, B1) at $\beta_1 = 0.5$ (a) and $\beta_1 = 0.2$ (b): for $\beta_1 = 0.5$, curves 2–10 show differences in D at $\alpha = 0.01, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9$ and 0.95 (a); for $\beta_1 = 0.2$ curves 2–10 — D differences at $\alpha = 0.01, 0.1, 0.18, 0.2, 0.26, 0.4, 0.7, 0.9$ and 0.95 (b)

Λ при $\alpha = 1$ (когда весь трафик распределяется в вычислитель, полностью выделенный на выполнения запросов). Кривыми 2–10 представлены расчеты разницы D коэффициентов K_c при распределении на вычислитель, не задействованный в информационном восстановлении памяти, соответственно, на поступающий трафик в долях $\alpha = 0.01, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9$ и 0.95 .

Зависимости K_c от интенсивности потока запросов Λ на выполнение функциональных задач при $\beta_1 = 0.5$ и $\beta_1 = 0.2$ показаны на рис. 5, a, b, где кривые 1 представляют зависимости K_c от интенсивности Λ при $\alpha = 1$ для случаев $\beta_1 = 0.5$ и $\beta_1 = 0.2$ соответственно. На рис. 5, a для $\beta_1 = 0.5$ кривыми 2–10 показаны разницы D ,

при $\alpha = 0.01, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9$ и 0.95 . На рис. 5, b для $\beta_1 = 0.2$ кривыми 2–10 — разницы D , при $\alpha = 0.01, 0.1, 0.18, 0.2, 0.26, 0.4, 0.7, 0.9$ и 0.95 .

Анализ полученных графиков зависимостей показал реальное влияние распределения трафика между работоспособными узлами на КГСВЗ при совмещении использования вычислительных узлов на обслуживание функциональных запросов и восстановление памяти. Результаты расчетов позволили предположить существование оптимального распределения трафика на вычислительные узлы в зависимости от степени совмещения их использования при информационном

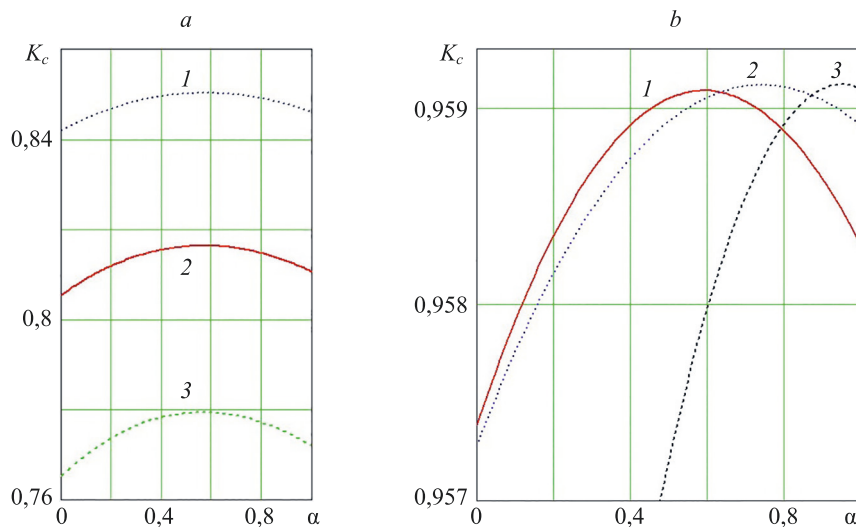


Рис. 6. Зависимости K_c от долей распределения трафика между вычислительными узлами: при $\beta_1 = 0.2$ кривые 1–3 соответствуют $\Lambda = 6, 7, 8 \text{ с}^{-1}$ (a); при $\Lambda = 2 \text{ с}^{-1}$ кривые 1–3 соответствуют $\beta_1 = 0.2, 0.5, 0.9$ (b)

Fig. 6. Dependences of K_c vs. the shares of traffic distribution between computing nodes: at $\beta_1 = 0.2$, curves 1–3 correspond to $\Lambda = 6, 7, 8 \text{ с}^{-1}$ (a); at $\Lambda = 2 \text{ с}^{-1}$ curves 1–3 correspond to $\beta_1 = 0.2, 0.5, 0.9$ (b)

восстановлении памяти и решении функциональных задач.

Зависимости K_c от α при $t_0 = 0,1$ с представлена на рис. 6. При $\beta_1 = 0,2$ кривыми 1–3 на рис. 6, а представлены расчеты при $\Lambda = 6, 7, 8$ с⁻¹. На рис. 6, б при $\Lambda = 2$ с⁻¹ кривые 1–3 соответствуют $\beta_1 = 0,2, 0,5, 0,9$. Представленные графики подтверждают существование оптимальной доли распределения трафика функциональных задач между вычислительными узлами, один из которых выполняет только запросы, а второй — в том числе, реализует занесение данных в физически восстановленный узел памяти.

Заключение

Для отказоустойчивых компьютерных кластеров с построением узлов на основе дублированных вычислительных систем проанализированы возможности повышения готовности узлов кластера к своевременному выполнению запросов, критичных к задержкам обслуживания.

Предложены марковские модели дублированных узлов кластера, на основе которых исследованы зависимости готовности системы к своевременному выполнению запросов от вариантов распределения ресурсов, сохранивших работоспособность вычислительных узлов на восстановление информации в памяти и на выполнение функциональных задач. Исследование проведено в зависимости от допустимого времени ожидания функциональных запросов и интенсивности их трафика. Проанализировано влияние на готовность системы к своевременному выполнению запросов балансировки трафика функциональных задач между работоспособными вычислительными узлами при их возможном использовании для информационного восстановления узлов памяти.

Показано существование оптимальной доли распределения трафика функциональных запросов между вычислительными узлами, в зависимости от вариантов разделения их ресурсов на обслуживание функциональных запросов и на восстановление информации в узлах памяти после их физического восстановления.

Литература

1. Shubinsky I.B., Rozenberg I.N., Papic L. Adaptive fault tolerance in real-time information systems // *Reliability: Theory & Applications*. 2017. V. 12. N 1(44). P. 18–25.
2. Krasnobaev V., Kuznetsov A., Kiian A., Kuznetsova K. Fault tolerance computer system structures functioning in residue classes // *Proc. of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. V. 11. 2021. P. 471–474. <https://doi.org/10.1109/idaacs53288.2021.9660919>
3. Tatarnikova T.M., Sikarev I.A., Bogdanov P.Y., Timochkina T.V. Botnet attack detection approach in IoT networks // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2022. V. 56. N 8. P. 838–846. <https://doi.org/10.3103/S0146411622080259>
4. Bukhsh M., Abdullah S., Rahman A., Asghar M.N., Arshad H., Alabdulatif A. An energy-aware, highly available, and fault-tolerant method for reliable IoT systems // *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 145363–14538. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3121033>
5. Wu B.-H., Alexander R.N., Liu S., Zhang Z. Quantum computing with multidimensional continuous-variable cluster states in a scalable photonic platform // *Physical Review Research*. 2020. V. 2. N 2. P. 023138. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.2.023138>
6. Bogatyrev V.A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2000. V. 34. N 6. P. 51–57.
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1864. N 1. P. 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012094>
8. Dinh T.D., Vishnevsky V., Pham V.D., Le D.T., Kirichek R., Koucheryavy A. Determination of subscribers coordinates using flying network for emergencies // *Proc. of the 24th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. 2022. P. 1309–1318. <https://doi.org/10.23919/icaact53585.2022.9728777>
9. Alsweity M., Muthanna A., Elgendy I.A., Koucheryavy A. Traffic management algorithm for V2X-based flying fog system // *Lecture Notes in Computer Science*. 2021. V. 13144. P. 32–41. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92507-9_4
10. Stepanov N., Turlikov A., Begishev V., Koucheryavy Y., Moltchanov D.A. Accuracy assessment of user micromobility models for thz cellular systems // *mmNets 2021: Proc. of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems, Part of ACM MobiCom 2021*. V. 5. 2021. P. 37–42. <https://doi.org/10.1145/3477081.3481676>

References

1. Shubinsky I.B., Rozenberg I.N., Papic L. Adaptive fault tolerance in real-time information systems. *Reliability: Theory & Applications*, 2017, vol. 12, no. 1(44), pp. 18–25.
2. Krasnobaev V., Kuznetsov A., Kiian A., Kuznetsova K. Fault tolerance computer system structures functioning in residue classes. *Proc. of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. V. 11, 2021, pp. 471–474. <https://doi.org/10.1109/idaacs53288.2021.9660919>
3. Tatarnikova T.M., Sikarev I.A., Bogdanov P.Y., Timochkina T.V. Botnet attack detection approach in IoT networks. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2022, vol. 56, no. 8, pp. 838–846. <https://doi.org/10.3103/S0146411622080259>
4. Bukhsh M., Abdullah S., Rahman A., Asghar M.N., Arshad H., Alabdulatif A. An energy-aware, highly available, and fault-tolerant method for reliable IoT systems. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 145363–14538. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3121033>
5. Wu B.-H., Alexander R.N., Liu S., Zhang Z. Quantum computing with multidimensional continuous-variable cluster states in a scalable photonic platform. *Physical Review Research*, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 023138. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.2.023138>
6. Bogatyrev V.A. An interval signal method of dynamic interrupt handling with load balancing. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2000, vol. 34, no. 6, pp. 51–57.
7. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1864, no. 1, pp. 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012094>
8. Dinh T.D., Vishnevsky V., Pham V.D., Le D.T., Kirichek R., Koucheryavy A. Determination of subscribers coordinates using flying network for emergencies. *Proc. of the 24th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2022, pp. 1309–1318. <https://doi.org/10.23919/icaact53585.2022.9728777>
9. Alsweity M., Muthanna A., Elgendy I.A., Koucheryavy A. Traffic management algorithm for V2X-based flying fog system. *Lecture Notes in Computer Science*, 2021, vol. 13144, pp. 32–41. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92507-9_4
10. Stepanov N., Turlikov A., Begishev V., Koucheryavy Y., Moltchanov D.A. Accuracy assessment of user micromobility models for thz cellular systems. *mmNets 2021: Proc. of the 5th ACM Workshop on Millimeter-Wave and Terahertz Networks and Sensing Systems, Part of ACM MobiCom 2021*. V. 5, 2021, pp. 37–42. <https://doi.org/10.1145/3477081.3481676>

11. Tatarnikova A.A., Turlikov A.M., Pupynin D.A. The spectral analysis of data obtained from accelerometers for musculoskeletal diseases diagnosis // *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2018. P. 8604404. <https://doi.org/10.1109/weconf.2018.8604404>
12. Markoval E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Ivanova D., Koucheryav Y., Samouylov K. Priority-based coexistence of eMBB and URLLC traffic in industrial 5G NR deployments // *Proc. of the 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. 2020. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/icumt51630.2020.9222433>
13. Gurjanov A.V., Korobeynikov A.G., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Edge, fog and cloud computing in the cyber-physical systems networks // *Proc. of the III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021)*. 2021. P. 103–108. <https://doi.org/10.47813/dnit-mip3/2021-2899-103-108>
14. Korobeynikov A.G., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Cyber-physical and human control of technological process and equipment sensitive to failures // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 839. P. 42081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042081>
15. Astakhova T., Verzun N., Kolbanov M., Shamin A. A model for estimating energy consumption seen when nodes of ubiquitous sensor networks communicate information to each other // *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. V. 2344.
16. Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Load management in computer networks as a tool to ensure the quality of service delivery // *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2021. P. 9470535. <https://doi.org/10.1109/weconf51603.2021.9470535>
17. Biryaltsev E.V., Galimov M.R., Demidov D.E., Elizarov A.M. The platform approach to research and development using high-performance computing // *Program Systems: Theory and Applications*. 2019. V. 10. N 2(41). P. 93–119. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2019-10-2-93-119>
18. Kazimirov A.N. Model-oriented design of a wireless sensor network // *Proc. of the 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*. 2020. P. 391–398. <https://doi.org/10.1109/glosic50886.2020.9267874>
19. Rahman P.A. Advanced reliability model of the fault-tolerant disk arrays with data striping and single disk redundancy // *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*. 2017. P. 20–25.
20. Rahman P.A. Advanced reliability model of the fault-tolerant disk arrays with the Dual disk redundancy and data striping // *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*. 2017. P. 40–49.
21. Uspenskaya N.N. Estimation of availability factor for the data storage systems based on redundant disk arrays with the backup // *High-Performance and Fault-Tolerant Computing technologies and systems: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*. 2016. P. 20–23.
22. Sharipov M.I. Simplified reliability model of the fault-tolerant disk arrays with data striping and single disk redundancy on basis of the Markov birth-death chain // *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2017. P. 15–19.
23. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability and timeliness of servicing requests in infocommunication systems, taking into account the physical and information recovery of redundant storage devices // *Proc. of the 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*. 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976800>
24. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability of computer systems during physical and informational recovery of duplicated memory // *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. V. 3057. P. 274–279.
25. Bogatyrev V.A., Derkach A.N. Evaluation of a cyber-physical computing system with migration of virtual machines during continuous computing // *Computers*. 2020. V. 9. N 2. P. 42. <https://doi.org/10.3390/computers9020042>
26. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
11. Tatarnikova A.A., Turlikov A.M., Pupynin D.A. The spectral analysis of data obtained from accelerometers for musculoskeletal diseases diagnosis. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2018, pp. 8604404. <https://doi.org/10.1109/weconf.2018.8604404>
12. Markoval E., Moltchanov D., Pirmagomedov R., Ivanova D., Koucheryav Y., Samouylov K. Priority-based coexistence of eMBB and URLLC traffic in industrial 5G NR deployments. *Proc. of the 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2020, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/icumt51630.2020.9222433>
13. Gurjanov A.V., Korobeynikov A.G., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Edge, fog and cloud computing in the cyber-physical systems networks. *Proc. of the III International Workshop on Modeling, Information Processing and Computing (MIP: Computing-2021)*, 2021, pp. 103–108. <https://doi.org/10.47813/dnit-mip3/2021-2899-103-108>
14. Korobeynikov A.G., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Zharinov O.O. Cyber-physical and human control of technological process and equipment sensitive to failures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 839, pp. 42081. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042081>
15. Astakhova T., Verzun N., Kolbanov M., Shamin A. A model for estimating energy consumption seen when nodes of ubiquitous sensor networks communicate information to each other. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, vol. 2344.
16. Tatarnikova T.M., Poymanova E.D. Load management in computer networks as a tool to ensure the quality of service delivery. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2021, pp. 9470535. <https://doi.org/10.1109/weconf51603.2021.9470535>
17. Biryaltsev E.V., Galimov M.R., Demidov D.E., Elizarov A.M. The platform approach to research and development using high-performance computing. *Program Systems: Theory and Applications*, 2019, vol. 10, no. 2(41), pp. 93–119. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2019-10-2-93-119>
18. Kazimirov A.N. Model-oriented design of a wireless sensor network. *Proc. of the 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)*, 2020, pp. 391–398. <https://doi.org/10.1109/glosic50886.2020.9267874>
19. Rahman P.A. Advanced reliability model of the fault-tolerant disk arrays with data striping and single disk redundancy. *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*, 2017, pp. 20–25.
20. Rahman P.A. Advanced reliability model of the fault-tolerant disk arrays with the Dual disk redundancy and data striping. *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*, 2017, pp. 40–49.
21. Uspenskaya N.N. Estimation of availability factor for the data storage systems based on redundant disk arrays with the backup. *High-Performance and Fault-Tolerant Computing technologies and systems: Proc. of the International Scientific and Practical Conference*, 2016, pp. 20–23.
22. Sharipov M.I. Simplified reliability model of the fault-tolerant disk arrays with data striping and single disk redundancy on basis of the Markov birth-death chain. *Advances in Fault-Tolerance and Reliability Models of the Redundant Disk Arrays: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, 2017, pp. 15–19.
23. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability and timeliness of servicing requests in infocommunication systems, taking into account the physical and information recovery of redundant storage devices. *Proc. of the 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976800>
24. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Reliability of computer systems during physical and informational recovery of duplicated memory. *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, vol. 3057, pp. 274–279.
25. Bogatyrev V.A., Derkach A.N. Evaluation of a cyber-physical computing system with migration of virtual machines during continuous computing. *Computers*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 42. <https://doi.org/10.3390/computers9020042>
26. Polovko A.M., Gurov S.V. *Fundamental Theory of Reliability*. St.Petersburg, BHV Publ., 2006, 702 p. (in Russian)

Авторы

Богатырев Владимир Анатольевич — доктор технических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, [sc 7006571069](https://orcid.org/0000-0003-0213-0223), <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>, vladimir.bogatyrev@gmail.com

Богатырев Станислав Владимирович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер-консультант, ООО «Центр разработки облачных хранилищ Ядро», Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация, [sc 57183002200](https://orcid.org/0000-0003-0836-8515), <https://orcid.org/0000-0003-0836-8515>, realloc@gmail.com

Богатырев Анатолий Владимирович — кандидат технических наук, инженер-консультант, ООО «Центр разработки облачных хранилищ Ядро», Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация, [sc 56549712700](https://orcid.org/0000-0001-5447-7275), <https://orcid.org/0000-0001-5447-7275>, gangleon@gmail.com

Authors

Vladimir A. Bogatyrev — D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, 197101, Russian Federation; Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 190000, Russian Federation, [sc 7006571069](https://orcid.org/0000-0003-0213-0223), <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>, vladimir.bogatyrev@gmail.com

Stanislav V. Bogatyrev — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Consulting Engineer, Yadro Cloud Storage Development Center, Saint Petersburg, 195027, Russian Federation, [sc 57183002200](https://orcid.org/0000-0003-0836-8515), <https://orcid.org/0000-0003-0836-8515>, realloc@gmail.com

Anatoly V. Bogatyrev — PhD, Consulting Engineer, Yadro Cloud Storage Development Center, Saint Petersburg, 195027, Russian Federation, [sc 56549712700](https://orcid.org/0000-0001-5447-7275), <https://orcid.org/0000-0001-5447-7275>, gangleon@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 03.03.2023
Одобрена после рецензирования 11.03.2023
Принята к печати 23.05.2023*

*Received 03.03.2023
Approved after reviewing 11.03.2023
Accepted 23.05.2023*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627

УДК 539.3+624.046.3+004.94

Анализ устойчивости ортотропной цилиндрической оболочечной конструкции в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL

Дмитрий Сергеевич Петров¹, Алексей Александрович Семенов²✉

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация

¹ gsm1990@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4730-3469>

² sw.semenov@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>

Аннотация

Введение. Большепролетные оболочечные конструкции широко используют в различных областях промышленности. Для обеспечения безопасных режимов их работы возникает необходимость разработки расчетных методик и исследования оболочечных конструкций на устойчивость под действием прикладываемой нагрузки. Традиционно эти данные получают с использованием аналитических и полуаналитических методов. Описан процесс определения критических нагрузок потери устойчивости и получения зависимостей «нагрузка–прогиб» с учетом больших деформаций. Предложена методика анализа устойчивости ортотропных оболочечных конструкций на основе функциональных возможностей конечноэлементных программных комплексов. **Метод.** Расчетная модель цилиндрической оболочечной конструкции представлена на основе метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL 2020. Проведены вычислительные эксперименты и сравнение устойчивости конструкций из различных материалов: сталь С345, оргстекло (полиметилметакрилат), углепластик М60J/Ероху, стеклопластик Т-10/УПЭ22-27. **Основные результаты.** Показано, что программный комплекс ANSYS Mechanical APDL 2020 позволяет получить необходимые данные для построения зависимостей «нагрузка–прогиб». Для анализа больших деформаций комплекс можно использовать только при достаточно детальном описании параметров расчета и сделанных допущений для разных материалов. Получены значения критической равномерно распределенной нагрузки. Представлены графики зависимости прогиба от нагрузки. Исследован процесс деформирования с учетом геометрической нелинейности и собственного веса оболочечных конструкций. **Обсуждение.** Результаты расчетов могут быть применены для автоматизации расчетов оболочечных конструкций как альтернатива аналитическим методам.

Ключевые слова

цилиндрическая оболочка, ортотропный материал, устойчивость, метод конечных элементов, ANSYS, геометрическая нелинейность, пошаговое приложение нагрузки, критическая нагрузка

Ссылка для цитирования: Петров Д.С., Семенов А.А. Анализ устойчивости ортотропной цилиндрической оболочечной конструкции в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 618–627. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627

Buckling analysis of an orthotropic cylindrical shell structure in the ANSYS Mechanical APDL software package

Dmitriy S. Petrov¹, Alexey A. Semenov²✉

^{1,2} Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation

¹ gsm1990@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4730-3469>

² sw.semenov@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>

Abstract

Long-span shell structures are widely used in various industries. To ensure safe modes of operation, it becomes necessary to develop calculation methods and study shell structures for buckling under the applied load. Traditionally, these data are

© Петров Д.С., Семенов А.А., 2023

obtained using analytical and semi-analytical methods. This paper presents a description of the process of determining the critical buckling loads and obtaining the “load-deflection” dependences, taking into account large deformations. For this purpose, a method for analyzing the buckling of orthotropic shell structures based on the functionality of finite element software systems is proposed. The computational model of a cylindrical shell structure is presented based on the finite element method in the ANSYS Mechanical APDL 2020 software package. Computational experiments and a comparison of the buckling of structures made of various materials were carried out: steel S345, plexiglass (PMMA), CFRP M60J/Epoxy, GFRP T-10/UPE22-27. It is shown that the ANSYS Mechanical APDL 2020 software package makes it possible to obtain the necessary data for obtaining the “load-deflection” dependencies. For the analysis of large deformations, it can be used only with a sufficiently detailed description of the calculation parameters and the assumptions made for different materials. The values of the critical uniformly distributed load are obtained. Graphs of the dependence of the deflection on the load are presented. The process of deformation is studied, taking into account the geometric nonlinearity and the self-weight of shell structures. The calculation results can be used to automate the calculations of shell structures as an alternative to analytical methods.

Keywords

cylindrical shell, orthotropic material, buckling, finite element method, ANSYS, geometric nonlinearity, step-by-step load application, critical buckling load

For citation: Petrov D.S., Semenov A.A. Buckling analysis of an orthotropic cylindrical shell structure in the ANSYS Mechanical APDL software package. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 618–627 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627

Введение

Большепролетные оболочечные конструкции широко используют в различных областях промышленности, например, в строительстве. Благодаря особенностям формы и параметрам применяемых материалов, они позволяют перекрывать большие пространства при относительно низком расходе ресурсов. Существуют различные типы оболочек, применяемых на практике, например, в строительстве используются конические, сферические, цилиндрические, пологие двоякой кривизны, торообразные и другие.

Развитие современных технологий и достижения в различных областях науки и техники расширяют область применения тонкостенных конструкций, перекрывающих большие пространства. Такие конструкции должны выполняться из легкого материала, имеющего высокую прочность.

Оболочечные конструкции имеют специфическое пространственное напряженно-деформированное состояние (НДС) под действием нагрузки [1]. Повышенные требования к прочности и надежности при уменьшении материалоемкости создают проблемы анализа НДС тонкостенных элементов в зоне концентрации напряжений. В связи с этим одной из главных задач механики тонкостенных конструкций является совершенствование методов расчета и проектирования пластин и оболочек сложной формы и структуры [2] под различными видами нагрузок [3–8].

В некоторых случаях потеря устойчивости оболочечной конструкции происходит раньше, чем превышение внутренними напряжениями предельно допустимых значений, полученных при расчетах согласно исходной расчетной схеме.

В процессе увеличения нагрузки на оболочку ее поверхность деформируется. При достижении критического значения оболочечная конструкция может потерять устойчивость вследствие того, что перемещение точек поверхности переходит границу допустимых деформаций и скачкообразно увеличивается. В результате данного процесса реальная геометрическая форма конструкции под действием нагрузки перестает

соответствовать исходной расчетной схеме. Вследствие изменения расчетной схемы происходит перераспределение усилий, не соответствующее первоначальным расчетам. Концентрация напряжения в элементе может привести к превышению предела прочности материала и разрушить элемент, что повлечет за собой дальнейшие разрушения.

Таким образом, возникает необходимость исследования оболочечных конструкций на устойчивость и учета изменения геометрической формы под действием прикладываемой нагрузки.

Современные программные комплексы на основе метода конечных элементов позволяют проводить исследования различных конструкций. На практике наиболее часто используются программные комплексы NASTRAN [9, 10], ABAQUS [11–13], ANSYS [14, 15].

Одним из наиболее распространенных типов оболочечной конструкции, применяемых в строительной отрасли, является цилиндрическая оболочка. Это обусловлено ее конструктивными, монтажными и эксплуатационными преимуществами [16].

В последнее время все чаще применяются оболочечные конструкции, выполненные из композиционных материалов [17–21].

Целью данной работы является апробация методики исследования устойчивости и НДС цилиндрической оболочечной конструкции, выполненной из ортотропного материала, под действием распределенных нагрузок в программном комплексе ANSYS.

Материалы и методы

В качестве метода исследования в работе принят метод вычислительного эксперимента с помощью функциональных возможностей программного комплекса ANSYS Mechanical APDL 2020 (ANSYS 2020). Вычислительное ядро комплекса базируется на методе конечных элементов.

С точки зрения вычислительной математики, идея метода конечных элементов заключается в минимизации функционала вариационной задачи. Задача осуществлена на совокупности функций, каждая из кото-

рых определена на своей подобласти, что соответствует одной из конкретных ветвей диакоптики — общего метода исследования систем путем их расчленения [5]. Для моделирования и расчета тонкостенных оболочечных конструкций в ANSYS 2020 использованы элементы категории SHELL, которые учитывают такие внутренние силовые факторы, как мембранное растяжение–сжатие и изгиб [6, 22–26].

Форму конструкции зададим геометрически, по точкам, с помощью встроенных инструментов программного комплекса. Сформированную геометрическую модель оболочечной конструкции разделим на сетку конечных элементов и выберем тип элемента Shell 181. Данный элемент оболочки с конечными деформациями имеет четыре узла, в каждом из которых определены шесть степеней свободы, и позволяет учитывать полный набор нелинейных эффектов, включая большие деформации [6].

Сетка конечных элементов выбрана регулярной. Элементы имеют прямоугольную форму. Создадим связи элементов, соответствующие выбранному способу закрепления контура конструкции. Зададим нагрузку от собственного веса и прикладываемые внешние нагрузки.

Выполним расчет конструкции по следующему алгоритму:

- расчет усилий в конструкции от единичной силы (Static), с учетом малых перемещений (Small Displacement Static);
- расчет коэффициента собственного значения устойчивости конструкции (Eigenvalue Buckling);
- расчет усилий в конструкции от силы, умноженной на полученный коэффициент (Static), с учетом больших перемещений (Large Displacement Static) и анализа поведения конструкции;
- подбор нагрузки, при которой конструкция теряет устойчивость, путем поэтапного увеличения прикладываемой нагрузки и расчета усилий в конструкции (Static), с учетом больших перемещений (Large Displacement Static) и анализа поведения конструкции по графику нагрузка–перемещение.

Результаты исследования

Модель цилиндрической оболочки. Рассмотрим цилиндрические панели толщиной h , находящиеся под действием внешней равномерно распределенной поперечной нагрузки и шарнирно закрепленные по всему контуру (рис. 1). Данный вид оболочек широко применяется в строительстве. Срединную поверхность оболочки примем за координатную.

Для проведения вычислительных экспериментов выберем цилиндрическую панель с параметрами: протяженностью $a = 16$ м, радиусом кривизны $R_2 = 16$ м, толщиной $h = 0,08$ м, углом разворота $b = 1$ рад ($57^\circ 18'$). Расчеты выполним для четырех материалов: стали С345, оргстекла (полиметилметакрилат, ПММА), углепластика М60J/Ероху, стеклопластика Т-10/УПЭ22-27.

Создадим компьютерную модель с помощью инструментов проектирования в конечно-элементном программном комплексе ANSYS 2020.

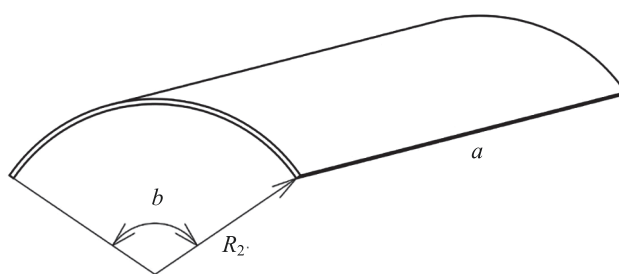


Рис. 1. Схематичное изображение панели цилиндрической оболочки

Fig. 1. Schematic representation of a cylindrical shell panel

Для конечных элементов конструкции зададим параметры физического нагружения от ускорения свободного падения: назовем плотность материала, из которого состоит оболочечная конструкция, и значение ускорения свободного падения. Настроим тип расчета: выберем расчет с учетом больших перемещений и математический инструмент расчета — метод длины дуги. Данные параметры позволят произвести анализ НДС оболочечной конструкции с учетом геометрической нелинейности.

Пошагово добавим нагрузку, позволив программному комплексу рассчитать напряжения в конструкции и перемещения узлов элементов отдельно для каждого шага нагружения. Для выполнения пошагового расчета зададим общий шаг нагружения, равный единице. Таким образом, получим, что максимальное значение нагружения рассчитываемой конструкции равно приложенной на оболочку нагрузке. Назначим количество подшагов: для получения значений расчета в каждом шаге (доля значения прикладываемой на оболочечную конструкцию нагрузки в рамках одного шага). Значение количества подшагов подберем вручную, с целью уточнения промежуточных, полученных в результате расчета, значений перемещений анализируемых узлов. В результате значение количества подшагов в проведенном расчетном эксперименте принято равным 150.

В начале расчета приложим нагрузку, превышающую несущую способность оболочечной конструкции. По результатам расчетов в программном комплексе проведем анализ величины нагрузки, при которой конструкция теряет устойчивость. Исходную приложенную нагрузку зададим равной нагрузке потери устойчивости. Повторно выполним расчет — получим значения перемещений узлов оболочечной конструкции до и во время потери устойчивости. Корректируя количество подшагов, подберем точность определения поведения оболочечной конструкции в условиях потери устойчивости.

В зависимости от варианта расчета конечно-элементной модели присвоим значения материала в соответствии с табл. 1. Волокна ортотропных материалов, обладающих наибольшим модулем Юнга, направлены в поперечном направлении, формируя конструкцию условной арки.

Полученную геометрическую модель оболочечной конструкции разделим на сетку конечных элементов 16×32 (обоснование данного выбора будет приведен

Таблица 1. Параметры материалов

Table 1. Material parameters

Характеристика	Изотропный материал		Ортотропный материал	
	Сталь С345	Оргстекло (ПММА)	Углепластик М60J/Ероху [27]	Стеклопластик Т-10/УПЭ22-27 [28]
Модуль упругости E_1 , МПа	$2,1 \cdot 10^5$	$0,03 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^5$	$0,294 \cdot 10^5$
Модуль упругости E_2 , МПа	$2,1 \cdot 10^5$	$0,03 \cdot 10^5$	$0,59 \cdot 10^4$	$1,78 \cdot 10^4$
Коэффициент Пуассона μ_{12}	0,3	0,35	0,32	0,123
Плотность ρ , кг/м ³	7800	1190	1500	1800

подразделе «Результаты вычислительного эксперимента» при расчете конструкции из стали С345). В качестве исходных нагрузок, для учета собственного веса конструкции, зададим параметр гравитации: ускорение свободного падения по вертикальной оси Z (глобальная система координат). Для ускорения свободного падения примем значение 9,8065 Н/кг.

Результаты вычислительного эксперимента.

В результате проведения вычислительного эксперимента получены данные о потере устойчивости и, в одном случае, прочности цилиндрических оболочечных конструкций. Анализ поведения проведен на основе значений прикладываемой к поверхности равномерной распределенной нагрузки и перемещения характерных узловых точек оболочечной конструкции: узла в центре ($x = a/2, y = b/2$) и узла в четверти конструкции ($x = a/4, y = b/4$).

В соответствии с табл. 1 сформированы и рассчитаны четыре модели цилиндрических оболочек, имеющих одинаковые геометрические параметры, но выполненные из различных материалов.

Модель цилиндрической оболочки, выполненной из изотропного материала (сталь С345). Пошагово повысим значение приложенной равномерно распределенной нагрузки (q) по поверхности оболочки до 0,8 МПа. Этапы увеличения нагрузки приведены на рис. 2 — график зависимости «нагрузка–прогиб».

По графику в центре конструкции (рис. 2), видно, что при нагрузке до 0,4 МПа перемещение исследуемых узлов носит практически линейный характер.

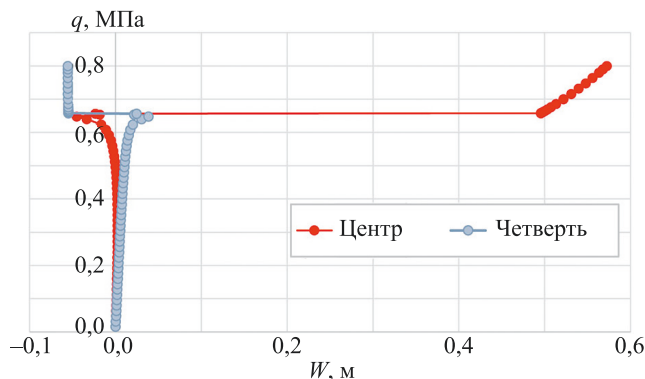


Рис. 2. График «нагрузка–прогиб» для конструкции из материала Сталь С345

Fig. 2. Graph “load-deflection” for a structure made of Steel S345 material

При дальнейшем увеличении нагрузки коэффициент наклона касательной к графику начинает интенсивно меняться. При достижении значения 0,6562 МПа выбранные узлы получают скачкообразное перемещение, исходя из чего можно сделать вывод о потере конструкцией устойчивости.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к увеличению перемещения точек и последующему разрушению конструкции. При этом направления перемещения выбранных узлов на первом этапе нагружения постепенно смещаются в противоположные направления. При потере устойчивости перемещение узлов носит скачкообразный характер, а затем постепенно узлы начинают смещаться в одном направлении — вся конструкция проседает вниз под действием возрастающей распределенной нагрузки.

Выполним анализ влияния выбора разбиения области конструкции конечными элементами на получаемые значения критических нагрузок.

В результате получим, что для малого числа конечных элементов (4×8) значение критической нагрузки получить не удалось (вычислительный процесс прерывается раньше). При увеличении числа элементов значение критической нагрузки достигается, а кривые зависимостей «нагрузка–прогиб» носят схожий характер, аналогичный представленному на рис. 2. При выборе сеток элементов $8 \times 16, 16 \times 32, 32 \times 64, 64 \times 128$ значения критической нагрузки потери устойчивости имеют уже близкие значения (0,729, 0,656, 0,634, 0,641 МПа соответственно), что позволяет для дальнейших расчетов конструкций данного вида выбрать сетку элементов 16×32 .

Отметим, что закритическое поведение цилиндрических панелей (т. е. после потери устойчивости) при выборе разных сеток разбиения в ряде случаев значительно различалось.

На рис. 3, а представлен результат приложения нагрузки в 0,6562 МПа для стали С345. Замечен существенный прогиб центральной части оболочки, образовавшийся в результате потери устойчивости. Поле интенсивности распределения внутренних напряжений в оболочечной конструкции после потери устойчивости, в момент приложения нагрузки 0,6562 МПа, показан на рис. 3, б.

Модель цилиндрической оболочки, выполненной из изотропного материала (оргстекло (ПММА)). Повысим значение приложенной равномерно распределенной нагрузки до 0,011 МПа. Согласно графику

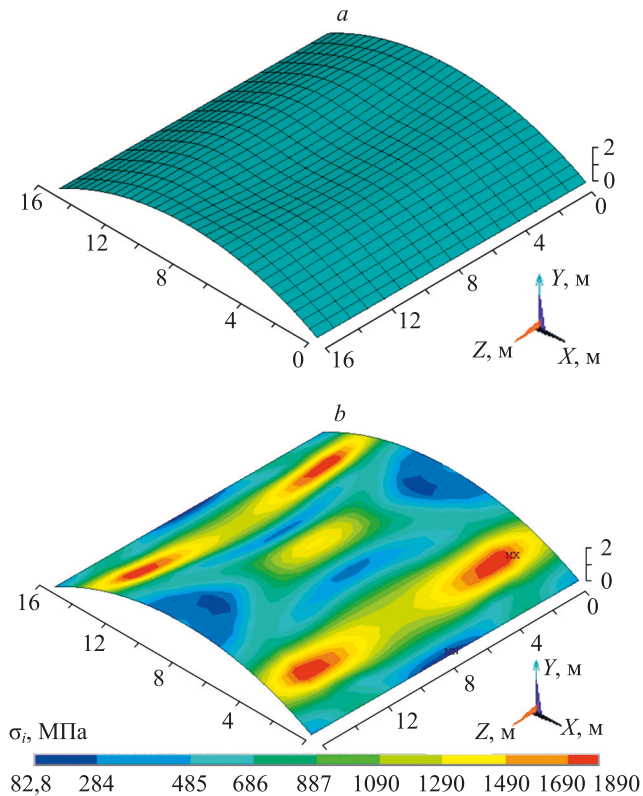


Рис. 3. Схема деформирования при нагрузке 0,6562 МПа (а) и поле интенсивности напряжений (б) для оболочки из стали С345

Fig. 3. Deformation scheme at 0.6562 MPa load (a) and stress intensity field (b) for the Steel S345 shell

зависимости «нагрузка–прогиб» (рис. 4) при нагрузке до 0,002 МПа перемещение исследуемых узлов носит практически линейный характер.

При дальнейшем увеличении нагрузки видно, что коэффициент наклона касательной к графику начинает интенсивно меняться. При достижении значения 0,0105 МПа выбранные узлы получают скачкообразное

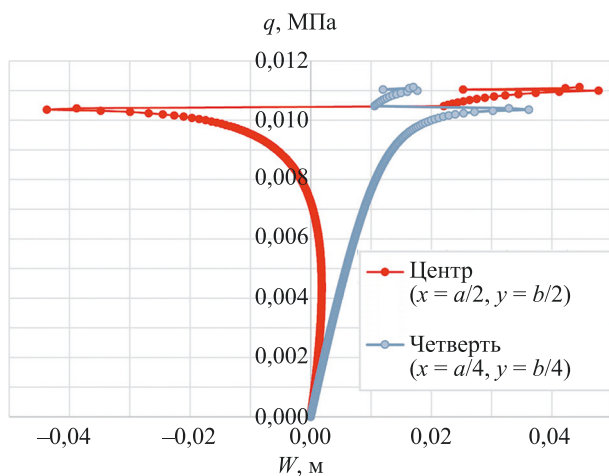


Рис. 4. График «нагрузка–прогиб» для конструкции из оргстекла (ПММА)

Fig. 4. “Load–deflection” dependence for the panel of plexiglass shell (PMMA)

перемещение, исходя из чего можно сделать вывод о потере конструкцией устойчивости.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к увеличению перемещения точек и последующему разрушению. На графиках можно увидеть, что при увеличении действующей нагрузки узлы в центре оболочечной конструкции и в ее четверти имеют в проекции на вертикальную ось разнонаправленное движение. После потери устойчивости происходит скачкообразное перемещение, и затем направление движения совпадает — узлы смещаются вниз, по направлению действия силы тяжести и приложенной нагрузки. Таким образом, график, полученный в результате вычислительного эксперимента, подтверждает ситуацию, реализуемую на практике: при увеличении нагрузки конструкция прогибается вниз.

На рис. 5, а представлен результат приложения нагрузки в 0,0105 МПа. Заметен седлообразный вид деформации конструкции: два прогиба сбоку от центральной части оболочки и выгиб вверх центральной части оболочки, образовавшиеся в результате потери устойчивости. Поле интенсивности напряжений при приложении нагрузки 0,0105 МПа показано на рис. 5, б.

Модель цилиндрической оболочки, выполненной из ортотропного материала (углепластик М60J/Ероху). Увеличим значение приложенной равномерно распре-

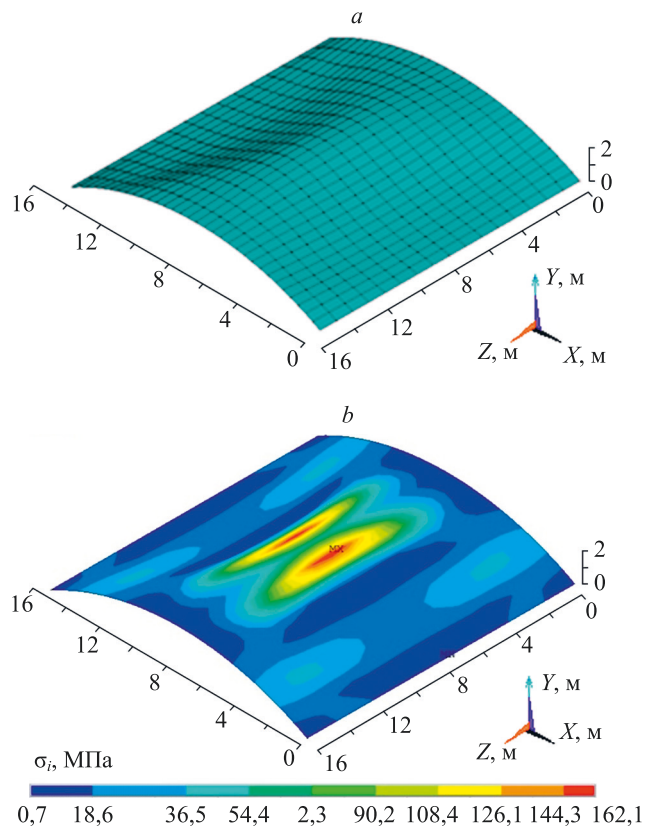


Рис. 5. Схема деформирования при нагрузке 0,0105 МПа (а) и поле интенсивности напряжений (б) для оболочки из оргстекла (ПММА)

Fig. 5. Deformation scheme at 0.0105 MPa load (a) and stress intensity field (b) for plexiglass shell (PMMA)

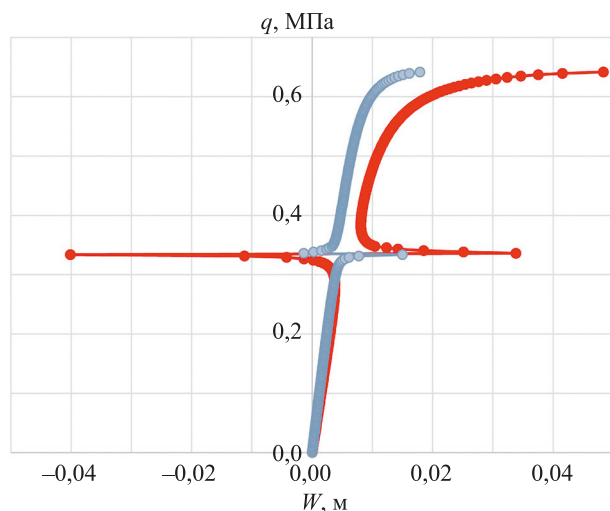


Рис. 6. График «нагрузка–прогиб» для конструкции из углепластика М60J/Эпоxy

Fig. 6. “Load – deflection” dependence for the panel of CFRP M60J/Epoxy

деленной нагрузки до 0,642 МПа. Согласно графику зависимости «нагрузка–прогиб» (рис. 6), при нагрузке до 0,26 МПа перемещение исследуемых узлов носит линейный характер.

При дальнейшем увеличении нагрузки характер графика интенсивно меняется. При достижении значения 0,3151 МПа выбранные узлы получают скачкообразное перемещение, исходя из чего можно сделать вывод о потере конструкцией устойчивости. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к увеличению перемещения точек и последующему разрушению конструкции, при этом направление перемещения для центрального узла после потери устойчивости меняется на противоположное, а для узла четверти сохраняется.

Рассмотрим результаты приложения нагрузки в моменты времени 0,99 и 1,00 при величине нагрузки в 0,64 МПа. В момент времени 0,99 (рис. 7, а) оболочка начинает разрушение в соответствии с ортотропными свойствами материала: в поперечном направлении формируются арки жесткости, в продольном направлении происходит разнонаправленное смещение узлов, произошедшее в результате потери устойчивости. В момент времени 1,00 (рис. 7, b) можно наблюдать разрушение оболочечной конструкции.

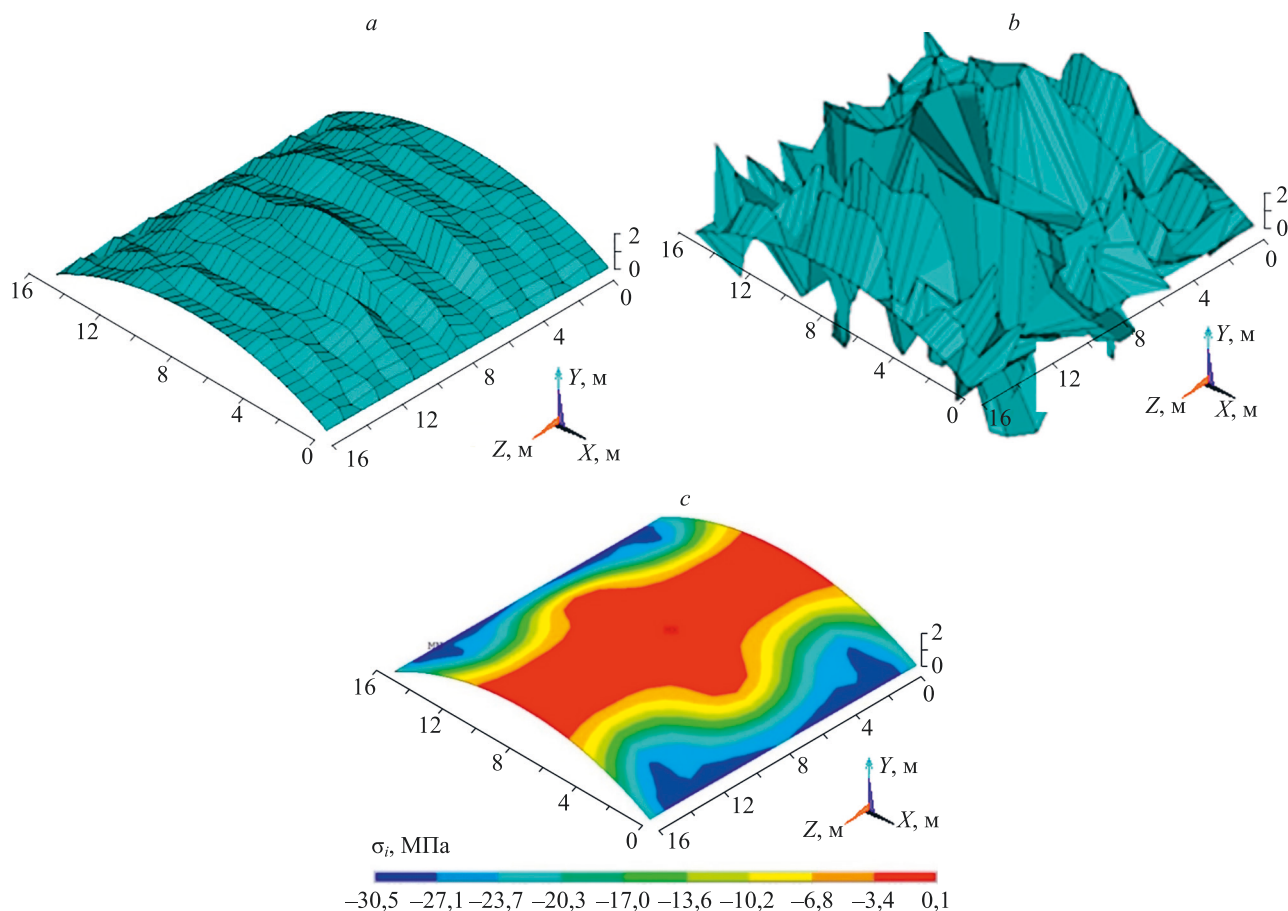


Рис. 7. Схема деформирования при нагрузке 0,64 МПа в моменты времени 0,99 (а) и 1,00 (b) и поле интенсивности напряжений (с) для оболочки из углепластика М60J/Эпоxy

Fig. 7. The scheme of deformation at a load of 0.64 MPa at times 0.99 (a) and 1.00 (b) and the stress intensity field (c) for the shell of carbon fiber M60J/Epoxy

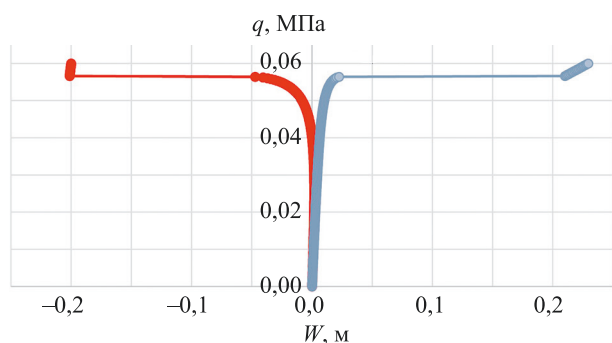


Рис. 8. График «нагрузка–прогиб» для конструкции из стеклопластика Т-10/УПЭ22-27

Fig. 8. “Load – deflection” dependence for the panel of GFRP T-10/UPE22-27

Поле интенсивности внутренних напряжений, возникающих в оболочечной конструкции в момент времени 0,99 показано на рис. 7, с.

Модель цилиндрической оболочки, выполненной из ортотропного материала (стеклопластик Т-10/УПЭ22-27). Повысим значение приложенной равномерно распределенной нагрузки до 0,060 МПа. Согласно графику зависимости «нагрузка–прогиб» (рис. 8), перемещение исследуемых узлов носит линейный характер при нагрузке до 0,03 МПа.

При дальнейшем увеличении нагрузки кривизна графика увеличивается. При достижении значения 0,0571 МПа центральный узел и узел в четверти получают скачкообразное перемещение, исходя из чего можно сделать вывод о потере устойчивости оболочечной конструкции.

Дальнейшее повышение нагрузки приводит к увеличению перемещения точек и последующему разрушению конструкции. При этом направление перемещения для центрального узла после потери устойчивости меняется на противоположное, а для узла четверти сохраняется.

На рис. 9, а представлен результат приложения распределенной нагрузки в 0,0571 МПа. При деформации конструкция приобретает седлообразный вид: два прогиба сбоку от центральной части оболочки, и выгиб вверх центральной части оболочки образовавшиеся в результате потери устойчивости. Поле интенсивности напряжений при приложении нагрузки 0,0571 МПа показано на рис. 9, b.

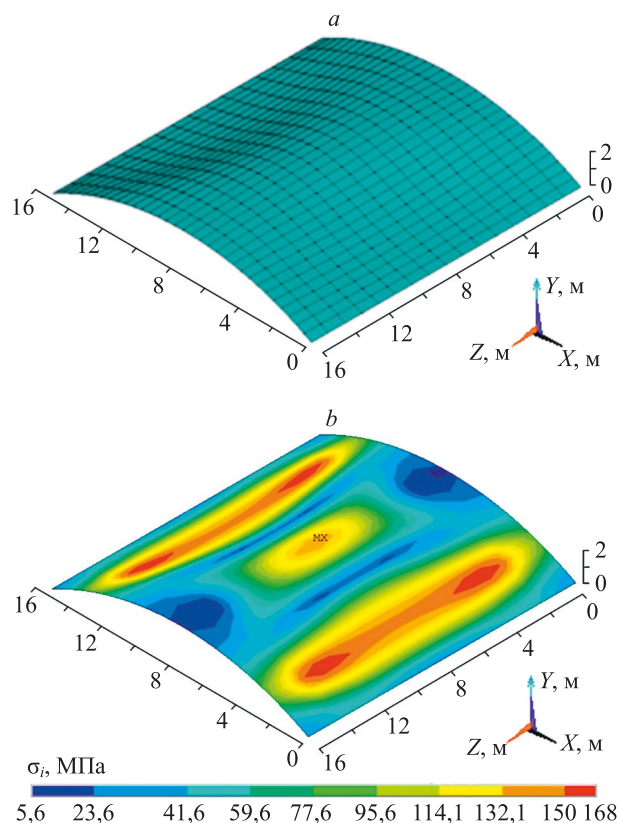


Рис. 9. Схема деформирования при нагрузке 0,0571 МПа (a) и поле интенсивности напряжений (b) для оболочки из стеклопластика Т-10/УПЭ22-27

Fig. 9. Scheme of deformation at a load of 0.0571 MPa (a) and the stress intensity field (b) for the fiberglass shell T-10/UPE22-27

В табл. 2 показаны значения нагрузок потери устойчивости q_{cr} , значения прогибов и интенсивности напряжений, выявленные при максимальной расчетной нагрузке. Значение максимальной расчетной нагрузки подобрано в процессе эксперимента. Около данного значения оболочечная конструкция теряет устойчивость, стремясь к ней, но не доходя до нее. Значение нагрузки подбирается итерационно, как можно ближе к критической нагрузке. Как видно из полученных данных, для оболочек, выполненных из различных материалов, значения максимальных внутренних напряжений значительно различаются.

Таблица 2. Результаты расчетов

Table 2. Numerical results

Материал	q_{cr} , МПа	Максимальная расчетная нагрузка, МПа	Прогиб конструкции, м		Максимальное напряжение, МПа
			Центр ($x = a/2, y = b/2$)	Четверть ($x = a/4, y = b/4$)	
Сталь С345	0,6562	0,800	0,5725	0,0555	1892,0
Оргстекло (ПММА)	0,0105	0,011	0,0457	0,0372	144,0
Углепластик М60J/Эпоху	0,3151	0,642	0,0412	0,0156	3,4
Стеклопластик Т-10/УПЭ22-27	0,0571	0,060	0,2021	0,2715	168,0

Заключение и обсуждение

Проведенный вычислительный эксперимент с помощью функциональных возможностей программного комплекса ANSYS Mechanical APDL 2020 позволил проанализировать поведение цилиндрической оболочечной конструкции в процессе повышения приложенной нагрузки.

В соответствии с полученными результатами, можно сделать следующие выводы.

Предложенная методика исследования устойчивости и напряженно-деформированного состояния может быть использована для анализа процесса деформирования цилиндрических оболочечных конструкций, выполненных из различных материалов, под действием равномерно распределенной нагрузки.

При расчетах моделей всех вариантов выявлена потеря устойчивости цилиндрических оболочечных конструкций и получены значения критической равномерно распределенной нагрузки.

Программный комплекс ANSYS Mechanical APDL 2020 позволил получить необходимые данные для построения зависимостей «нагрузка–прогиб», однако, возникают сложности с получением значений в закритической области. Участки кривых после критической нагрузки существенно меняются при незначительных изменениях в параметрах расчета, например: при изменении сетки разбиения, шага по нагрузке и т. д. В связи с этим данный вопрос требует отдельного исследования. Исходя из этого, предложенный подход для анализа больших деформаций можно использовать только с достаточно детальным описанием параметров расчета и сделанных допущений.

Для всех рассматриваемых вариантов конструкций получены графики зависимости прогиба от нагрузки. Исследован процесс деформирования с учетом геометрической нелинейности и собственного веса оболочечных конструкций.

Результаты расчетов могут быть использованы для дальнейшего сравнения с результатами, полученными аналитическими и полуаналитическими методами.

Литература


1. Наширалиев Ж.Т., Каргаева А.Т. Трудности проектирования и строительства пространственных тонкостенных оболочек // *Academy*. 2019. № 1(40). С. 17–19.
2. Антипов А.А., Артемьева А.А., Баженов В.Г., Жестков М.Н., Кибец А.И. Численное моделирование задачи устойчивости перфорированных оболочек // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2015. № 1. С. 21–30. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.1.02>
3. Шклярчук Ф.Н. О задачах устойчивости упругих оболочек под действием гидростатического давления // *Материалы XXI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. 2015. С. 208–211.
4. Паймушин В.Н. О формах потери устойчивости цилиндрической оболочки при внешнем боковом давлении // *Материалы XXI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова*. 2015. С. 157–159.
5. Дубровин В.М., Бутина Т.А. Моделирование динамической устойчивости цилиндрической оболочки при действии осевой сжимающей нагрузки // *Математическое моделирование и численные методы*. 2015. № 2(6). С. 46–57.
6. Петров М.В., Федорова Т.Г., Гоник Е.Г. Экспериментальное исследование потери устойчивости тонкостенных оболочек при чистом изгибе // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2015. № 2(24). С. 119–125.
7. Бахтиева Л.У., Тазюков Ф.Х. Об устойчивости цилиндрической оболочки при осевом сжатии // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2015. № 1. С. 85–88.
8. Митрофанов О.В. Оценка устойчивости цилиндрических композитных оболочек при кручении с учетом использования гипотез модифицированной полубезмоментной теории // *Актуальные проблемы современной науки*. 2018. № 5(102). С. 267–271.
9. Ashok R.B., Srinivasa C.V., Suresh Y.J., Prema Kumar W.P. Buckling behaviour of cylindrical panels // *Nonlinear Engineering*. 2015. V. 4. N 2. P. 67–75. <https://doi.org/10.1515/nleng-2014-0019>
10. Li D., Qing G., Liu Y. A layerwise/solid-element method for the composite stiffened laminated cylindrical shell structures // *Composite Structures*. 2013. V. 98. P. 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.013>
11. Calladine C.R. Shell buckling, without ‘imperfections’ // *Advances in Structural Engineering*. 2018. V. 21. N 16. P. 2393–2403. <https://doi.org/10.1177/1369433217751585>


References

1. Nashiraliev Zh.T., Kargaeva A.T. Difficulties in designing and building spatial thin-walled shells. *Academy*, 2019, no. 1(40), pp. 17–19. (in Russian)
2. Antipov A.A., Artemyeva A.A., Bazhenov V.G., Zhestkov M.N., Kibec A.I. Numerical modelling of perforated shells stability. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 21–30. (in Russian). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.1.02>
3. Shkliarchuk F.N. On stability problems for elastic shells under hydrostatic pressure. *Proc. of the XXI International symposium «Dynamic and technological problems of a mechanics of constructions and continuous mediums» Dedicated to A.G. Gorshkov*, 2015, pp. 208–211. (in Russian)
4. Paimushin V.N. On the forms of stability loss of a cylindrical shell under external lateral pressure. *Proc. of the XXI International symposium «Dynamic and technological problems of a mechanics of constructions and continuous mediums» Dedicated to A.G. Gorshkov*, 2015, pp. 157–159. (in Russian)
5. Dubrov V.M., Butina T.A. Modeling of the dynamic stability of a cylindrical shell under the axial compressive load. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2015, no. 2(6), pp. 46–57. (in Russian)
6. Petrov M.V., Fedorova T.G., Gonic E.G. Experimental study of the buckling of thin-walled shells under pure bending. *Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*, 2015, no. 2(24), pp. 119–125. (in Russian)
7. Bakhtieva L.U., Tazyukov F.Kh. Stability of a cylindrical shell under axial compression. *Russian Aeronautics*, 2015, vol. 58, no. 1. pp. 106–111. <https://doi.org/10.3103/S1068799815010171>
8. Mitrofanov O.V. Estimation of the cylindrical composite shells stability in torsion, taking into account the use of hypotheses of the modified semi-membrane theory. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki*, 2018, no. 5(102), pp. 267–271. (in Russian)
9. Ashok R.B., Srinivasa C.V., Suresh Y.J., Prema Kumar W.P. Buckling behaviour of cylindrical panels. *Nonlinear Engineering*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 67–75. <https://doi.org/10.1515/nleng-2014-0019>
10. Li D., Qing G., Liu Y. A layerwise/solid-element method for the composite stiffened laminated cylindrical shell structures. *Composite Structures*, 2013, vol. 98, pp. 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.013>
11. Calladine C.R. Shell buckling, without ‘imperfections’. *Advances in Structural Engineering*, 2018, vol. 21, no. 16, pp. 2393–2403. <https://doi.org/10.1177/1369433217751585>
12. Blachut J. Buckling of externally pressurized steel toriconic shells. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2016, vol. 144, pp. 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.05.002>


12. Blachut J. Buckling of externally pressurized steel toriconical shells // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2016. V. 144. P. 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.05.002>
13. Feng K., Xu J. Buckling analysis of composite cylindrical shell panels by using Legendre polynomials hierarchical finite-strip method // *Journal of Engineering Mechanics*. 2017. V. 143. N 4. P. 04016121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001181](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001181)
14. Qu Y., Chen Y., Long X., Hua H., Meng G. A modified variational approach for vibration analysis of ring-stiffened conical-cylindrical shell combinations // *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2013. V. 37. P. 200–215. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2012.06.006>
15. Trushin S., Goryachkin D. Numerical evaluation of stress-strain state of bending plates based on various models // *Procedia Engineering*. 2016. V. 153. P. 781–784. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.242>
16. Petrov D., Semenov A. Buckling of cylindrical shell panels in ANSYS // *AIP Conference Proceedings*. 2020. V. 2315. N 1. P. 020032. <https://doi.org/10.1063/5.0036813>
17. Куимова Е.В., Труфанов Н.А. Численное прогнозирование эффективных термовязкоупругих характеристик однонаправленного волокнистого композита с вязкоупругими компонентами // *Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия*. 2009. № 4(70). С. 129–148.
18. Соловьев А.Н., Зиборов Е.Н., Шевцов С.Н. Определение упругих свойств армированных композиционных материалов на основе конечно-элементного моделирования // *Наука Юга России*. 2016. Т. 12. № 2. С. 3–10.
19. Советова Ю.В., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Многоуровневый подход к исследованию влияния объемного соотношения компонентов волокнистого однонаправленного углепластика на его механические характеристики // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2014. № 2(28). С. 77–89.
20. Трусов П.В., Швейкин А.И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. 605 с. <https://doi.org/10.15372/MULTILEVEL2019TPV>
21. Швейкин А.И., Шарифуллина Э.Р., Трусов П.В., Пушков Д.А. Об оценке чувствительности статистических многоуровневых моделей поликристаллических металлов к возмущениям параметров // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2018. Т. 11. № 2. С. 214–231. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2018.11.2.17>
22. Вольнин А.Р. Сравнительный расчет прочности и устойчивости подкрепленных оболочек в программных комплексах «Оболочка» и ANSYS // *Вестник гражданских инженеров*. 2010. № 2(23). С. 38–43.
23. Молчанов А.И., Молчанова Е.А. Решение инженерно-технических задач средствами ANSYS // *Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова*. 2012. № 1. С. 114–120.
24. Мануйлов Г.А., Косицын С.Б., Бегичев М.М. Исследования устойчивости упругих пластин и оболочек при помощи конечно-элементного моделирования // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2011. № 1. С. 58–65.
25. Баранова Д.А., Вольнин А.Л., Карпов В.В. Сравнительный анализ расчета прочности и устойчивости подкрепленных оболочек на основе ПК оболочка и ПК ANSYS // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика*. 2010. Т. 10. № 4. С. 23–27. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2010-10-4-23-27>
26. Колесников М.В. Численный анализ напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки при неоднородном в окружном направлении продольном сжатии // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2011. № 11-12(164-165). С. 66–72.
27. Смердов А.А., Буянов И.А., Чуднов И.В. Анализ оптимальных сочетаний требований к разрабатываемым углепластикам для крупногабаритных ракетно-космических конструкций // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2012. № 8. С. 70–77.
28. Тышкевич В.Н. Выбор критерия прочности для труб из армированных пластиков // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2011. № 5(78). С. 76–79.
13. Feng K., Xu J. Buckling analysis of composite cylindrical shell panels by using Legendre polynomials hierarchical finite-strip method. *Journal of Engineering Mechanics*, 2017, vol. 143, no. 4, pp. 04016121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001181](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001181)
14. Qu Y., Chen Y., Long X., Hua H., Meng G. A modified variational approach for vibration analysis of ring-stiffened conical-cylindrical shell combinations. *European Journal of Mechanics — A/Solids*, 2013, vol. 37, pp. 200–215. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2012.06.006>
15. Trushin S., Goryachkin D. Numerical evaluation of stress-strain state of bending plates based on various models. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 153, pp. 781–784. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.242>
16. Petrov D., Semenov A. Buckling of cylindrical shell panels in ANSYS. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2315, no. 1, pp. 020032. <https://doi.org/10.1063/5.0036813>
17. Kuimova E.V., Trufanov N.A. The numerical prediction of effective thermoviscoelastic properties of unidirectional fiber composite with the viscoelastic components. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2009, no. 4(70), pp. 129–148. (in Russian)
18. Soloviev A.N., Ziborov E.N., Shevtsov S.N. Determination of elastic properties of reinforced composite materials based on finite element modeling. *Science in the South Russia*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 3–10. (in Russian)
19. Sovetova Yu.V., Sidorenko Yu.N., Skripnyak V.A. The multilevel approach to studying the influence of the volumetric ratio in components of unidirectional carbon fiber composite on its mechanical properties. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 2014, no. 2(28), pp. 77–89. (in Russian)
20. Trusov P.V., Shveikin A.I. *Multilevel models of mono- and polycrystalline materials: theory, algorithms and applied examples*. Novosibirsk, SBRAS, 2019, 605 p. (in Russian). <https://doi.org/10.15372/MULTILEVEL2019TPV>
21. Shveikin A.I., Sharifullina E.R., Trusov P.V., Pushkov D.A. About estimation of sensitivity of statistical multilevel polycrystalline metal models to parameter variations. *Computational Continuum Mechanics*, 2018, vol. 11, no. 2, pp. 214–231. (in Russian). <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2018.11.2.17>
22. Volynin A.L. Comparative calculation of strength and stability of reinforced shells with PC Obolochka and PC ANSYS. *Bulletin of Civil Engineers*, 2010, no. 2(23), pp. 38–43. (in Russian)
23. Molchanov A.I., Molchanova E.A. Solution of engineering problems by means of ANSYS. *Vestnik Hkakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.F. Katanova*, 2012, no. 1, p. 114–120. (in Russian)
24. Manuylov G.A., Kositsyn S.B., Begichev M.M. The investigation of stability of elastic plates and shells with the help of FE modeling. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2011, no. 1, pp. 58–65. (in Russian)
25. Baranova D.A., Volynin A.L., Karpov V.V. The comparative analysis of calculation of durability and stability of the supported shells on the basis of the PC Obolochka and PC ANSYS. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 23–27. (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2010-10-4-23-27>
26. Kolesnikov M. Numerical strain-stress state analysis of cylindrical shell undergoing periodical in circumferential direction axial loading. *Visnyk Prydniprovs'koi derzhavnoi akademii' budivnytstva ta arhitektury*, 2011, no. 11-12(164-165), pp. 66–72. (in Russian)
27. Smerdov A.A., Buyanov I.A., Chudnov I.V. Analysis of optimal combinations of requirements to developed CFRP for large space-rocket designs. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2012, no. 8, pp. 70–77. (in Russian)
28. Tyshkevich V.N. Choice of the strength criterion for reinforced plastic pipes. *Izvestia VSTU*, 2011, no. 5(78), pp. 76–79. (in Russian)


Авторы

Петров Дмитрий Сергеевич — старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация,  57221258432, <https://orcid.org/0000-0002-4730-3469>, gsm1990@mail.ru

Семенов Алексей Александрович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация,  56460436800, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>, sw.semenov@gmail.com

Authors

Dmitriy S. Petrov — Senior Lecturer, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation,  57221258432, <https://orcid.org/0000-0002-4730-3469>, gsm1990@mail.ru

Alexey A. Semenov — PhD, Associate Professor, Head of Department, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation,  56460436800, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>, sw.semenov@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 10.01.2023
Одобрена после рецензирования 05.04.2023
Принята к печати 27.05.2023*

*Received 10.01.2023
Approved after reviewing 05.04.2023
Accepted 27.05.2023*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-628-634

УДК 654.16

Обоснование выбора технологии мобильного широкополосного доступа для построения сетей радиосвязи железнодорожного транспорта

Артём Сергеевич Медведев¹✉, Юрий Алексеевич Распаев²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² ООО «ТЕЛЕКОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

¹ art236960@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9445-5062>

² raspaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2497-876X>

Аннотация

Введение. Приведен анализ качества хэндовера в сетях радиосвязи высокоскоростного железнодорожного транспорта. Рассмотрены параметры модели, влияющие на вероятность успешного хэндовера. Представлен анализ возможности использования технологий сетей общего пользования Long-Term Evolution (LTE) и частной сети р-LTE в сетях радиосвязи железнодорожного транспорта. **Метод.** Анализ выполнен на основе аналитического метода, определяющего зависимость качества хэндовера от выбранного частотного диапазона и числа поднесущих сигнала Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM). **Основные результаты.** Рассмотрены и проанализированы возможные параметры сетей связи общего пользования, которые могут быть применены на железнодорожном транспорте. Показано, что текущие частотные диапазоны и параметры каналов сетей связи общего пользования российских операторов дают неудовлетворительные результаты для высокоскоростных поездов. Продемонстрировано, что при скорости поездов до 50 м/с (180 км/ч), ширина полосы сигнала LTE должна быть не менее 20 МГц для диапазона частот 800 МГц и не менее 5 МГц для 450 МГц. Рассмотрены и проанализированы параметры сетей р-LTE в диапазонах 1800 и 350 МГц, которые выделены для применения на железнодорожном транспорте. Показано, что для высокоскоростных поездов со скоростью до 70 м/с (252 км/ч), необходимо использовать диапазон не выше 350 МГц. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы для обоснования технических характеристик сети радиосвязи на железной дороге для поездов с разными скоростными режимами.

Ключевые слова

LTE, р-LTE, эффект Доплера, хэндовер, несущая частота, железнодорожный транспорт, вероятность успешного хэндовера

Ссылка для цитирования: Медведев А.С., Распаев Ю.А. Обоснование выбора технологии мобильного широкополосного доступа для построения сетей радиосвязи железнодорожного транспорта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 628–634. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-628-634

Justification of the choice of mobile broadband access technology for building radio communication networks of railway transport

Artem Sergeevich Medvedev¹✉, Yuri Alekseevich Raspaev²

¹ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² Telecom project, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

¹ art236960@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9445-5062>

² raspaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2497-876X>

Abstract

The analysis of handover quality in radio communication networks of high-speed railway transport is given. The parameters of the model that affect the probability of successful handover are considered. An analysis of the possibility of using technologies of public networks LTE and private network р-LTE in radio communication networks of railway

© Медведев А.С., Распаев Ю.А., 2023

transport is presented. The analysis is based on an analytical method that determines the dependence of the handover quality on the selected frequency range and the number of subcarriers of the OFDM signal. Possible parameters of public communication networks that can be applied in railway transport are considered and analyzed. It is shown that the current frequency ranges and channel parameters of public communication networks of Russian operators give unsatisfactory results for high-speed trains. It has been demonstrated that at train speeds up to 50 m/s (180 km/h), the bandwidth of the LTE signal should be at least 20 MHz for the frequency range of 800 MHz and at least 5 MHz for the frequency range of 450 MHz. The parameters of LTE bands 1800 and 350 MHz, which are allocated for use in railway transport, have been considered and analyzed. It is shown that for high-speed trains with speeds up to 70 m/s (252 km/h), it is necessary to use a range no higher than 350 MHz. The obtained results can be used to substantiate the technical characteristics of the radio communication network on the railway for trains with different speeds.

Keywords

LTE, p-LTE, Doppler effect, handover, carrier frequency, railway transport, probability of successful handover

For citation: Medvedev A.S., Raspaev Yu.A. Justification of the choice of mobile broadband access technology for building radio communication networks of railway transport. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 628–634 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-628-634

Введение

Современные системы технологической радиосвязи железнодорожного транспорта обеспечивают решение следующих задач: автоматизация контроля и управления движением, обеспечивающая повышение скоростей движения поездов и пропускной способности железных дорог; развитие систем контроля состояния инфраструктуры и подвижного состава; развитие систем оповещения и информирования пассажиров; координация движения подвижного состава. Для решения технологических задач железнодорожного транспорта необходимо построение глобальной системы радиосвязи с заданными характеристиками надежности и пропускной способности. В настоящее время Российские железные дороги используют сети радиосвязи на основе технологии GSM-R, которые обеспечивают передачу голосовой информации и низкоскоростных данных для основного парка железнодорожного транспорта, движущегося со скоростями до 100 км/ч (27 м/с). Для решения перспективных задач требуются технологии связи уровня Long-Term Evolution (LTE), обеспечивающие высокую пропускную способность до десятков Мбит/с и уверенный хэндовер при движении поезда со скоростью до 250 км/ч (70 м/с). Построение сети радиосвязи для целей железнодорожного транспорта возможно по двум вариантам: использование сетей связи общего пользования со стандартными частотами LTE и использование частных сетей p-LTE на выделенных частотах.

В условиях высоких скоростей движения поезда имеет место деградация качества связи по ряду причин: эффект Доплера, межсимвольная интерференция, снижение отношения сигнал/шум при отдалении от базовой станции [1]. Особенно сильно деградация связи происходит при хэндоверах (процедурах передачи активного соединения между сотами), когда связь прерывается или увеличивается количество повторов. По этой причине, для обеспечения непрерывной связи, необходимо найти решения, которые повысят вероятность хэндовера даже при высоких скоростях движения абонентской станции.

В современных научных работах приведены результаты разносторонних исследований условий и параме-

тров системы связи, влияющих на хэндовер. В работе [2] разработана имитационная модель в программной среде QualNet, с помощью которой изучены два параметра хэндовера — TTT (Time-To-Trigger, время срабатывания) и Hys (Hysteresis, эффект гистерезиса). Работа [3] посвящена оптимизации хэндоверов для LTE-сетей с помощью автоматической подстройки параметров TTT и запаса мощности с использованием методов нечеткой логики. В работе [4] разработана имитационная модель в программной среде MathCAD, позволяющая анализировать производительность хэндоверов абонентов между сотами в сети 4-го поколения мобильной связи LTE. В [5, 6] выполнен анализ влияния высокой скорости движения абонента на время начала хэндовера. Комплексное решение предложено в работе [7], где представлена модель вероятности успешного хэндовера, в зависимости от числа поднесущих в OFDM-символе, частоты несущей и скорости движения абонента.

В приведенных моделях рассмотрена скорость движения абонента не более 100 км/ч. Эта величина не достаточна для обеспечения непрерывности связи с высокоскоростными объектами, например, поезда.

Цель работы — поиск технологии и параметров сигнала, которые будут эффективны при скоростях движения абонента (поезда) до 250 км/ч. Под качеством связи будем понимать непрерывность связи, определяемой успешным выполнением процедуры хэндовера — передачи обслуживания абонента во время вызова или сессии передачи данных от одной базовой станции к другой.

Модель вероятности успешного хэндовера

Непрерывность связи во многом определяется успешным выполнением процедуры хэндовера. Рассмотрим известную модель вероятности успешного хэндовера [7]:

$$P_y = \prod_{i=0}^{M-1} \left[\sum_{j=1}^{N_i} (1 - [1 - Q(\sqrt{2}\gamma_b)]^{L_i})^{j-1} [1 - Q(\sqrt{2}\gamma_b)]^{L_i} \right], \quad (1)$$

$$\text{где } \gamma_b = \frac{1}{\log_2 K} \left(1 - \frac{1}{N^2} [N + 2Y] + \frac{NT_s}{\log_2 K} \left(\frac{1}{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right) - \text{среднее от-}$$

ношение энергии сигнала к мощности шума на длительность бита передаваемой информации,

$$Y = \sum_{j=1}^{N-1} (N-j) J_0(2\pi f_m T_s j), \quad N - \text{число поднесущих канала OFDM, } J_0 - \text{функция Бесселя нулевого порядка, } T_s - \text{продолжительность символа используемой схемы модуляции, переданного на поднесущей, } N_0 - \text{спектральная плотность гауссова шума, } E_b - \text{энергия сигнала, } K - \text{число бит в символе, } f_m = \frac{fV_m}{c} - \text{частота}$$

Доплера, V_m — скорость движения абонента, c — скорость света; $Q(\sqrt{2\gamma_b})$ — вероятность ошибки на бит; L_i — длина сообщения в битах; M — число управляющих сообщений; N_i — число повторов при передаче i -го сообщения хэндовера.

На основании анализа (1) можно сделать вывод, что значительное влияние на вероятность успешного хэндовера оказывает количество поднесущих N и частота несущей f . Это связано с тем, что при изменении частотного диапазона меняется затухание сигнала в свободном пространстве, а при изменении числа поднесущих, изменяется энергия сигнала. Также, с уменьшением несущей частоты, снижается влияние эффекта Доплера [8]. Целевое значение числа повторов должно стремиться к единице, потому что увеличение повторов снижает скорость передачи информации.

На рис. 1 представлена схема движения поезда вдоль базовых станций (БС), где показан вектор скорости волнового фронта электромагнитного излучения, вектор движения поезда и место совершения хэндовера. Из схемы видно, что на границе зон обслуживания БС1 и БС2 отношение сигнал шум $\left(\text{ОСИШ} \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \right)$ минимальный и составляет -80 дБм. Данный сигнал использован на границе зон обслуживания при проектировании базовых станций вдоль железнодорожных путей. Также на границе сот низкая модуляция QPSK

(Quadrature Phase Shift Keying/квадратурная фазовая манипуляция), применена при совершении хэндовера. Число бит в символе при данной модуляции равно 2. Таким образом, при отдалении от базовой станции уровень сигнала уменьшится, а модуляция снизится от высокой 64 QAM (64-ary Quadrature Amplitude Modulation/64-позиционная квадратурная амплитудная модуляция) к низкой. Алгоритмы LTE позволяют менять модуляцию автоматически в зависимости от уровня сигнала. При приближении к базовой станции уровень сигнала изменится от низкого к высокому, а модуляция от низкой к высокой. Чтобы связь не прерывалась, число повторов необходимо принять равным 1. Если взять большее число повторов, то хэндовер будет выполняться с задержкой, но это позволит повысить вероятность его успешного выполнения.

Модель (1) не имеет существенных ограничений и может применяться для систем связи железнодорожного транспорта. Модель является аналитической и отражает наиболее существенные параметры, влияющие на качество хэндовера, такие как скорость движения абонента, частота несущей, число поднесущих LTE-сигнала, число повторов. Модель адекватно реагирует на предельные значения скорости движения абонента (вероятность успешного хэндовера оказывается в нуле). Результаты моделирования [7] хорошо совпадают с результатами моделирования, полученными другими авторами. В работе [9] проведено исследование влияния скорости движения абонентов на интенсивность обрыва связи в сети LTE, где были получены следующие результаты: при несущей частоте более 1800 МГц сети LTE не способны поддерживать связь без обрывов при скорости движения абонентов более 30 м/с. В модели (1), при тех же данных, результат получен не более 35 м/с. В работе [4] разработана имитационная модель, в которой исследована вероятность позднего хэндовера в сетях LTE в зависимости от скорости движения абонента, при котором связь прерывается. Моделирование проведено при частоте 2100 МГц и ширине полосы 15 МГц. Результат показал, что связь прерываться не будет при данных параметрах при скорости движения абонента не более 70 км/ч (≈ 20 м/с). В аналитической модели (1) результат, при тех же параметрах, получен не более 25 м/с.

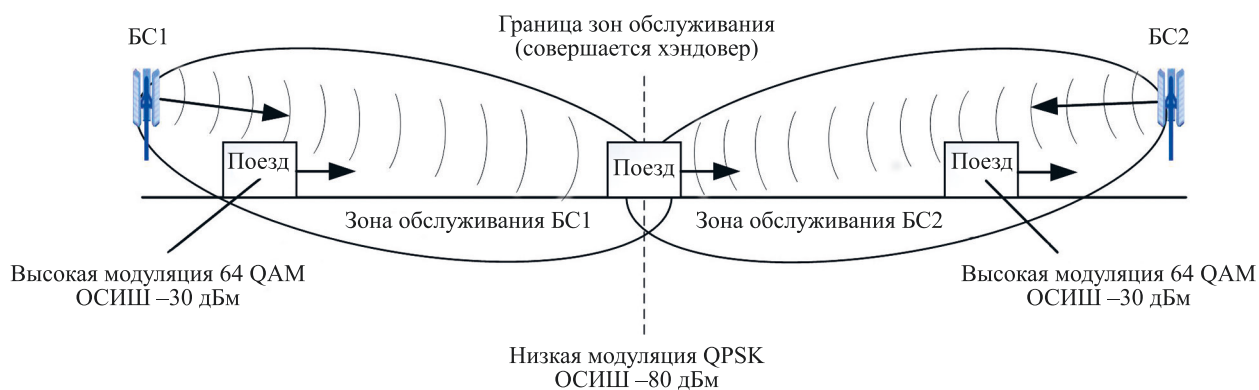


Рис. 1. Схема хэндовера для железной дороги

Fig. 1. Handover scheme for the railway

Таким образом, имеется основание полагать, что модель (1) является адекватной, понятной и удобной для работы, ее можно использовать для поиска параметров сигнала, достаточных для решения задачи обеспечения непрерывной связи при высоких скоростях движения поезда.

Построение сетей радиосвязи железнодорожного транспорта имеет некоторые особенности и отличия по сравнению с построением общих сетей мобильной связи. Прежде всего — это высокоскоростные среды. Железнодорожный транспорт работает в высокоскоростных средах, где поезда постоянно находятся в движении. Также сеть радиосвязи на железнодорожном транспорте должна быть высоконадежной, поскольку она используется для критически важных приложений, таких как управление поездами и обеспечение безопасности. Очень важно, чтобы связь не прерывалась на протяжении всего пути, в том числе и при совершении хэндовера.

Поскольку существующие сети связи российских операторов и сети р-LTE работают в диапазонах, которые существенно отличаются друг от друга, возникает необходимость сравнительного анализа и оценки возможности применения сетей различной принадлежности для высокоскоростного железнодорожного транспорта.

Анализ технологий сетей общего пользования

Рассмотрим параметры сигнала, на которых строятся сети LTE общего пользования российских операторов (табл. 1), где TDD (Time Division Duplex) — временной разнос входящего и исходящего канала, а FDD (Frequency Division Duplex) — частотный разнос входящего и исходящего канала.

В ряде диапазонов (например, LTE-450) используется полоса частот только 5 МГц, а в некоторых диапазонах можно использовать частоты 5 МГц и 20 МГц. Технология LTE предусматривает выделение 300 поднесущих в полосе 5 МГц и 1200 в полосе 20 МГц [10].

В табл. 2 представлены параметры сигнала, при которых совершается хэндовер в сетях LTE общего пользования.

На рис. 2 приведены зависимости вероятности успешного хэндовера для всех параметров сигнала, реализуемых в сетях связи общего доступа России.

Из рис. 2 видно, что худший режим хэндовера получен на частоте 2600 МГц при числе поднесущих 300. Он обеспечивает успешный хэндовер на скоростях движения поезда до 24 м/с. Лучшие режимы обеспечил успешный хэндовер на скоростях до 50 м/с при частоте 800 МГц и количестве поднесущих 1200, а также при частоте 450 МГц и числе поднесущих 300. Пунктирной линией обозначена скорость, при которой хэндовер должен успешно выполняться при скорости движения 70 м/с (в поездах «Сапсан»). Видно, что даже лучший режим сети LTE общего пользования не удовлетворяет этим требованиям.

Анализ технологий р-LTE

Рассмотрим вариант использования выделенных диапазонов частот для построения сети р-LTE железнодорожного транспорта. Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) выделила два диапазона частот для железнодорожного транспорта: полосу 10 МГц в диапазоне 1800 МГц¹ и полосу 20 МГц в диапазоне 350 МГц². На основании условий применения частот в диапазоне 1800 МГц используется 600 поднесущих, а в диапазоне 350 МГц — 1200 поднесущих.

В табл. 3 представлены параметры сигнала, при которых совершается хэндовер в сетях р-LTE.

На рис. 3 показаны зависимости вероятности успешного хэндовера от скорости поезда для сетей, работающих в диапазонах 1800 и 350 МГц.

Из графика видно, что в диапазоне 1800 МГц вероятность хэндовера для высокоскоростных поездов при скорости 70 м/с близка к нулю, а в диапазоне 350 МГц — 0,8. Такую вероятность можно считать приемлемой.

Рассмотрим расстояния, на которых располагаются базовые станции при частотах 1800 МГц и 350 МГц, в зависимости от уровня сигнала –80 дБм, которые пре-терпевает сигнал на базовых частотах. Найдем потери пути:

$$L = 10 \lg \left(D_t D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right),$$

где D_t и D_r — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; λ — длина волны сигнала; d — расстояние между антеннами.

На рис. 4 показаны зависимости потери пути от расстояния поезда и от базовой станции для диапазонов 1800 и 350 МГц.

Из рис. 4 видно, что при частоте 1800 МГц хэндовер будет выполнен на расстоянии 1,6 км от базовой станции, а при 350 МГц — на расстоянии 5 км. Таким образом на пути следования поезда процесс хэндовера в сетях 350 МГц происходит в несколько раз реже, чем в сетях 1800 МГц. А базовые станции на прямых участках можно располагать при 350 МГц на расстоянии до 10 км, в отличие от 1800 МГц, где базовые станции необходимо располагать на расстоянии до 3,2 км.

¹ Решение ГКРЧ от 11 сентября 2018 года N 18-46-02 «О выделении полосы радиочастот 1785–1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/551218941> (дата обращения: 12.10.2022).

² Решение ГКРЧ № 20-55-06-2 от 13 июля 2020 года «О выделении полосы радиочастот 350–370 МГц для использования радиоэлектронных средств мобильного широкополосного беспроводного доступа подвижной службы, предназначенных для построения технологической сети связи федеральной системы транспортной телематики» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565438828> (дата обращения: 12.10.2022).

Таблица 1. Параметры сигнала сети LTE общего пользования в России¹

Table 1. Signal parameters of the public LTE network in Russia

Общепринятое название	Номер диапазона LTE	Линия вверх, МГц	Линия вниз, МГц	Ширина полосы Δf , МГц	Вид модуляции	Дуплекс
LTE-2100	1	1920–1980	2110–2170	5; 20	QPSK 16 QAM, 64 QAM	FDD
LTE-1800	3	1710–1785	1805–1880	5; 20		FDD
LTE-2600	7	2500–2570	2620–2690	5; 20		FDD
LTE-900	8	880–915	925–960	5; 20		FDD
LTE-800	20	832–862	791–821	5; 20		FDD
LTE-450	31	452,5–457,5	462,5–467,5	5		FDD
LTE-2600	38	2570–2620		5; 20		TDD
LTE-2300	40	2300–2400		5; 20		TDD

¹ Что такое LTE Band 3, Band 7, Band 20? Бэнды LTE в России [Электронный ресурс]. URL: <https://gsm-repiteri.ru/chto-takoe-lte-band-3-band-7-band-20-bendy-lte-v-rossii> (дата обращения: 12.10.2022).

Таблица 2. Параметры в сетях LTE общего пользования в России

Table 2. Signal parameters in public LTE networks in Russia

Параметр	Значение
Несущая частота, МГц	2600, 2300, 2100, 800, 450
Количество поднесущих в OFDM-символе	300, 1200
Ширина полосы сигнала, МГц	5, 20
Высота подвеса антенны, м	20
Коэффициент усиления антенны, dbi	10
Модуляционно-кодированная схема	QPSK
Отношение сигнал/шум, дБм	–80
Число антенн: на передатчике на приемнике	2 1

Таблица 3. Параметры сигнала в сетях p-LTE

Table 3. Signal parameters in p-LTE networks

Параметр	Значение
Несущая частота, МГц	350, 1800
Количество поднесущих в OFDM-символе	1200, 600
Ширина полосы сигнала, МГц	20, 10
Высота подвеса антенны, м	20
Коэффициент усиления приемной антенны, dbi	7, 15
Коэффициент усиления передающей антенны, dbi	10
Модуляционно-кодированная схема	QPSK
Отношение сигнал/шум, дБм	–80
Число антенн: на передатчике на приемнике	2 1

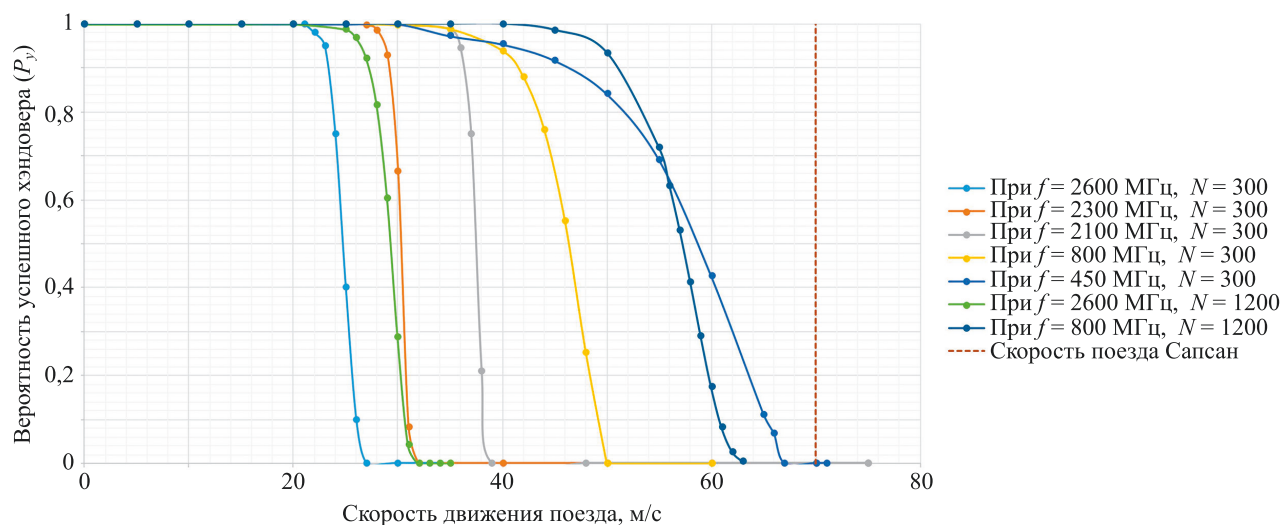


Рис. 2. Графики зависимостей вероятности успешного хэндовера от скорости движения поезда для сетей LTE общего пользования

Fig. 2. Graph of the dependence of the successful handover probability vs. the speed of the train for public LTE networks

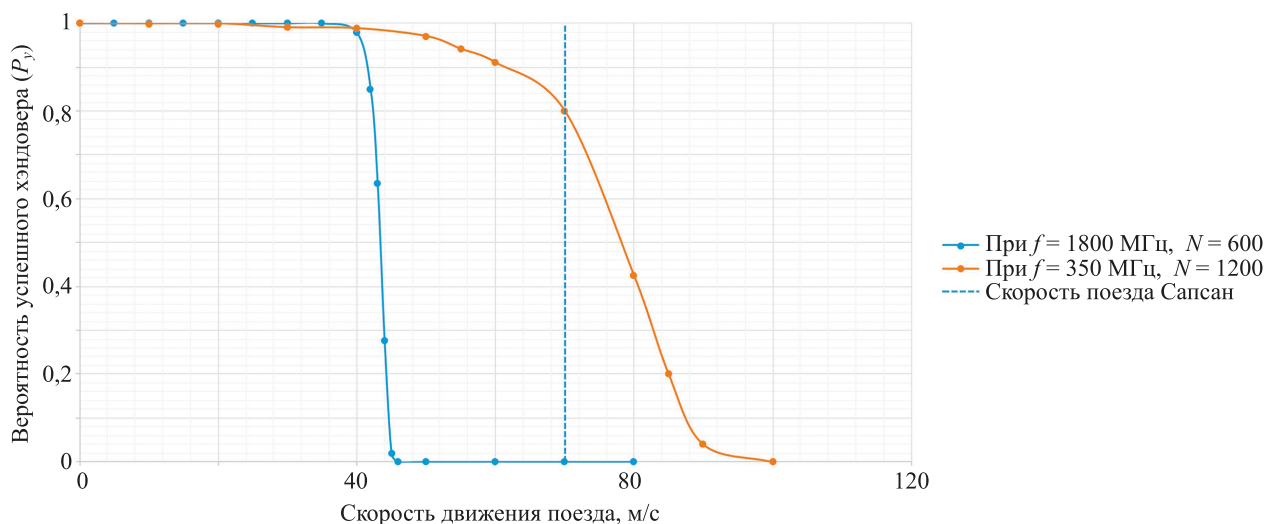


Рис. 3. Графики зависимостей вероятности успешного хэндовера от скорости движения поезда для выделенных диапазонов 1800 МГц и 350 МГц

Fig. 3. Graph of the dependence of the successful handover probability vs. the speed of the train for the allocated bands of 1800 MHz and 350 MHz

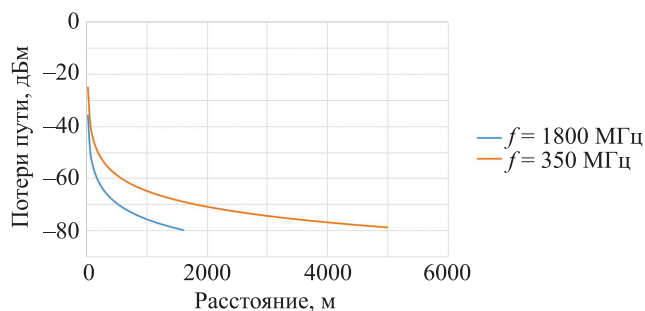


Рис. 4. Графики зависимостей потери пути от расстояния при частотах 1800 МГц и 350 МГц

Fig. 4. Graph of path loss dependence vs. the distance at frequencies of 1800 MHz and 350 MHz

Полученные величины являются результатом численного моделирования. Адекватность результатов требует уточнения при практической реализации сети.

Заключение

Проведен анализ модели вероятности успешного хэндовера в зависимости от скорости движения железнодорожного транспорта. Дано обоснование влияния

на сигнал сети рабочего диапазона и количества поднесущих сигнала OFDM.

Рассмотрены и проанализированы параметры сигнала сетей связи общего пользования, которые могут быть применены на железнодорожном транспорте. Сделан вывод, что для высокоскоростного транспорта стандартные параметры сети связи общего пользования показывают неприемлемые результаты. Вероятность хэндовера на скорости 70 м/с стремится к нулю. Для поездов, скорость которых не превышает 50 м/с целесообразно использовать технологию LTE в диапазоне 800 МГц с шириной полосы не менее 20 МГц или в диапазоне 450 МГц с шириной полосы не менее 5 МГц. Исследованы технологии р-LTE для двух диапазонов, выделенных для целей железнодорожного транспорта. На основании полученных результатов сделан вывод, что для высокоскоростных поездов, скорость которых достигает 70 м/с, необходимо использовать диапазон не выше 350 МГц.

Расчетным путем показаны расстояния, на которых требуется располагать базовые станции, работающие на частотах 1800 и 350 МГц. Так для частоты 350 МГц расстояние между базовыми станциями не должно превышать 10 км.

Результаты моделирования требуют уточнения при практической реализации сети.

Литература

1. Медведев А.С., Иванов В.В. Моделирование пропускной способности подвижных систем радиосвязи с применением методов пространственного кодирования сигнала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 2. С. 392–400. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-392-400>
2. Isa I.N.M., Baba M.D., Rahman R.A., Yusof A.L. Self-organizing network based handover mechanism for LTE networks // Proc. of the 2015 International Conference on Computer, Communications and Control Theory (I4CT), 2015, pp. 11–15. <https://doi.org/10.1109/I4ct.2015.7219527>

References

1. Medvedev A.S., Ivanov V.V. Throughput modeling of cellular network systems with spatial precoding. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 392–400. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-392-400>
2. Isa I.N.M., Baba M.D., Rahman R.A., Yusof A.L. Self-organizing network based handover mechanism for LTE networks. *Proc. of the 2015 International Conference on Computer, Communications and Control Theory (I4CT)*, 2015, pp. 11–15. <https://doi.org/10.1109/I4ct.2015.7219527>

- Control Theory (I4CT). 2015. P. 11–15. <https://doi.org/10.1109/i4ct.2015.7219527>
3. Munoz P., Barco R., de la Bandera I. On the potential of handover parameter optimization for Self-Organizing Networks // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2013. V. 62. N 5. P. 1895–1905. <https://doi.org/10.1109/tvt.2013.2247778>
 4. Дроздова В.Г., Завьялова Д.В. Анализ и оптимизация ключевых показателей эффективности хэндоверов в мобильных сетях LTE // *Вестник кибернетики*. 2017. № 4(28). С. 146–153.
 5. Liu J., Wang X. Handover analysis on high speed train with Doppler frequency spread // *arXiv*. 2017. arXiv:1703.09869. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.09869>
 6. Lu Y., Xiong K., Zhao Z., Fan P., Zhong Z. Remote antenna unit selection assisted seamless handover for high-speed railway communications with distributed antennas // *Proc. of the IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. 2016. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/vtcspring.2016.7504445>
 7. Назаров С.Н., Аверьянов Е.С., Шагарова А.А., Назаров А.С., Касеева Н. А. Анализ методов повышения эффективности обработки данных высокоскоростных абонентов в сети широкополосного доступа // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2011. № 5(38). С. 65–70.
 8. Журавлёва Л.М., Нилов М.А., Лошкарёв В.Л., Левшунов В.В. Оценка влияния эффекта Доплера на качество радиосвязи в условиях высокоскоростного движения // *Мир транспорта*. 2020. Т. 18. № 4 (89). С. 54–71. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-54-71>
 9. Шорин А.О. Влияние скорости движения абонентов на интенсивность потерь соединений в сетях с сигналами OFDM // *Экономика и качество систем связи*. 2017. № 1(3). С. 69–78.
 10. Степутин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 т. 2-е изд. Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2018.
 3. Munoz P., Barco R., de la Bandera I. On the potential of handover parameter optimization for Self-Organizing Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, vol. 62, no. 5, pp. 1895–1905. <https://doi.org/10.1109/tvt.2013.2247778>
 4. Drozdova V.G., Zavyalova D.V. Analysis and optimization of handover key performance indicators in LTE mobile networks. *Proceedings in Cybernetics*, 2017, no. 4(28), pp. 146–153. (in Russian)
 5. Liu J., Wang X. Handover analysis on high speed train with Doppler frequency spread. *arXiv*, 2017, arXiv:1703.09869. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.09869>
 6. Lu Y., Xiong K., Zhao Z., Fan P., Zhong Z. Remote antenna unit selection assisted seamless handover for high-speed railway communications with distributed antennas. *Proc. of the IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2016, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/vtcspring.2016.7504445>
 7. Nazarov S.N., Averianov E.S., Shagorova A.A., Nazarov A.S., Kaseeva N.A. The analysis of ways of upgrade of data processing of highly mobile subscribers in a network of broadband access. *The Siberian Aerospace Journal*, 2011, no. 5(38), pp. 65–70. (in Russian)
 8. Zhuravleva L.M., Nilov M.A., Loshkarev V.L., Levshunov V.V. Evaluation of the impact of Doppler effect on quality of HSR radiocommunications. *World of Transport and Transportation*, vol. 18, no. 4(89), pp. 54–71. (in Russian). <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-54-71>
 9. Shorin A. Influence of velocity of movement of subscribers on intensity of loss of connections in networks with signals OFDM. *Jekonomika i kachestvo sistem svyazi*, 2017, no. 1(3), pp. 69–78. (in Russian)
 10. Steputin A.N., Nikolaev A.D. *Mobile Communication on the Road to 6G*. In 2 vol. 2nd ed. Moscow-Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2018. (in Russian)

Авторы

Медведев Артем Сергеевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57222246792](https://orcid.org/0000-0001-9445-5062), <https://orcid.org/0000-0001-9445-5062>, art236960@yandex.ru
Распаев Юрий Алексеевич — кандидат технических наук, доцент, генеральный директор, ООО «ТЕЛЕКОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, [sc 57189330555](https://orcid.org/0000-0003-2497-876X), <https://orcid.org/0000-0003-2497-876X>, raspaev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.10.2022
 Одобрена после рецензирования 29.03.2023
 Принята к печати 23.05.2023

Authors

Artem S. Medvedev — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57222246792](https://orcid.org/0000-0001-9445-5062), <https://orcid.org/0000-0001-9445-5062>, art236960@yandex.ru
Yuri A. Raspaev — PhD, Associate Professor, CEO, Telecom Project, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, [sc 57189330555](https://orcid.org/0000-0003-2497-876X), <https://orcid.org/0000-0003-2497-876X>, raspaev@mail.ru

Received 28.10.2022
 Approved after reviewing 29.03.2023
 Accepted 23.05.2023



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-635-645

Comparative Performance analysis of DVR & DSTATCOM for Distributed Generation with Gravitational Search Algorithm

Kanchanapalli Bhavya¹✉, Pokanati Veera Venkata Rama Rao², Lanka Ravi Srinivas³

¹ Jawaharlal Nehru Technological University, Kakinada (JNTUK), Kakinada, 500085, India

² Maturi Venkata Subba Rao (MVSR) Engineering College, Hyderabad, 501510, India

³ Gudlavalleru Engineering College, Gudlavalleru, 533003, India

¹ bhavya.eee.08@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3498-6192>

² drramaraopvv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9243-0320>

³ lravisrinivas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8409-5120>

Abstract

The progress in the stream of the power electronic converters has led to the expansion of various protection devices for the distribution system. This also has led to an assortment of flexible transmission devices aiming to enhance the stability of the system throughout a variety of power quality issues and, furthermore, for enabling flexible uninterrupted power transmission during turbulences. This paper augments the employment of two Custom Power Devices, namely, Dynamic Voltage Restorer and Distribution Static Compensator for dealing with various power quality issues associated with distributed generation systems. This paper also involves analysis of performance of proposed Custom Power Devices with various algorithms, like gravitational search algorithm, BAT algorithm and ANT colony optimization algorithm for improving the stability of the power system. The proposed system has been tested with various distributed systems, fault conditions, and assessment has been performed among different algorithms in terms of supply voltage, supply current, active power, reactive power, and power factor. The design and analysis of entire system has been executed using MATLAB/Simulink.

Keywords

Dynamic Voltage Restorer, Distribution Static Compensator, Gravitational Search Algorithm

For citation: Bhavya K., Rama Rao P.V.V., Ravi Srinivas L. Comparative performance analysis of DVR & DSTATCOM for distributed generation with gravitational search algorithm. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 635–645. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-635-645

УДК 004.94

Сравнительный анализ производительности DVR и DSTATCOM для распределенной генерации с алгоритмом гравитационного поиска

Канчанапалли Бхавья¹✉, Поканати Веера Венката Рама Рао², Ланка Рави Шринивас³

¹ Технологический университет Джавахарлала Неру, Какинада, Какинада, 500085, Индия

² Инженерный колледж Матури Венката Субба Рао (МВСР), Хайдарабад, 501510, Индия

³ Инженерный колледж Гудлаваллеру, Гудлаваллеру, 533003, Индия

¹ bhavya.eee.08@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-3498-6192>

² drramaraopvv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9243-0320>

³ lravisrinivas@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8409-5120>

Аннотация

Развитие области силовых электронных преобразователей вызвало увеличение количества защитных устройств для распределительной системы. Это привело к созданию ассортимента гибких устройств передачи, направленных на повышение стабильности системы при проблемах с качеством электроэнергии, и на обеспечение гибкой бесперебойной передачи энергии во время турбулентности. Рассмотрены возможности использования двух пользовательских силовых устройств: динамического восстановителя напряжения (Dynamic Voltage Restorer,

DVR) и распределительного статического компенсатора (Distribution Static Compensator, DSTATCOM). Применение силовых устройств предназначено для решения проблем качества электроэнергии, связанных с системами распределенной генерации. Проведен анализ производительности предложенных пользовательских устройств напряжения питания с применением алгоритмов: гравитационного поиска, летучих мышей (BAT) и муравьиного алгоритма (ANT) для повышения стабильности системы питания. Предложенная система протестирована с различными распределенными системами и условиями отказа. Выполнена оценка выбранных алгоритмов с точки зрения напряжения питания, тока питания, активной мощности, реактивной мощности и коэффициента мощности. Проектирование и анализ всей системы осуществлены с использованием пакета MATLAB/Simulink.

Ключевые слова

динамический восстановитель напряжения, распределительный статический компенсатор, алгоритм гравитационного поиска

Ссылка для цитирования: Бхавья К., Рама Рао П.В.В., Рави Шринивас Л. Сравнительный анализ производительности DVR и DSTATCOM для распределенной генерации с алгоритмом гравитационного поиска // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 635–645 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-635-645

Introduction

The power requirement has been ever-increasing since last few years, and also still there have been numerous areas which undergo power interruptions and power disturbances tribulations. Furthermore, there has been enormous raise in the research towards the stream of power semiconductor devices which intends to condense numerous power quality troubles like voltage sag, swell, and interruptions providing continuous, stable power supply through the transmission and distribution systems. The contraption in the vicinity of semiconductor devices led to novel transmission devices well-known as Flexible AC transmission systems (FACTS), which diminishes the higher power surge, infuses the required quantity of power where the majority of the loads guzzles reducing the transient conditions and losses in the system with less cost. The FACTS devices engross the usage [1] of a variety of semiconductor devices, like thyristors, IGBT'S, GTO'S, which inject the power and also take up the power based up on the control signal provided to the switches, which also reduces the loading of lines, better flexibility for power transfer, damping out of bigger oscillations.

The custom power devices are categorized into different types, namely, static VAR compensator, static series compensator, Unified Power Flow Controller, Interline Power Flow Controller, and thyristor-controlled compensators. The series compensators holding capacitors [2] can be worn in the transmission lines which are allied in series with the lines with increased transmission capacity, higher power transfer capability, larger improvement [3] in the stability of the system, economical solution providing reduction in the generators, conductors and enlarged parallel paths for the power flow. However, the drawbacks with the series compensators are superior fault current, malfunctioning of relays, generation of larger reverse voltages across the breakers leading to the damage of the arrangement. The shunt compensators employing capacitors [4] in parallel with the lines can be utilized, which injects the reactive power during larger loading conditions and dipping the voltage drop [5] at the load side, although engage certain disadvantages like increase in the handling of generators, conductors leading to higher investment. The static var compensators supplies [6]

enhanced transient stability, damping of power swings, abridged power losses, other than require larger values of inductors and capacitors. Static synchronous compensators can be equipped for lowering power quality problems which doesn't need larger passive elements, requiring smaller area and generating privileged reactive power at their output terminals. Thyristor switched capacitors [7] are one of the classifications of static var compensator utilizing thyristors whose turn 'on' and 'off' connects and disconnects the capacitor to the line thereby controlling the reactive power of the power system and acquiring benefit of advanced dynamic stability [8]. But the disadvantage of these devices is necessity of a greater number of thyristors and so increased cost of the system. So Distribution Static Compensator (DSTATCOM) is preferred as a custom power device for the power system which encompasses coupling transformer and also voltage source converter for voltage balancing for the period of abnormal conditions [9, 10]. Also, in addition to DSTATCOM, Dynamic Voltage Restorer (DVR) has been elected as one more custom device for analyzing diverse abnormal conditions and loading circumstances.

For the scheme of voltages and power at the power system, it is required to manage the converter which provides the voltage balancing; so control techniques have been adopted for the two proposed custom power devices. Control algorithms are required in power electronics for voltage generation and reference signal generation. Some control algorithms, such as Instantaneous Active-Reactive (IAR) algorithm, Synchronous Reference Frame (SRF), Unit Vector Template (UVT) generation, and Exponential Composition Algorithm (ECA). IAR and SRF are generally applied for the generation of reference signals but the drawback of IAR algorithm is the cutoff frequencies. SRF algorithm does not work well in unbalanced voltage supply. However, filtering techniques, such as high pass filter and low pass filter, is used for the extraction of DC signal [11]. UVT can be used for frequency synthesizer and it requires a Phase Locked Loop (PLL) that makes process more complex. Genetic algorithm deals effectively with many optimization problems [12] but the disadvantages with this algorithm are complicated mutation and crossover operators along with the speed of convergence. ABC algorithm can be used where honey bees moves until they

attain certain optimum solution, but the disadvantages are larger objective functions [13], slower convergence speed, lower nature of exploration. Gravitational Search Algorithm (GSA) in [14, 15] uses agents as particles moving with certain velocity, it has been proposed for controlling the voltage source converter. The work utilizes GSA, Ant Colony Optimization (ACO), and BAT algorithms for the optimization of power quality. Three optimization algorithms are used to solve the optimal reactive power dispatch problem. ACO is one of the popular techniques for approximate optimization problem proposed by [16]. Real ant colonies are the inspiration source for this algorithm. Foraging behaviors of the ants are exploited in this algorithm to solve discrete optimization problems. There are several algorithms [17–19] evolved for the improvement of original ACO algorithms. BAT algorithm was introduced by [20] and it depends on the features of microbats. The DSTATCOM and DVR have been tested with three algorithms, namely, GSA, BAT, ANT algorithms for various conditions like fault occurrence, switching of synchronous generator, switching of induction generator, switching of RLC load.

DVR and DSTATCOM for dealing with power quality issues

The power system has been designed with the FACTS devices and also with various algorithms for reducing power quality issues.

DSTATCOM

This is a custom device which is designed to condense the harmonics with the switching of nonlinear loads and also reins the power factor and bus voltage with the regulation of reactive power into the lines. The one line illustration representing the static compensator with the power system is given below. It consists of grid providing supply for the loads and to the entire power system. At the load side, a wind mill with induction generator, one

synchronous generator-based wind mill, one RLC load and a faulted condition have been considered and they will be switched with diverse timings. At the position of common coupling, DSTATCOM is associated which injects at the point of common coupling through coupling transformer. The basic principle in the rear of STATCOM is that it can inject or absorb the reactive power and also exchange the active power with the assist of DC source. The DSTATCOM consists of voltage source converter [1–4] coupled to the point of common coupling through transformer, and the switching for the converter will be generated with the control approach of voltage control. The DSTATCOM generates and injects reactive power at PCC acting as a capacitor if the measured voltage of the line is less in comparison with the DSTATCOM voltage. The active power exchange occurs with the faulted conditions, as soon as the voltage of the compensating device leads the supply voltage to organize [5] the voltage of the system and in addition at the voltage terminals of the DSTATCOM. When any one of the load shown in the Fig. 1 is switched to ON, power quality issues like voltage sag or swell occurs. Then that voltage magnitude is collected and evaluated with the reference voltage, and the difference is aimed towards the controller. The controller processes the error and generates gate pulses for all the six switches of the converter, which, by voltage source, injects or absorbs the required voltage and reactive power. In addition, the compensating device acts as a shunt filter which eliminates harmonic content at the load side and also at supply side.

The variables used in Fig. 1 are represented as follows: XS — Synchronous Reactance; IS — Synchronous Current; T/F — Transformer; XL — Line Reactance; IL — Line Current; S1-S6 — Switches used in DSTATCOM; CB1 — Circuit Breaker 1; CB2 — Circuit Breaker 2; CB3 — Circuit Breaker 3; CB4 — Circuit Breaker 4; SG — Synchronous Generator; IG — Induction Generator; Vref — Reference Voltage; Vabc — Three Phase Voltage.

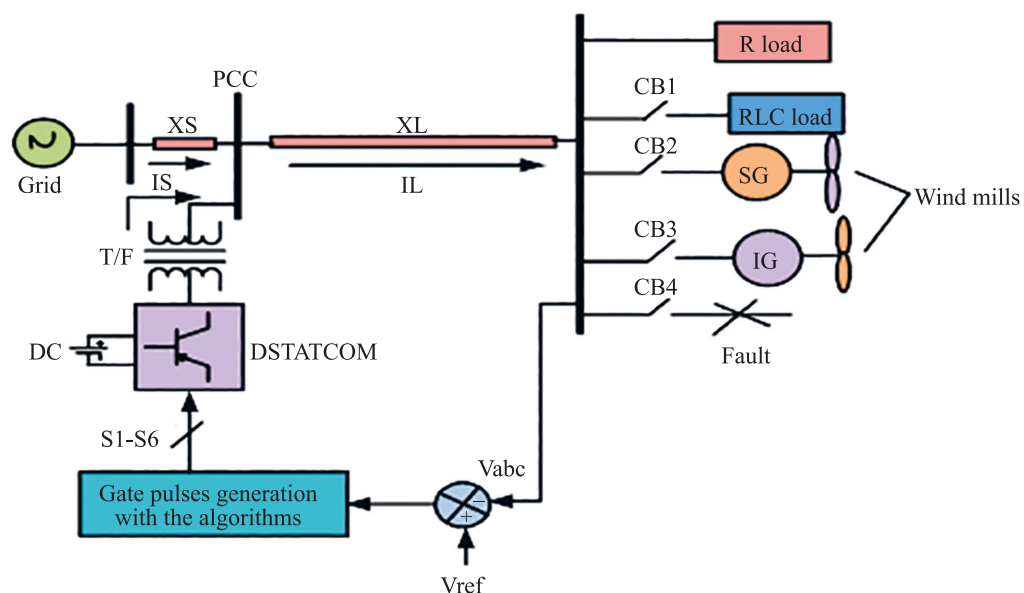


Fig. 2. One line diagram of power system with DSTATCOM

DSTATCOM equations are given as follows

$$\frac{d^i f^i}{dt} = \frac{1}{L_f} (-R_f I_{fa} + V_{ia} - V_{ia}),$$

$$\frac{d^i f^i}{dt} = \frac{1}{L_f} (-R_f I_{fb} + V_{ib} - V_{ib}),$$

$$\frac{d^i f^i}{dt} = \frac{1}{L_f} (-R_f I_{fc} + V_{ic} - V_{ic}),$$

where I_{fa} , I_{fb} and I_{fc} are the currents in the three phases of the DSTATCOM system. These currents are controlled by the VSC in order to regulate the reactive power injected by the DSTATCOM and to filter out harmonics. V_{ia} , V_{ib} , V_{ic} are the phase voltages for output and V_{ia} , V_{ib} , V_{ic} are the phase voltages in PCC bus with respect to neutral. The converter output phase voltages are

$$V_{ia} = V_{dc} U_a,$$

$$V_{ib} = V_{dc} U_b,$$

$$V_{ic} = V_{dc} U_c,$$

where, V_{ia} , V_{ib} and V_{ic} are 'switching functions' generated by Hysteresis band control method.

d^i and f^i are the current and flux variables, respectively, of the coupling transformer in the DSTATCOM system. These variables describe the magnetic field in the transformer and the current flow through it. L_f is the inductance of the coupling transformer in the DSTATCOM system. This parameter affects the rate at which the current and flux variables change over time. R_f is the resistance of the coupling transformer in the DSTATCOM system. This parameter affects the power losses in the transformer and the efficiency of the DSTATCOM system. U_a , U_b and U_c are the output voltage phase angles of the DSTATCOM system. These voltages are controlled by the VSC in order

to regulate the reactive power injected by the DSTATCOM and to filter out harmonics. V_{dc} is the DC voltage source that powers the VSC in the DSTATCOM system. This voltage source is typically derived from a capacitor or battery bank, and its value affects the overall power capacity and efficiency of the DSTATCOM system.

DVR

The DVR is a custom device regulating harmonics at the side of source voltage and also managing the enormity of voltages. It is essentially employed for the voltage sag mitigations at the supply side. It is identical to static compensator comprising of voltage source converter and a transformer, but the difference is that the transformer is connected in series with the distribution system and load as shown in Fig. 2. So, a DVR [6] is a power electronic converter utilizing gate turnoff thyristor or insulated gate bipolar transistor as a toggle with the DC supply and injection transformer. Three single phase transformers [7] are coupled in series through the line to couple the voltages into the system. It controls as well the active power and reactive power by absorbing or injecting into the line for a very slighter duration of milliseconds. It injects voltage in series with the line with injection transformer [9] by means of forced commutated converter. Furthermore, with the help of transformer, the restorer can be isolated from the system at any period of time. Underneath normal operating conditions, as the error between the reference voltage and actual voltage is very little, converter injects very little voltage compensating the device losses. Beneath power quality issue like voltage sag occurrence, as the error will be extremely larger value, it generates larger voltage in series with the line with controlled magnitude and phase angle. GSA, ACO and BAT algorithms are utilized in the work to identify the optimal settings of RLC load and to minimize the voltage stability of all the load buses. Parameters, such as L-Index, voltage error/deviation Extra High Voltage (EHV), are calculated to improve the voltage profile and voltage stability.

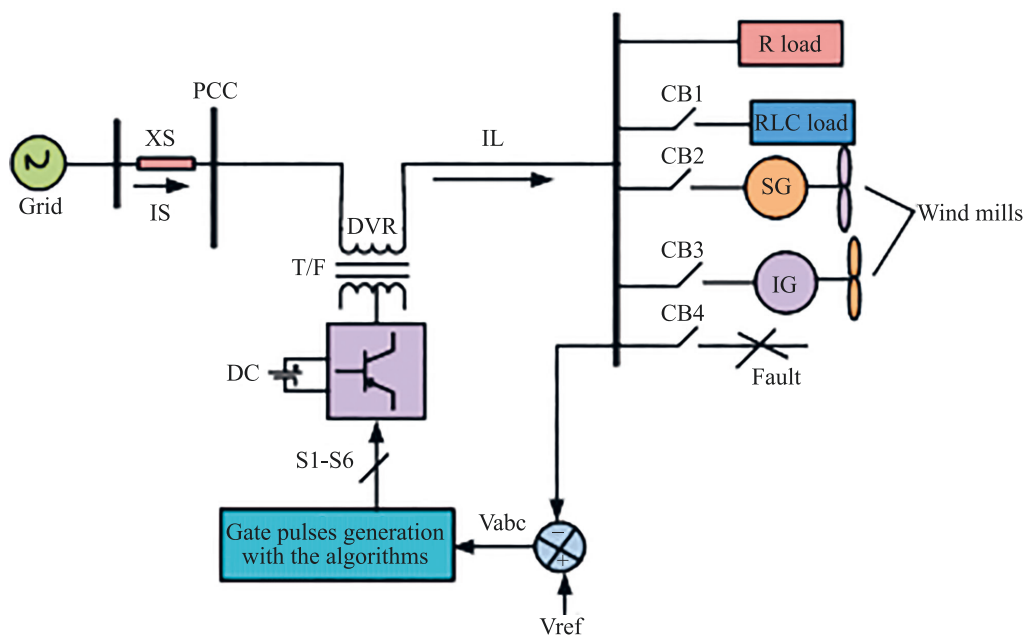


Fig. 2. One line diagram of power system with DVR

Proposed GSA for controlling the FACTS devices

GSA

This algorithm is an optimization method based on the Newton's law of gravity and associated interactions of masses. It represents the interactions among the number of agents by the force of gravity.

It employs agents which are acknowledged as objects and whose performance will be deliberated by their inertial and gravitational masses which are also identified as solutions. The heaviest mass represents the optimum solution and the remaining lightest masses get attracted towards the heaviest mass. Because the heavier masses have greater fitness values, they represent good solution for the problem and it works slowly during worse solutions. Therefore, effective configuration can be obtained using GSA in the optimization of power quality issues. This GSA [11] is a heuristic method which depends on the law of gravity and law of motion. According to the principle of gravity law, one particle exerts force on other particle due to force of attraction [12, 13] or repulsion. That force exertion can be distinguished as the product of gravitational constant and fraction of two masses with the square of distance between the two masses [14]. The force of attraction or repulsion of one mass on other mass can be expressed as

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2},$$

where F is the force of one mass on other mass; $M_1 M_2$ are the masses of two particles; R is the distance between the two particles; G is the gravitational constant which is a fundamental constant of nature that determines the strength of the gravitational force.

The GSA also obeys the law of motion which states that the velocity of any particle depends on the previous state of velocity with certain change in time. The variation in the velocity with respect to time is also known as acceleration which is defined in [15] as the force acting up on the masses of the particles and can be expressed as

$$a = \frac{F}{M}.$$

Consider a system consisting of n number of particles with their respective masses, the location of the i -th particle can be given as

$$X_i = (x_i^1, x_i^2, x_i^3, \dots, x_i^n),$$

where x_i^d is the location of the i -th particle in the d -th dimension and n is the dimension of search space. At a precise time period of t , the force acting on the particle i from particle j can be given as

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t)M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon},$$

where $M_{aj}(t)$ is the gravitational mass linked to the particle j in period of t ; $M_{pi}(t)$ is the inactive gravitational mass associated to the particle i ; $G(t)$ is gravitational constant at a period of t ; $R_{ij}(t)$ is the Euclidian distance between particles i and j ; and ϵ is a small constant to prevent division by zero

in case the two particles are at the same location. Here, particles are considered as objects whose performance is represented by their feature of masses. The flow chart for the GSA is given below.

The following are the steps for the working of GSA on the power systems as shown in Fig. 3.

- The initial numbers of agents are considered and positions are identified with the initial population.
- The fitness of all the particles are determined to find the best and worst fitness among all the particles either by applying maximization or minimization principle.

Minimization problem:

$$Pbest(t) = \max fit_i(t), j \in \{1, 2, \dots, N\}$$

$$Worst(t) = \max fit_i(t), j \in \{1, 2, \dots, N\}.$$

Maximization problem:

$$Best(t) = \max fit_j(t), j \in \{1, 2, \dots, N\}$$

$$Worst(t) = \min fit_j(t), j \in \{1, 2, \dots, N\}.$$

- At iteration of period t , the gravitational constant is updated by the following equation

$$G(t) = G_0 e^{\frac{-at}{T}},$$

where, G_0 represents the initial value of the gravitational constant and T is the maximum number of iterations

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t)M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)).$$

Euclidian distance among two particles i and j could be given by:

$$R_{ij}(t) = \|R_i(t) \times R_j(t)\|.$$

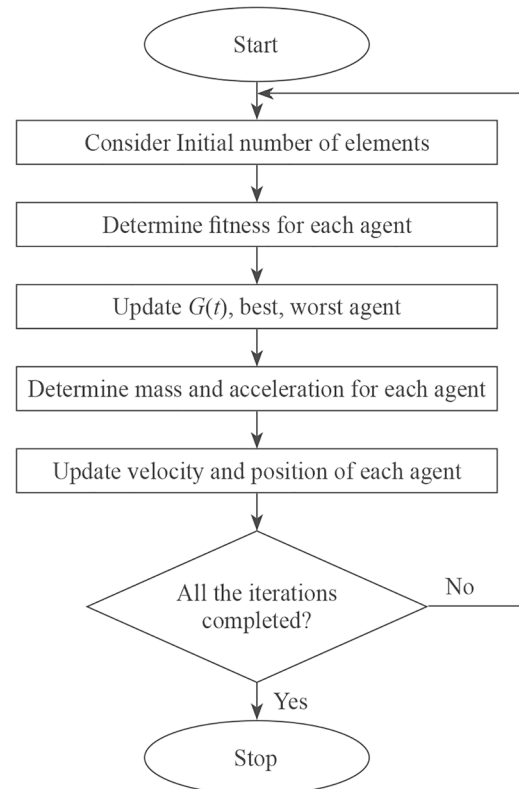


Fig. 3. Flowchart of GSA algorithm

- The total force on particle i at iteration period of t can be given as

$$F_i^d(t) = \sum rand_j F_{ij}^d(t).$$

- Depending on the best and worst values, the gravitational and inertia masses are calculated for each particle and can be given as

$$M_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)},$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1 \text{ to } n} m_j(t)}.$$

- After the calculation of masses, the acceleration of the particle at iteration t is determined as

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)}.$$

- Then the velocity and the position of each particle i at next iteration $(t+1)$ is updated.

$$vi(t+1) = randi \times vi(t) + ai(t),$$

$$xi(t+1) = xi(t) + vi(t+1).$$

- Repeat the process by increasing the iteration counter until the termination criteria set at beginning are satisfied and consider the best optimal of all iterations as the optimal solution of the algorithm.

Discussion of Results

The simulation of the proposed power system with two FACTS devices, namely, DSTATCOM, DVR has been implemented with various test cases like switching on of loads, occurrence of fault conditions and controlled with three algorithms, namely, GSA, ACO, BAT.

DVR in Power System

The power system has been simulated with grid at source side and load at the end side, and the waveform in Fig. 4 show the PCC parameters at rated value where (and later on the graphs legend) I represents current, V represents voltage, P represents active power and Q represents reactive power.

The Table 1 shows the rated parameters of the power system.

With fault condition in the power system. The LLL (3-Line) fault has been created in the system at $t = 0.1$ s to $t = 0.65$ s, and various algorithms have been tested for DVR.

The voltage has been almost remained constant, current has been increased by 26 times from the rated value, active power has been increased by 7 times from the rated value and reactive power is almost zero as shown in Fig. 5.

GSA. This algorithm has been used for the DVR and the waveforms below show the PCC parameters under faulted conditions with DVR.

The voltage has been almost remained constant, current has been maintained at 3.5 times of the rated value, active power has been maintained at 3.5 times of the rated value and reactive power is almost zero, as shown in Fig. 6.

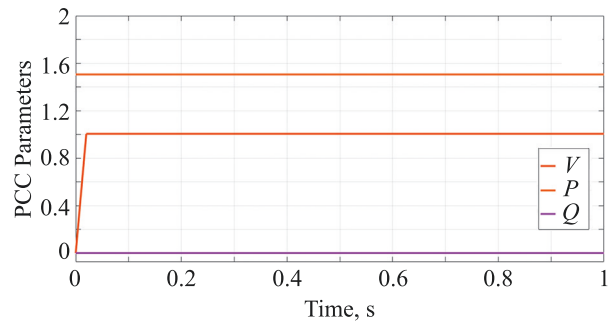


Fig. 4. PCC Parameters of power system

Table 1. PCC Parameters of power system

Parameter, pu	Rated values
Voltage	1
Current	1
Active power	1.5
Reactive power	0
Power factor	1

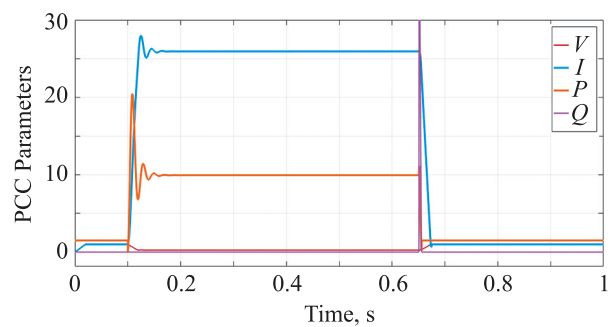


Fig. 5. PCC Parameters of power system under faulted condition

Table 2 represents the various parameters observed for different algorithms at PCC.

With wind based synchronous generator. The wind turbine based synchronous generator has been connected to the system at $t = 0.1$ s to $t = 0.65$ s and various algorithms have been tested for DVR.

The voltage has been almost remained constant, current has been increased to 0.3 times of the rated value, active

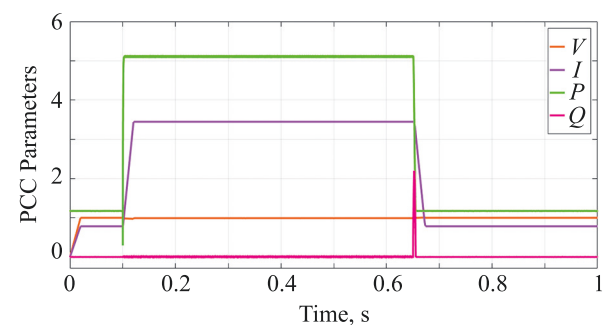


Fig. 6. PCC Parameters of power system under faulted condition after applying DVR and GSA

Table 2. PCC Parameters with fault for GSA, BAT, ANT algorithms

Parameter, pu	Without FACTS devices	GSA	BAT	ANT
Voltage	0.256	0.989	0.990	0.99
Current	25.900	3.440	2.974	2.99
Active power	10	5.140	4.460	4.54
Reactive power	0	0.040	0.042	0.05
Power factor	0.990	0.999	0.900	0.99

power has been increased to 0.3 times of the rated value and reactive power has been increased to 0.4 pu, as shown in Fig. 7.

GSA. This algorithm has been used for the DVR and the waveforms below show the PCC parameters with connection of wind turbine based synchronous generator with DVR.

The voltage has been almost remained constant, current has been reduced to 0.11 times of the rated value, active power has been reduced to 0.11 times of the rated value and reactive power has been reduced to 0.23 pu as shown in Fig. 8, and in Table 3 represents the various parameters observed for different algorithms at PCC.

With wind based induction generator. The wind turbine based induction generator has been connected to the system at $t = 0.1$ s to $t = 0.65$ s and various algorithms have been tested for DVR.

The voltage has been almost remained constant, current has been increased to 2 times of the rated value, active power has been maintained at rated value with oscillations and reactive power has been increased to 2.45 pu, as shown in Fig. 9.

GSA. This algorithm has been used for the DVR and the waveforms below show the PCC parameters with connection of wind turbine based induction generator with DVR.

The voltage has been almost remained constant, current has been reduced to 1.3 times of the rated value, active power has been reduced to 0.16 times of the rated value and reactive power has been increased to 1.2 pu, as shown in Fig. 10. Table 4 represents the various parameters observed for different algorithms at PCC.

With RLC load. The RLC load has been connected to the system at $t = 0.1$ s to $t = 0.65$ s and various algorithms have been tested for DVR.

The voltage has been almost remained constant, current has been almost remained constant, active power has been increased to 0.02 times of the rated value and reactive power has been almost remained constant at zero as in Fig. 11.

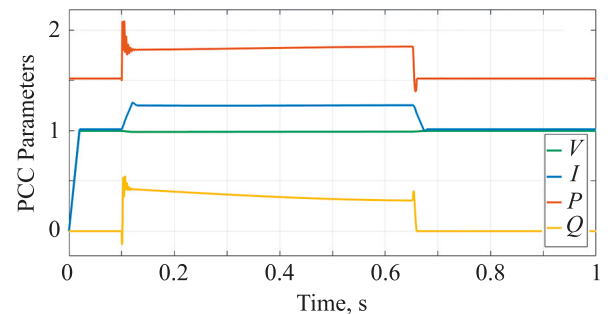


Fig. 7. PCC Parameters of power system with synchronous generator

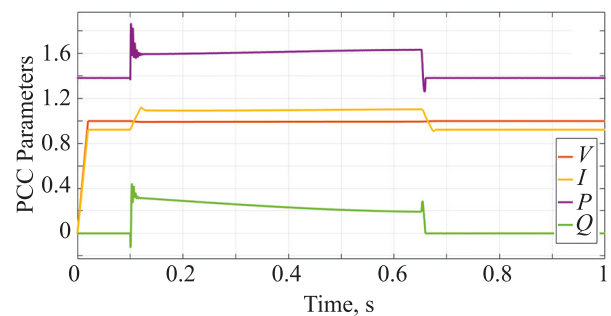


Fig. 8. PCC Parameters of power system with synchronous generator after applying DVR and GSA

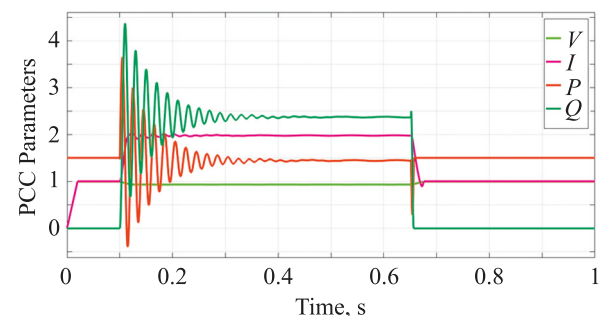


Fig. 9. PCC Parameters of power system with induction generator

Table 3. PCC Parameters with synchronous generator for GSA, BAT, ANT algorithms

Parameter, pu	Without FACTS devices	GSA	BAT	ANT
Voltage	0.980	0.992	0.989	0.989
Current	1.249	1.093	1.167	1.168
Active power	1.810	1.620	1.696	1.700
Reactive power	0.400	0.315	0.360	0.350
Power factor	0.980	0.980	0.970	0.980

Table 4. PCC Parameters with induction generator for GSA, BAT, ANT algorithms

Parameter, pu	Without FACTS devices	GSA	BAT	ANT
Voltage	0.935	0.97	0.9685	0.968
Current	1.212	1.3	1.385	1.4
Active power	2.4	1.6	1.660	1.6
Reactive power	1.5	1.07	1.180	1.2
Power factor	0.935	0.83	0.810	0.815

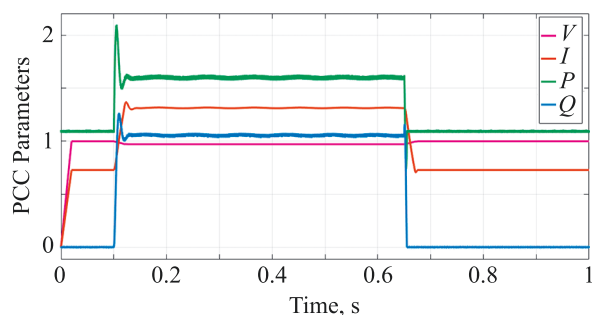


Fig. 10. PCC Parameters of power system with induction generator after applying DVR and GSA

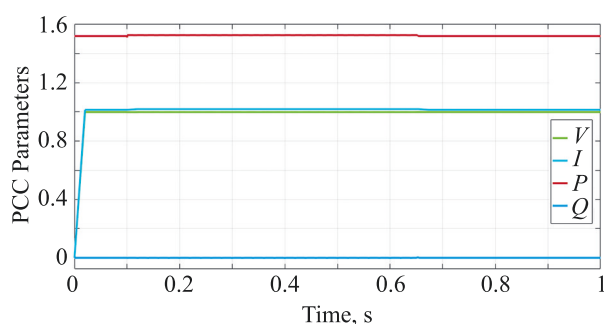


Fig. 11. PCC Parameters of power system with RLC load

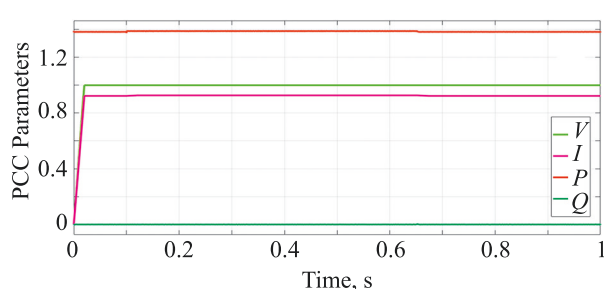


Fig. 12. PCC Parameters of power system with RLC load with DVR and GSA

GSA. This algorithm has been used for the DVR and the waveforms below show the PCC parameters with connection of RLC load with DVR.

The voltage has been almost remained constant, current has been reduced to 0.92 pu, active power has been reduced to 1.399 pu and reactive power has been almost remained constant at zero as shown in Fig. 12. Table 5 represents the various parameters observed for different algorithms at PCC.

DSTATCOM

The power system has been simulated with grid at source side and load at the end side and the waveforms below show the PCC parameters at rated values.

With fault condition in the power system. The fault has been connected to the system at $t = 0.1$ s to $t = 0.65$ s and various algorithms have been tested for DSTATCOM.

GSA. This algorithm has been used for the DSTATCOM and the waveforms below show the PCC parameters with occurrence of fault with DSTATCOM.

As per the Fig. 13, the voltage has been almost remained constant, current has been maintained at 7.7 times of the rated value, active power has been maintained at 4.2 times of the rated value and reactive power is almost zero. Table 6 represents the various parameters observed for different algorithms at PCC.

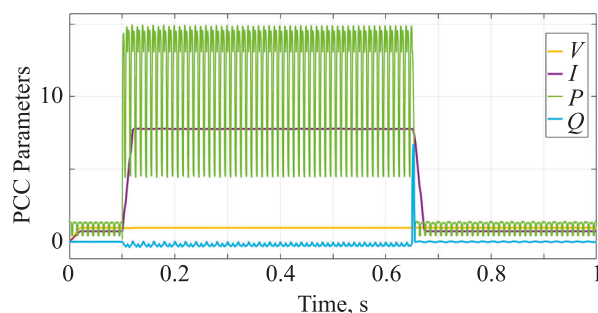


Fig. 13. PCC Parameters of power system under fault condition after applying DSTATCOM and GSA

Table 5. PCC Parameters with RLC load for GSA, BAT, ANT algorithms

Parameter, pu	Without FACTS devices	GSA	BAT	ANT
Voltage	0.998	0.998	0.998	0.998
Current	1.018	0.9255	0.926	0.920
Active power	1.526	1.390	1.391	1.400
Reactive power	0.0001	0.0037	0.0005	0.0003
Power factor	0.999	0.990	0.990	0.990

Table 6. PCC Parameters with fault for GSA, BAT, ANT algorithms

Parameter, pu	GSA	BAT	ANT
Voltage	0.950	0.960	0.6
Current	7.780	7.780	4.9
Active power	14.900	1	5.1
Reactive power	0.002	0.0037	0.0037
Power factor	0.946	0.940	0.99

With wind based induction generator. The wind turbine based induction generator has been connected to the system at $t = 0.1$ s to $t = 0.65$ s and various algorithms have been tested for DSTATCOM.

GSA. This algorithm has been used for DSTATCOM and the waveforms below show the PCC parameters with connection of wind based induction generator using DSTATCOM.

The voltage has been almost remained constant, current has been maintained at 7 times of the rated value, active power has been maintained at 4 times of the rated value and reactive power is increased to 1.8 pu as shown in Fig. 14. Table 7 represents the various parameters observed for different algorithms at PCC.

With wind based synchronous generator. The wind turbine based synchronous generator has been connected to the system at $t = 0.1$ s to $t = 0.65$ s and various algorithms have been tested for DSTATCOM.

GSA. This algorithm has been used for the DSTATCOM and the waveforms below show the PCC parameters with connection of wind based synchronous generator using DSTATCOM.

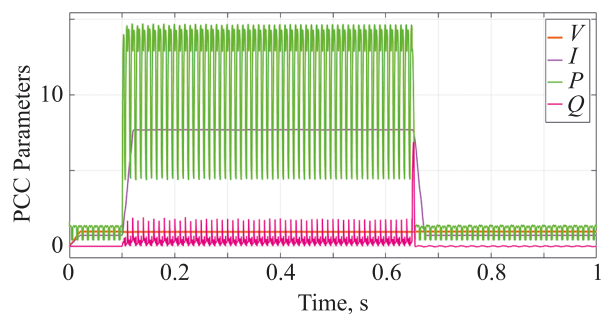


Fig. 14. PCC Parameters of power system with induction generator condition after applying DSTATCOM and GSA

Table 7. PCC Parameters with induction generator for GSA, BAT, ANT algorithms

Parameter, pu	GSA	BAT	ANT
Voltage	0.952	0.953	0
Current	7.695	7.7	3.5
Active power	14.670	14.6	5
Reactive power	1.8	2	1
Power factor	0.950	0.9	0.95

As in Fig. 15, the voltage has been almost remained constant, current has been maintained at 7.4 times of the rated value, active power has been maintained at 4 times of the rated value and reactive power is increased to 7.4 pu. Table 8 represents the various parameters observed for different algorithms at PCC.

With RLC load. The RLC load has been connected to the system at $t = 0.1$ s to $t = 0.65$ s and various algorithms have been tested for DSTATCOM.

GSA. This algorithm has been used for the DSTATCOM and the waveforms below show the PCC parameters with connection of RLC load using DSTATCOM.

The voltage has been almost remained constant, current has been maintained at the rated value, active power has been maintained at 1.2 times of the rated value and reactive power is maintained at zero pu as shown in Fig. 16. Table 9 represents the various parameters observed for different algorithms at PCC.

The DSTATCOM and DVR have been tested with three algorithms, namely, GSA, BAT and ANT algorithms for various conditions like fault occurrence, switching of

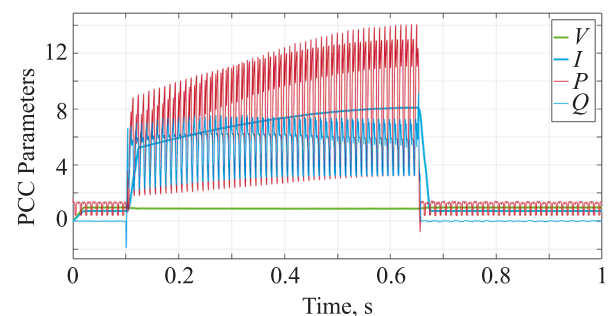


Fig. 15. PCC Parameters of power system with synchronous generator after applying DSTATCOM and GSA

Table 8. PCC Parameters with synchronous generator for GSA, BAT, ANT algorithms

Parameter, pu	GSA	BAT	ANT
Voltage	0.88	0.89	0.59
Current	7.30	5.20	2.70
Active power	12.10	8	1.80
Reactive power	7.40	7.10	3
Power factor	0.70	0.60	0.38

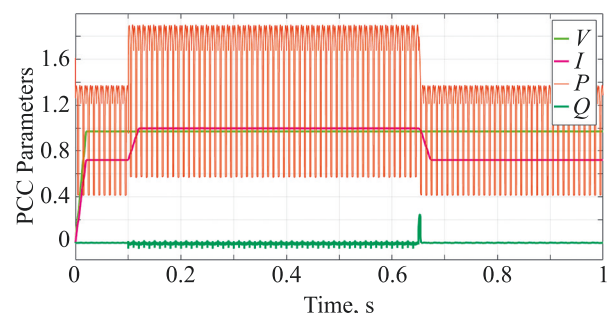


Fig. 16. PCC Parameters of power system with RLC load after applying DSTATCOM and GSA

Table 9. PCC Parameters with RLC load for GSA, BAT, ANT algorithms

Parameter, pu	GSA	BAT	ANT
Voltage	0.970	0.970	0.610
Current	0.998	0.990	0.630
Active power	1.9	1.9	1
Reactive power	0	0.0037	0
Power factor	0.920	0.926	0.975

synchronous generator, switching of induction generator, switching of RLC load where at every case DVR shows the better performance with GSA than DSTATCOM with comparison of remaining two algorithms.

References

- Hossain E., Tür M.R., Padmanaban S., Ay S., Khan I. Analysis and mitigation of power quality issues in distributed generation systems using custom power devices. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 16816–16833. <https://doi.org/10.1109/Access.2018.2814981>
- Afzal M.J., Arshad A., Ahmed S., Tariq S.B., Kazmi S.A.A. A review of DGs and FACTS in power distribution network: methodologies and objectives. *Proc. of the 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (ICOMET)*, 2018, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/Icomet.2018.8346405>
- Remya V.K., Parthiban P., Ansal V., Chitti Babu B. Dynamic Voltage Restorer (DVR) — A review. *Journal of Green Engineering*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 519–572.
- Khatoon N., Shaik S. Survey on different types of flexible ac transmission systems (FACTS) controllers. *International Journal of Engineering Development and Research*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 796–814.
- Bharti H., Arya J.S., Arya A.K. Power loss minimization with multiple DGs in distribution system using gravitational search algorithm. *International Journal of Engineering Development and Research*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 101–106.
- Kumar L., Kumar S., Kumar Gupta S., Raw B.K. Optimal location of FACTS devices for loadability enhancement using gravitational search algorithm. *Proc. of the IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 2019, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/I2CT45611.2019.9033561>
- Zhang J., Liu K., Liu Y., He S., Tian W. Active power decoupling and controlling for single-phase FACTS device. *The Journal of Engineering*, 2019, no. 16, pp. 1333–1337. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8823>
- Therattil J.P., Jose J., Prasannakumari R.P.N., Abo-khalil A.G., Alghamdi A.S., Rajalekshmi B.G., Sayed K. Hybrid control of a multi-area multi-machine power system with FACTS devices using non-linear modelling. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, vol. 14, no. 10, pp. 1993–2003. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1165>
- Geleta D.K., Manshahia M.S. Gravitational search algorithm-based optimization of hybrid wind and solar renewable energy system. *Computational Intelligence*, 2022, vol. 38, no. 3, pp. 1106–1132. <https://doi.org/10.1111/coin.12336>
- Rayudu K., Yesuratnam G., Jayalaxmi A. Bat algorithm and ant colony optimization based optimal reactive power dispatch to improve voltage stability. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2017, vol. 2, no. 6, pp. 27–35. <https://doi.org/10.24018/ejers.2017.2.6.378>
- Nagaraju G., Shankar S. Gravitational search algorithm for power quality improvement of WECS with UPQC. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 133–141. <https://doi.org/10.22266/ijies2019.0228.14>
- Chawda G.S., Shaik A.G., Mahela O.P., Padmanaban S., Holm-Nielsen J.B. Comprehensive review of distributed FACTS control

Conclusions

The analysis of performance of DVR, DSTATCOM with various algorithms, like GSA, BAT and ANT, has been presented in this paper. The modeling is done using MATLAB/ Simulink for solving the power quality issues like sag and swell. Three phase fault and external signal are implemented for the analysis of voltage sag and swell. The proposed system has been tested with switching of synchronous generator, induction generator, RLC load and occurrence of fault condition, and comparison has been performed among various algorithms in terms of supply voltage, supply current, active power, reactive power and power factor where DVR shows the better performance with GSA than DSTATCOM with comparison of remaining two algorithms by 5 %. In future, we plan to implement deep learning strategies and hybrid approaches to enhance the scalability of the power systems.

Литература

- Hossain E., Tür M.R., Padmanaban S., Ay S., Khan I. Analysis and mitigation of power quality issues in distributed generation systems using custom power devices // *IEEE Access*. 2018. V. 6. P. 16816–16833. <https://doi.org/10.1109/Access.2018.2814981>
- Afzal M.J., Arshad A., Ahmed S., Tariq S.B., Kazmi S.A.A. A review of DGs and FACTS in power distribution network: methodologies and objectives // *Proc. of the 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (ICOMET)*. 2018. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/Icomet.2018.8346405>
- Remya V.K., Parthiban P., Ansal V., Chitti Babu B. Dynamic Voltage Restorer (DVR) – A review // *Journal of Green Engineering*. 2018. V. 8. N 4. P. 519–572.
- Khatoon N., Shaik S. A survey on different types of flexible ac transmission systems (FACTS) controllers // *International Journal of Engineering Development and Research*. 2017. V. 5. N 4. P. 796–814.
- Bharti H., Arya J.S., Arya A.K. Power loss minimization with multiple DGs in distribution system using gravitational search algorithm // *International Journal of Engineering Development and Research*. 2018. V. 6. N 3. P. 101–106.
- Kumar L., Kumar S., Kumar Gupta S., Raw B.K. Optimal location of FACTS devices for loadability enhancement using gravitational search algorithm // *Proc. of the IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. 2019. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/I2CT45611.2019.9033561>
- Zhang J., Liu K., Liu Y., He S., Tian W. Active power decoupling and controlling for single-phase FACTS device // *The Journal of Engineering*. 2019. N 16. P. 1333–1337. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8823>
- Therattil J.P., Jose J., Prasannakumari R.P.N., Abo-khalil A.G., Alghamdi A.S., Rajalekshmi B.G., Sayed K. Hybrid control of a multi-area multi-machine power system with FACTS devices using non-linear modelling // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2020. V. 14. N 10. P. 1993–2003. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1165>
- Geleta D.K., Manshahia M.S. Gravitational search algorithm-based optimization of hybrid wind and solar renewable energy system // *Computational Intelligence*. 2022. V. 38. N 3. P. 1106–1132. <https://doi.org/10.1111/coin.12336>
- Rayudu K., Yesuratnam G., Jayalaxmi A. Bat algorithm and ant colony optimization based optimal reactive power dispatch to improve voltage stability // *European Journal of Engineering Research and Science*. 2017. V. 2. N 6. P. 27–35. <https://doi.org/10.24018/ejers.2017.2.6.378>
- Nagaraju G., Shankar S. Gravitational search algorithm for power quality improvement of WECS with UPQC // *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. 2019. V. 12. N 1. P. 133–141. <https://doi.org/10.22266/ijies2019.0228.14>
- Chawda G.S., Shaik A.G., Mahela O.P., Padmanaban S., Holm-Nielsen J.B. Comprehensive review of distributed FACTS control algorithms for power quality enhancement in utility grid with

- algorithms for power quality enhancement in utility grid with renewable energy penetration. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 107614–107634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000931>
13. Peres W. Robust design of modern multi-band PSS using gravitational search algorithm. *Proc. of the 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395558>
 14. Zhu L., He S., Wang L., Zeng W., Yang J. Feature selection using an improved gravitational search algorithm. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 114440–114448. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935833>
 15. Pervez I., Sarwar A., Tayyab M., Sarfraz M. Gravitational search algorithm (GSA) based maximum power point tracking in a solar PV based generation system. *Proc. of the 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/i-PACT44901.2019.8960130>
 16. Dorigo M., Stützle T. *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. 305 p.
 17. Dorigo M. *Optimization, learning and natural algorithms*. PhD thesis. Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992. (in Italian)
 18. Dorigo M., Maniezzo V., Colnani A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 1996, vol. 26, no. 1, pp. 29–41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>
 19. Bullnheimer B., Hartl R., Strauss C. A new rank based version of the Ant System: A computational study. *Central European Journal for Operations Research and Economics*, 1999, vol. 7, no. 1, pp. 25–38.
 20. Yang X.-S., He X. Bat algorithm: literature review and application. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 141–149. <https://doi.org/10.1504/ijbic.2013.055093>
- renewable energy penetration // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 107614–107634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000931>
13. Peres W. Robust design of modern multi-band PSS using gravitational search algorithm // *Proc. of the 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SBSE.2018.8395558>
 14. Zhu L., He S., Wang L., Zeng W., Yang J. Feature selection using an improved gravitational search algorithm // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 114440–114448. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935833>
 15. Pervez I., Sarwar A., Tayyab M., Sarfraz M. Gravitational search algorithm (GSA) based maximum power point tracking in a solar PV based generation system // *Proc. of the 2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/i-PACT44901.2019.8960130>
 16. Dorigo M., Stützle T. *Ant Colony Optimization*. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. 305 p.
 17. Dorigo M. *Optimization, learning and natural algorithms*: PhD thesis. Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1992. (in Italian)
 18. Dorigo M., Maniezzo V., Colnani A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 1996. V. 26. N 1. P. 29–41. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>
 19. Bullnheimer B., Hartl R., Strauss C. A new rank based version of the Ant System: A computational study // *Central European Journal for Operations Research and Economics*. 1999. V. 7. N 1. P. 25–38.
 20. Yang X.-S., He X. Bat algorithm: literature review and application // *International Journal of Bio-Inspired Computation*. 2013. V. 5. N 3. P. 141–149. <https://doi.org/10.1504/ijbic.2013.055093>

Authors

Kanchanapalli Bhavya — Researcher, Jawaharlal Nehru Technological University, Kakinada (JNTUK), Kakinada, 500085, India, <https://orcid.org/0000-0002-3498-6192>, bhavya.eee.08@gmail.com

Pokanati Veera Venkata Rama Rao — PhD, Professor, Maturi Venkata Subba Rao (MVSR) Engineering College, Hyderabad, 501510, India, <https://orcid.org/0000-0001-9243-0320>, draramaopvv@gmail.com

Lanka Ravi Srinivas — PhD, Professor, Gudlavalluru Engineering College, Gudlavalluru, 533003, India, <https://orcid.org/0000-0001-8409-5120>, lravisrinivas@gmail.com

Авторы

Бхавья Канчаналли — исследователь, Технологический университет Джавахарлала Неру, Какинада, Какинада, 500085, Индия, <https://orcid.org/0000-0002-3498-6192>, bhavya.eee.08@gmail.com

Рама Рао Поканати Веера Венката — PhD, профессор, Инженерный колледж Матури Венката Субба Рао (МВСР), Хайдарабад, 501510, Индия, <https://orcid.org/0000-0001-9243-0320>, draramaopvv@gmail.com

Рави Шринивас Ланка — PhD, профессор, Инженерный колледж Гудлаваллеру, Гудлаваллеру, 533003, Индия, <https://orcid.org/0000-0001-8409-5120>, lravisrinivas@gmail.com

Received 28.09.2022

Approved after reviewing 21.02.2023

Accepted 16.05.2023

Статья поступила в редакцию 28.09.2022

Одобрена после рецензирования 21.02.2023

Принята к печати 16.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-646-651

УДК 004.94+519.676

Оценка моментов квантованной случайной величины

Михаил Иванович Ломакин^{1✉}, Александр Владимирович Докукин²

^{1,2} Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, 121352, Российская Федерация

¹ mlomakin@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4191-1348>

² aldokukin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3342-8770>

Аннотация

Введение. Значительная часть исследований проблем квантования случайных величин посвящена практическим аспектам оптимального заполнения информации квантования. Для этих целей используют количественные характеристики квантуемых случайных величин, такие как математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение. При этом применяются известные параметрические распределения: равномерное, экспоненциальное, нормальное и др. В реальных ситуациях идентифицировать исходное параметрическое распределение по имеющейся статистической информации не представляется возможным. Предложена непараметрическая модель определения таких числовых характеристик квантуемой случайной величины как высшие начальные моменты. **Метод.** Математическая формализация задачи оценки высших начальных моментов квантованной случайной величины в условиях неполных данных, представленных малыми выборками. Формализация выполнена в виде модели оптимизации определенного интеграла от кусочно-непрерывной функции, удовлетворяющей определенным условиям. Итоговые оценки высших начальных моментов квантуемой случайной величины найдены как экстремальные (нижние и верхние) оценки определенного интеграла на множестве функций распределения с заданными моментами, равными выборочным моментам квантуемой случайной величины. **Основные результаты.** Представлена модель высших начальных моментов квантованной случайной величины в виде определенного интеграла от кусочно-непрерывной функции. Решена в общем случае задача нахождения экстремальных (нижних и верхних) оценок высших начальных моментов квантованной случайной величины на множестве функций распределения с заданными моментами. Приведены примеры нахождения высших начальных моментов и оптимального квантования случайной величины. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы специалистами при оценке и оптимизации квантования различной информации, представленной случайными сигналами.

Ключевые слова

случайная величина, выборка, квант, вероятность, моменты, функция распределения

Ссылка для цитирования: Ломакин М.И., Докукин А.В. Оценка моментов квантованной случайной величины // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 646–651. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-646-651

Estimation of the moments of a quantized random variable

Mikhail I. Lomakin^{1✉}, Alexander V. Dokukin²

^{1,2} All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies of the EMERCOM of Russia, Moscow, 121352, Russian Federation

¹ mlomakin@vniigoshs.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4191-1348>

² dokukin@vniigoshs.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3342-8770>

Abstract

A significant part of the research on the problems of quantization of random variables is devoted to practical aspects of optimal quantization in the sense of filling in information. For these purposes, certain quantitative characteristics of quantized random variables are used, such as: mathematical expectation, variance and mean square deviation. At the same time, to determine the quantitative characteristics of quantized random variables, as a rule, well-known parametric

© Ломакин М.И., Докукин А.В., 2023

distributions are used: uniform, exponential, normal and others. In real situations, it is not possible to identify the initial parametric distribution based on the available statistical information. In this paper, a nonparametric model is proposed for determining such numerical characteristics of a quantized random variable as the highest initial moments. The mathematical formalization of the problem of estimating the higher initial moments of a quantized random variable in the conditions of incomplete data represented by small samples of a quantized random variable is performed in the form of an optimization model of a certain integral of a piecewise continuous function satisfying certain conditions. The final estimates of the highest initial moments of the quantized random variable are found as extreme (lower and upper) estimates of a certain integral on a set of distribution functions with given moments equal to the sample moments of the quantized random variable. A model of the higher initial moments of a quantized random variable is presented in the form of a definite integral of a piecewise continuous function; in the general case, the problem of finding extreme (lower and upper) estimates of the higher initial moments of a quantized random variable on a set of distribution functions with given moments is solved. Examples of finding higher initial moments and optimal quantization of a random variable are given. The obtained results can be used by specialists in evaluating and optimizing the quantization of various information presented by random signals.

Keywords

random variable, sample, quantum, probability, moments, distribution function

For citation: Lomakin M.I., Dokukin A.V. Estimation of the moments of a quantized random variable. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 646–651 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-646-651

Введение

Преобразование, накопление и передача информации — основные процессы в информационных системах, определяющие эффективность их функционирования. В настоящее время данные процессы реализуются в цифровой форме. Это обусловлено тем, что цифровая информация более помехоустойчива, легче передается и обрабатывается. Для преобразования исходной информации, как правило, представленной непрерывными сигналами, в цифровую форму выполняют ее дискретизацию и квантование по уровню. Квантование по уровню состоит в переходе от непрерывного сигнала к его дискретному аналогу, когда множество непрерывных значений заменяется некоторым дискретным значением — уровнем. Различают равномерное квантование по уровню, при котором шаг постоянен, и неравномерное квантование по уровню, когда шаг квантования непостоянен. На практике преимущественное применение получило равномерное квантование в связи с простотой технической реализации [1, 2].

Вопросы оценки параметров квантованной случайной величины рассмотрены в большом количестве научных работ [2–16]. Работа [5] — одна из первых работ, в которой были изучены вопросы оценки характеристик квантованной случайной величины, где на основе использования аппарата характеристических функций выведены соотношения, связывающие моменты квантуемых и квантованных случайных величин. Эти соотношения позволяют оценить величину остаточной ошибки, возникающей при использовании поправок Шеппарда [5], а во многих случаях найти более точные поправочные формулы. Начальный момент (далее момент) порядка r квантованной случайной величины представлен в виде суммы двух составляющих. Первая составляющая является линейной комбинацией первых моментов неквантованной случайной величины и совпадает с выражением, которое обычно используется для моментов квантованной величины [5]. Вторая — комбинацией значений характеристической функции исходной величины и ее первых $r-1$ производных в определенных точках и определяет остаточную ошибку

для моментов квантованной величины при использовании. Если ограничиться только первой составляющей, то получим приближенное соотношение для связи моментов квантуемой и квантованной случайной величины. При этом отмечено, что использование приближенного выражения, связывающего моменты квантуемой и квантованной случайной величины, даст приемлемую точность не для «всякой случайной величины», т. е. не для любого распределения квантуемой случайной величины. Разработанный в работе [5] подход для оценки моментов квантуемой случайной величины является параметрическим и предполагает знание распределения квантуемой случайной величины, которое, как правило, неизвестно.

В [6, 7] решена задача разработки оптимальной модели квантования случайной величины по минимуму ошибки квантования, которая может обеспечиваться: увеличением числа уровней квантования; выбором оптимальных уровней квантования или комбинацией этих двух методов. При этом известна априорная информация о функции распределения или о плотности распределения случайной величины (входного сигнала) и использовано нормальное распределение для разработки оптимальной модели квантования.

В [8] предложен модифицированный алгоритм статистического моделирования систем со случайным периодом квантования. Предложенный алгоритм основан на численных методах решения стохастических дифференциальных уравнений и использует модифицированный метод максимального сечения, когда интенсивность перехода зависит от вектора состояния. Данный модифицированный алгоритм основан на имитации конкретных параметрических распределений.

В работах [9–14] в качестве основной модели квантования случайной величины применена модель, полученная в [9] следующего вида:

$$Mf(x) = (x + c) \int_0^{\infty} \left(E\left(\frac{t}{x}\right) + 1 \right) dF(t),$$

где $Mf(x)$ — математическое ожидание квантуемой случайной величины; $F(t)$ — функция распределения кван-

туемой случайной величины; x — величина кванта; c — величина пробела между квантами; E — наибольшая целая часть числа (отношение t/x).

В [9–14] исследован функционал $Mf(x)$ при различных распределениях $F(t)$: равномерном, нормальном, гипердельтном. Распределение $F(t)$ в реальной ситуации, как правило, неизвестно, тогда полученные результаты сложно практически использовать. Обычно известны только выборки значений квантуемой величины.

Постановка задачи

Обозначим случайную квантуемую величину как y , а величину кванта — x . На основании выборок значений величины y определим ее моменты по соотношениям:

$$m_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^j, j = \overline{1; l}; l > 0,$$

где m_j — j -й выборочный момент (момент порядка j); y_i — i -й элемент выборки $y_i > 0$ составляющие выборки $y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in R^n$, составляющие выборки $y_i > 0$ есть независимые одинаково распределенные величины из некоторого неизвестного распределения $F(t)$; y — квантуемая случайная величина ($y \in [0, Vr]$, $Vr < \infty$); n — объем выборки; l — количество моментов.

В настоящей работе использованы переменные с индексами (индексные или индексируемые переменные), например, y_i и переменные в степени, например, y_i^j или $(y_i)^j$.

Определим множество функций распределения F_0 квантуемой величины y , моменты распределения которой равны выборочным моментам m_j

$$F_0 = \{F(t): \int_0^\infty t^j dF(t) = m_j; j = \overline{1; l}; l > 0\}.$$

Задача состоит в поиске нижних и верхних оценок моментов квантованной величины

$$a = \left(\left(\text{ent} \left(\frac{y}{x} \right) + 1 \right) x \right)^j$$

на множестве F_0 функций распределения квантуемой величины y

$$m_{j\text{amin(max)}} = \min_{F(t) \in F_0} (\max) M \left(\left(\left(\text{ent} \left(\frac{y}{x} \right) + 1 \right) x \right)^j \right),$$

где M — оператор математического ожидания; $\text{ent}(c)$ — целая часть c .

Метод решения поставленной задачи

Найдем моменты дискретной случайной величины $b = \left(\text{ent} \left(\frac{y}{x} \right) + 1 \right)^j$. В соответствии с определением математического ожидания дискретной случайной величины b , имеем [15, 16]

$$m_{jb} = M \left(\left(\text{ent} \left(\frac{y}{x} \right) + 1 \right)^j \right) = \sum_{i=1}^{\infty} i^j P \left(\text{ent} \left(\frac{y}{x} \right) + 1 = i \right);$$

$$j = \overline{1; l}; l > 0.$$

$$\text{Условие } \text{ent} \left(\frac{y}{x} \right) + 1 = i \text{ тождественно неравенству}$$

$$x(i-1) \leq y < xi,$$

вероятность выполнения которого определяется соотношением

$$P(x(i-1) \leq y < xi) = F(xi) - F(x(i-1)),$$

тогда имеем

$$m_{jb} = \sum_{i=1}^{\infty} i^j (F(xi) - F(x(i-1))). \quad (1)$$

Выполнив преобразования правой части выражения (1), получим

$$m_{jb} = \sum_{i=1}^{\infty} i^j (F(xi) - F(x(i-1))) =$$

$$= - \sum_{i=1}^{k-1} F(xi) ((i+1)^j - i^j) + k^j (F(kx) +$$

$$+ \sum_{i=k+1}^{\infty} i^j (F(xi) - F(x(i-1)))).$$

С учетом того, что $y \in [0, Vr]$, $Vr < \infty$, для некоторого $k < \infty$ можно положить $F(kx) = 1$, тогда

$$m_{jb} = k^j - \sum_{i=1}^{k-1} F(xi) ((i+1)^j - i^j). \quad (2)$$

Преобразуем выражение (2) и получим

$$\sum_{i=1}^{k-1} F(xi) ((i+1)^j - i^j) =$$

$$= \int_0^x (kj - 1) dF(t) + \int_x^{2x} (kj - 2) dF(t) + \int_{2x}^{3x} (kj - 3) dF(t) + \dots$$

$$+ \int_{(k-2)x}^{(k-1)x} (kj - (k-1)) dF(t) = \int_0^{(k-1)x} f_c(t) dF(t),$$

где $f_c(t)$ — кусочно-непрерывная функция вида:

$$f_c(t) = \begin{cases} kj - 1 & \text{при } 0 \leq t < x; \\ kj - 2 & \text{при } x \leq t < 2x; \\ \dots & \dots \\ kj - (k-1) & \text{при } (k-2)x \leq t < (k-1)x. \end{cases}$$

В итоге получим

$$m_{jb} = \int_0^{(k-1)x} f_s(t) dF(t). \quad (3)$$

Определим из выражения (3) функцию $f_s(t)$ следующим образом:

$$f_s(t) = kj - f_c(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq t < x; \\ 2 & \text{при } x \leq t < 2x; \\ \dots & \dots \\ (k-1) & \text{при } (k-2)x \leq t < (k-1)x. \end{cases} \quad (4)$$

Воспользуемся некоторыми результатами из «теории решения проблемы моментов Маркова» [17]. Одна из формулировок проблемы моментов Маркова состоит

в следующем. «Заданы две конечные последовательности — последовательность чисел $\{m_i\}_0^l$ и последовательность непрерывных функций $\{u_i(t)\}_0^l (a \leq t \leq b)$. Требуется:

1) найти критерий представимости последовательности $\{m_i\}_0^l$ в виде:

$$m_i = \int_a^b u_i(t) dF(t), i = \overline{0, l}; \quad (5)$$

2) найти условия, при которых разрешимая проблема является определенной или неопределенной;
3) описать условия разрешения или не разрешения проблемы» [17].

Первая из экстремальных задач проблемы моментов Маркова — задача нахождения экстремальных значений интеграла

$$J = \int_a^\tau Q(t) dF(t),$$

где $a < \tau \leq b$; $Q(t)$ — подинтегральная непрерывная функция, имеющая неотрицательную $l + 1$ -ю производную; $F(t)$ — функция распределения, удовлетворяющая условию (5).

Имеет место следующее утверждение [17].

Утверждение 1. «При заданных значениях $l + 1$ моментов

$$m_i = \int_a^b u_i(t) dF(t), i = \overline{0, l}; \quad (6)$$

существует наименьшее значение J_{\min} интеграла

$$J = \int_a^b Q(t) dF(t), \quad (7)$$

и оно находится по правилу:

$$\text{если } l = 2v - 1, \text{ то } J_{\min} = \sum_{j=1}^v p_j Q(\tau_j), \quad (8)$$

где числа $p_j > 0 (j = \overline{1, v})$ и $0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_v < \infty$ определяются из равенств

$$\sum_{j=1}^v p_j u_i(\tau_j) = m_i, (i = \overline{0, l}). \quad (9)$$

Если $l = 2v - 2$, то минимум интеграла также определяется соотношением (8), числа $p_j > 0 (j = \overline{1, v})$ и $0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_v < \infty$ определяются из равенств (9).

Найдем максимальное значение интеграла (7) и воспользуемся утверждением [17].

Утверждение 2. «Если выполняется условие

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{Q(t)}{u_n(t)} \right) = c < \infty,$$

то J_{\max} при заданных моментах, определяемых выражением (6), существует и находится по следующему правилу: если $l = 2v - 1$, то

$$J_{\max} = \sum_{j=1}^v p_j Q(\tau_j) + cM, \quad (10)$$

где числа $p_j > 0 (j = \overline{1, v})$, $M > 0$, $0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_v < \infty$ определяются из равенств

$$\sum_{j=1}^v p_j u_i(\tau_j) = m_i, (i = \overline{0, l-1}). \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^v p_j u_i(\tau_j) + M = m_i, (i = l). \quad (12)$$

Если $l = 2v - 2$, то максимум интеграла также определяется соотношением (10), числа $p_j > 0 (j = \overline{1, v})$, $M > 0$, $0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_v < \infty$ определяются из равенств (11), (12).

Функция $Q(t)$ должна быть непрерывной и иметь неотрицательную $l + 1$ -ю производную» [17].

Данные утверждения в работе [18] обобщены на случай кусочно-непрерывных функций $Q(t)$, которые должны на участках непрерывности иметь неотрицательную $l + 1$ -ю производную, что соответствует рассматриваемой задаче, в которой подинтегральная функция $fs(t)$, определяемая соотношениями (4), является кусочно-непрерывной и имеет на участках непрерывности неотрицательную $l + 1$ -ю производную.

Данные утверждения использованы в работах авторов для решения различных оптимизационных задач в условиях неполной информации, представленной малыми выборками случайных величин [19–22].

Численный пример

Пусть известны данные по моментам случайной величины y соответственно m_1, m_2, m_3 , положим $x = 1$. Найдем нижние оценки моментов случайной величины

$$b = \left(\left(\text{ent} \left(\frac{y}{s} \right) + 1 \right) \right)^j.$$

Для нахождения нижних оценок моментов случайной величины b запишем уравнения (9) для переменных $p_j > 0 (j = 1, 2)$ и $0 < \tau_1 < \tau_2 < \infty$ следующего вида:

$$\begin{cases} p_1 + p_2 = 1, \\ p_1 \tau_1 + p_2 \tau_2 = m_1, \\ p_1 \tau_1^2 + p_2 \tau_2^2 = m_2, \\ p_1 \tau_1^3 + p_2 \tau_2^3 = m_3. \end{cases} \quad (13)$$

Тогда минимальное значение функционала (соотношение (8)) будет равно:

$$m_{jbmin} = p_1 fs(\tau_1) + p_2 fs(\tau_2), j = 1, 2, 3.$$

Величины нижних оценок моментов случайной величины b при различных исходных значениях моментов m_1, m_2, m_3 приведены в таблице. При $x = 1$ имеет место равенство $m_{jbmin} = m_{jamin}$. Оценки моментов найдем из решения системы нелинейных уравнений (13) с помощью программы Excel¹. В качестве оптимизируемой функции рассмотрим функцию $CF = p_1 + p_2 - 1$ соответствующую первому уравнению системы уравнений (13). Минимальное значение этой целевой функции должно быть равно 0, остальные уравнения — ограничения в оптимизационной задаче.

¹ Пункт «Поиск решения», подпункт «Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ (ОПГ — обобщенный приведенный градиент).

Таблица. Нижние оценки моментов
Table. Lower bounds for the moments

m_1	m_2	m_3	m_{1bmin}	m_{2bmin}	m_{3bmin}
5	50	750	5,191	55,131	877,122
7	98	2058	7,782	105,692	2131,174
8	128	3072	8,368	136,153	3321,492
9	162	4374	9,661	171,463	4547,158
10	190	5500	10,706	200,949	5690,859
11	240	6100	11,952	262,522	6847,336

Полученные оценки моментов могут быть использованы для решения различных задач оптимизации квантования. Например, задача оптимизации кванта может быть сформулирована следующим образом: найти x такое, что $x = \arg\min((x+c)m(1bmin))$.

Пусть известны данные по моментам случайной величины y соответственно $m_1 = 120h$, $m_2 = 14800h$, $c = 5h$, которые соответствуют результатам работы [13]. Найдём нижние оценки моментов случайной величины b .

Для нахождения нижних оценок моментов случайной величины β запишем уравнения (9) для переменных $p_j > 0$ ($j = 1, 2$) и $0 = \tau_1 < \tau_2 < \infty$ следующего вида:

$$\begin{cases} p_1 + p_2 = 1, \\ p_2 \tau_2 = m_1, \\ p_2 \tau_2^2 = m_2. \end{cases} \quad (14)$$

Тогда минимальное значение первого момента (соотношение (8)) будет равно:

$$m_{1\beta min} = p_1 f_s(\tau_1) + p_2 f_s(\tau_2).$$

Выполним преобразования соотношения (14) и получим следующее соотношение для нахождения оптимального кванта

$$m_{1\beta min} = \min_x \left(\left(\text{ent} \left(\frac{m_2}{(x+c)m_1} \right) \frac{m_1^2}{m_2} + \left(1 - \frac{m_1^2}{m_2} \right) \right) (x+c) \right).$$

Последняя задача — задача одномерного нелинейного программирования, которая решается численно. При имеющихся исходных данных получаем

$$x_{\text{опт}} = 37h, m_{1bmin} = 82,864h.$$

Заключение

Предложена модель оценки моментов квантованной случайной величины в условиях неполных данных, представленных ограниченными малыми выборками квантуемой случайной величины. На основе имеющихся выборок квантуемой случайной величины получены ее моменты и решена для общего случая задача нахождения нижних и верхних оценок моментов случайной квантованной величины с использованием результатов решения проблемы моментов Маркова. Приведены примеры нахождения соответствующих оценок моментов случайной квантованной величины, показана возможность использования оценок моментов квантованной случайной величины в задачах оптимизации квантования.

Литература

1. Рожков Н.Ф. Методы преобразования сигналов и помехоустойчивое кодирование. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2003. 107 с.
2. Орлов Ю.Н. Основы квантования вырожденных динамических систем. М.: МФТИ, 2004. 236 с.
3. Hering J.G. From slide rule to big data: how data science is changing water science and engineering // *Journal of Environmental Engineering*. 2019. V. 145. N 8. P. 02519001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001578](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001578)
4. An T. Science opportunities and challenges associated with SKA big data // *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*. 2019. V. 62. N 8. P. 989531. <https://doi.org/10.1007/s11433-018-9360-x>
5. Саванов В.Л. Влияние квантования на точность вычисления моментов случайных величин // *Автоматика и телемеханика*. 1972. № 10. С. 74–81.
6. Гризутенко С.С., Степанова Е.А. Оптимальное квантование случайной величины // *Техника радиосвязи*. 2011. № 16. С. 55–59.
7. Зачатейский Е.Д., Лаврухин А.А. Анализ и моделирование оптимизационных алгоритмов квантования сигналов для информационных систем // *Известия Транссиба. Информационные технологии, автоматика, связь, телекоммуникации*. 2013. № 2(14). С. 84–90.
8. Аверина Т.А. Модифицированный алгоритм статистического моделирования систем со случайным периодом квантования //

References

1. Rozhkov N.F. *Signal Conversion Methods and Noise-Immunity Coding*. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2003, 107 p. (in Russian)
2. Orlov Yu.N. *Basics of Quantization of Degenerate Dynamical Systems*. Moscow, MIPT Publ., 2004, 236 p. (in Russian)
3. Hering J.G. From slide rule to big data: how data science is changing water science and engineering. *Journal of Environmental Engineering*, 2019, vol. 145, no. 8, pp. 02519001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001578](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001578)
4. An T. Science opportunities and challenges associated with SKA big data. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2019, vol. 62, no. 8, pp. 989531. <https://doi.org/10.1007/s11433-018-9360-x>
5. Savanov V.L. Effect of quantization on random values moments calculation accuracy. *Automation and Remote Control*, 1972, vol. 3, no. 10, pp. 1626–1632.
6. Grizutenko S.S., Stepanova E.A. An optimum quantification of a random value. *Tekhnika radiosvyazi*, 2011, no. 16, pp. 55–59. (in Russian)
7. Zachateyskiy E.D., Lavruhin A.A. Analysis and simulation of an optimization algorithm for signals quantization. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2013, no. 2(14), pp. 84–90. (in Russian)
8. Averina T.A. Modified algorithm of statistical modeling of systems with a random quantization period. *Vestnik Saratovskogo*

- Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4. № 4(62). С. 212–218.
9. Андронов А.М., Бокоев Т.И. Оптимальное в смысле заполнения квантование информации // Известия АН СССР. Сер. Техническая кибернетика. 1979. № 3. С. 154–158.
 10. Смагин В.А., Парамонов И.Ю. Модель оптимального вероятностного квантования информации в пространстве с гарантированным ограничением зон влияния объемных квантов // Известия вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 1. С. 32–37. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-1-32-37>
 11. Смагин В.А., Бубнов В.П. Математическая модель детерминированных и случайных процессов в виде последовательного гиперфрактального распределения // Автоматика на транспорте. 2019. Т. 5. № 2. С. 148–159. <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-5-2-145-159>
 12. Смагин В.А., Бубнов В.П. Оптимальное в смысле заполнения квантование информации при наличии ошибок в квантах // Информация и космос. 2021. № 1. С. 40–48.
 13. Смагин В.А., Бубнов В.П., Султонов Ш.Х. Математические модели для расчета количественных характеристик оптимального квантования информации // Транспортные системы и технологии. 2021. Т. 7. № 1. С. 46–58. <https://doi.org/10.17816/transsyst20217146-58>
 14. Орлов А.И. Асимптотика квантования и выбор числа градаций в социологических анкетах // Математические методы и модели в социологии. М.: ИСИ АН СССР, 1977. С. 42–55.
 15. Боровков А.А. Теория вероятностей. М.: Наука, 1986. 432 с.
 16. Левин Б.Р., Шварц В. Вероятностные модели и методы в системах связи и управления. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.
 17. Крейн М.Г., Нудельман А.А. Проблема моментов Маркова и экстремальные задачи: Идеи и проблемы П.Л. Чебышева и А.А. Маркова и их дальнейшее развитие. М.: Наука, 1973. 551 с.
 18. Каштанов В.А. О минимаксных стратегиях при ограничениях на моменты распределений // Основные вопросы теории и практики надежности. М.: Советское радио, 1980. С. 143–154.
 19. Lomakin M., Buryi A., Dokukin A., Strekha A., Niyazova J., Balvanovich A. Estimation of quality indicators based on sequential measurements analysis // International Journal for Quality Research. 2020. V. 40. N 1. P. 147–162. <https://doi.org/10.24874/ijqr14.01-10>
 20. Ломакин М.И., Сухов А.В., Докукин А.В., Ниязова Ю.М. Оценка показателей надежности космических аппаратов в условиях неполных данных // Космические исследования. 2021. Т. 59. № 3. С. 235–239. <https://doi.org/10.31857/S0023420621030080>
 21. Buryi A.S., Lomakin M.I., Sukhov A.V. Quality assessment of “stress-strength” models in the conditions of big data // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2020. V. 9. N 3. P. 3276–3281. <https://doi.org/10.35940/ijitee.c8982.019320>
 22. Ломакин М.И., Ниязова Ю.М., Докукин А.В., Злыднев М.И., Гарин А.В. Оценка качества бизнес-процессов предприятия в условиях неполных данных // Сварочное производство. 2022. № 4. С. 52–58. <https://doi.org/10.34641/SP.2022.1049.4.030>
 23. gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2011, vol. 4, no. 4(62), pp. 212–218. (in Russian)
 24. Andronov A.M., Bokoev T.I. Optimal quantization of information in the sense of filling. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Tekhnicheskaya kibernetika*, 1979, no. 3, pp. 154–158. (in Russian)
 25. Smagin V.A., Paramonov I.Yu. Model of optimal probabilistic quantization of information in the space with guaranteed restriction of volume quantum influence zone. *Journal of Instrument Engineering*, 2016, vol. 59, no. 1, pp. 32–37. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-1-32-37>
 26. Smagin V.A., Bubnov V.P. Mathematical model of determinated and random processes in the form of consistent hyperfractal distribution. *Transport automation research*, 2019, vol. 5, no. 2, pp. 148–159. (in Russian). <https://doi.org/10.20295/2412-9186-2019-5-2-145-159>
 27. Smagin V.A., Bubnov V.P. Optimum in sense of filling quantization of the information in the presence of errors in quanta. *Information and Space*, 2021, no. 1, pp. 40–48. (in Russian)
 28. Smagin V.A., Bubnov V.P., Sultonov S.K. Mathematical models for calculating the quantitative characteristics of the optimal quantization of information. *Modern Transportation Systems and Technologies*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 46–58. (in Russian). <https://doi.org/10.17816/transsyst20217146-58>
 29. Orlov A.I. Asymptotics of quantization and the number of gradations choice in sociological questionnaires. *Mathematical Methods and Models in Sociology, Moscow, Institute of Philosophy of the USSR Academy of Science*, 1977, pp. 42–55. (in Russian)
 30. Borovkov A.A. *Probability Theory*. Moscow, Nauka Publ., 1986, 432 p. (in Russian)
 31. Levin B.R., Shvarte V. *Probabilistic Models and Methods in Communication and Control Systems*. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1985, 312 p. (in Russian)
 32. Krein M.G., Nudelman A.A. *The Markov Moment Problem and Extremum Problems: Ideas and Problems of P.L. Chebyshev and A.A. Markov and their Further Development*. Moscow, Nauka Publ., 1973, 551 p. (in Russian)
 33. Kаштанов В.А. On minimax strategies under restrictions on distribution moments. *Basic Questions of the Reliability Theory and Practice*, Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980, pp. 143–154. (in Russian)
 34. Lomakin M., Buryi A., Dokukin A., Strekha A., Niyazova J., Balvanovich A. Estimation of quality indicators based on sequential measurements analysis. *International Journal for Quality Research*, 2020, vol. 40, no. 1, pp. 147–162. <https://doi.org/10.24874/ijqr14.01-10>
 35. Lomakin M.I., Sukhov A.V., Dokukin A.V., Niyazova Y.M. Assessment of reliability indicators of space vehicles under conditions of incomplete data. *Cosmic Research*, 2021, vol. 59, no. 3, pp. 199–203. <https://doi.org/10.1134/S0010952521030072>
 36. Buryi A.S., Lomakin M.I., Sukhov A.V. Quality assessment of “stress-strength” models in the conditions of big data. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 3276–3281. <https://doi.org/10.35940/ijitee.c8982.019320>
 37. Lomakin M.I., Niyazova YU.M., Dokukin A.V., Zlydnev M.I., Garin A.V. Evaluation of the quality of business processes of an enterprise in conditions of incomplete data. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2022, no. 4, pp. 52–58. (in Russian). <https://doi.org/10.34641/SP.2022.1049.4.030>

Авторы

Ломакин Михаил Иванович — доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, 121352, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4191-1348>, mlomakin@yandex.ru

Докукин Александр Владимирович — доктор экономических наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, 121352, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3342-8770>, aldokukin@yandex.ru

Authors

Mikhail I. Lomakin — D.Sc. (Engineering), D.Sc. (Economics), Chief Researcher, All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies of the EMERCOM of Russia, Moscow, 121352, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4191-1348>, mlomakin@yandex.ru

Alexander V. Dokukin — D.Sc. (Economics), Chief Researcher, All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defence and Emergencies of the EMERCOM of Russia, Moscow, 121352, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3342-8770>, aldokukin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2023
Одобрена после рецензирования 25.04.2023
Принята к печати 31.05.2023

Received 20.02.2023
Approved after reviewing 25.04.2023
Accepted 31.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-652-658

УДК 621.3.088

Экспериментальный метод оценки динамической погрешности приборов и датчиков в условиях их эксплуатации

Дмитрий Геннадиевич Грязин¹, Ольга Олеговна Белова²✉

^{1,2} АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ volnagdg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>

² olga_o_belova@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7924-7169>

Аннотация

Введение. Рассмотрены существующие методы и оборудование для определения динамических характеристик приборов и систем. Предложен новый метод оценки динамической погрешности навигационных приборов. Метод позволит упростить экспериментальную оценку динамической погрешности при контроле характеристик серийных изделий, а также оценить значение погрешности в условиях реальных возмущающих воздействий, соответствующих условиям эксплуатации с использованием испытательного оборудования.

Метод. Предложенный метод основан на измерении прибором воспроизводимых стеном псевдослучайных испытательных воздействий в заданном спектре частот, соответствующим условиям эксплуатации прибора. При этом дисперсия динамической погрешности исследуемого прибора определяется как площадь под графиком ее спектральной плотности. **Основные результаты.** Для реализации метода использован специализированный стенд, позволяющий воспроизводить колебания в заданном спектре частот. Приведены результаты применения разработанного метода при решении задач оценки динамических погрешностей электронного кренометра. Результаты экспериментальных исследований согласуются с полученными ранее результатами натурных исследований. **Обсуждение.** Разработанный метод позволяет сократить время оценки динамической погрешности серийно выпускаемых датчиков и приборов до 15–20 мин, так как не требует выполнения измерений на каждой частоте в отдельности. Получена возможность оценки погрешности приборов в реальных режимах эксплуатации.

Ключевые слова

динамическая погрешность, спектральная плотность, условия эксплуатации, стенды, испытания, электронный кренометр

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00090.

Авторы выражают благодарность А.П. Белянцеву за помощь в обработке экспериментальных данных.

Ссылка для цитирования: Грязин Д.Г., Белова О.О. Экспериментальный метод оценки динамической погрешности приборов и датчиков в условиях их эксплуатации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 652–658. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-652-658

Experimental method for estimating the dynamic error of devices and sensors under their operating conditions

Dmitry G. Gryazin¹, Olga O. Belova²✉

^{1,2} State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

¹ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ volnagdg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>

² olga_o_belova@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7924-7169>

Abstract

Existing methods and equipment for determining the dynamic characteristics of devices and systems are considered. A new method for estimating the dynamic error of navigation devices is proposed. It makes it possible to simplify

© Грязин Д.Г., Белова О.О., 2023

the experimental assessment of the dynamic error of serial products as well as to evaluate its value under conditions of real disturbing influences corresponding to operating conditions using test equipment. The method is based on the measurement by the device of pseudo-random test effects reproduced by the stand in a given frequency spectrum corresponding to the operating conditions of the instrument. In this case, the variance of the dynamic error of the device under study is determined as the area under the graph of its power spectral density. To implement the method, it is proposed to use a specialized stand that allows to reproduce oscillations in a given frequency spectrum. The results of the application of the developed method in solving the problems of estimating the dynamic errors of the electronic inclinometer are presented. The results of experimental studies are consistent with the results of field tests obtained earlier. The developed method makes it possible to reduce the time for estimating the dynamic error of sensors and devices to 15–20 minutes because it does not require measurements at each frequency separately, and also allows to evaluate the error of devices in real modes of its operation.

Keywords

dynamic error, spectral density, operating conditions, stands, tests, electronic inclinometer.

Acknowledgements

The study was funded by Russian Science Foundation, Project No. 23-29-00090.

The authors are grateful to A.P. Belyantsev for his help in processing the experimental data.

For citation: Gryazin D.G., Belova O.O. Experimental method for estimating the dynamic error of devices and sensors under their operating conditions. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 652–658 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-652-658

Введение

Теоретические основы исследований динамических погрешностей (ДП) при различных видах входных воздействий предложены в многочисленных научных работах, например в [1–4]. Для судовых приборов и датчиков характерно полигармоническое входное воздействие в некоторой полосе частот.

Характеристики измерительных каналов приборов и датчиков нормируются в технических условиях для гироскопических приборов и инерциальных датчиков. При этом к числу нормируемых характеристик во многих случаях относятся: время готовности; масштабный коэффициент и его изменение; средняя квадратическая погрешность; уровень шума; дрейф в пуске; устойчивость к внешним возмущающим факторам; изменение характеристик от пуска к пуску и др. [5, 6]. В связи со сложностью экспериментальных работ и продолжительностью измерений ДП и полоса рабочих частот, как правило, не нормируются. При проведении конструкторских испытаний эти характеристики определяются расчетным путем или косвенным методом, например по времени переходного процесса [7].

Разработка всеширотных автоматизированных систем управления движением морских судов, работающих в условиях значительной качки судна, слеминга и вибрации его корпуса, появление высокоскоростных судов на подводных крыльях и воздушной подушке, приборы которых имеют значительные динамические возмущения, привели к необходимости достоверной оценки ДП современных гироскопических датчиков в широкой полосе частот. Отдельной задачей является оценка ДП информационного канала прибора, например измерителя крена, в реальных условиях эксплуатации на конкретном судне в условиях конкретной качки, которая может отличаться от заявленной в технических условиях ДП в полосе рабочих частот. Отметим, что информация о реальной ДП информационных каналов гироскопических приборов и их датчиков позволяет повысить качество проектирования систем управления судном. Кроме того, подобная оценка погрешности

может носить арбитражный характер при проведении анализа нештатных ситуаций. В настоящее время построенные в России гражданские суда не редко оснащаются импортной навигационной аппаратурой. Оценка метрологических характеристик современных гироскопических датчиков и модулей в динамическом режиме будет способствовать созданию новых систем управления традиционными и высокоскоростными судами, повышению качества выпускаемых приборов, но и позволит сертифицировать приборы и датчики в соответствии со стандартами IEEE, что безусловно приведет к вытеснению с отечественных судов импортной аппаратуры и расширит круг ее потребителей на международном рынке.

Очевидно, что исследование ДП измерительного канала гироскопического прибора и инерциальных датчиков в нормируемой полосе частот для решения поставленных задач требует разработки нового метода и технических средств для его реализации.

Постановка задачи исследований

Как известно ДП¹ определяется разностью между погрешностью средства измерений в динамическом режиме и его статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент времени. Ее значение является определяющим при эксплуатации навигационных приборов подвижных объектов.

Для оценки ДП приборов в связи с простотой реализации наибольшее распространение получил метод сопоставления параметров последовательно зарегистрированных гармонических входных воздействий на выбранной частоте, в интересующей полосе частот, с соответствующими параметрами выходного сигнала прибора [8].

Для исследования ДП приборов, вырабатывающих углы крена и дифферента, а также систем стабилизации

¹ РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения. М. Стандартинформ, 2014. 55 с.

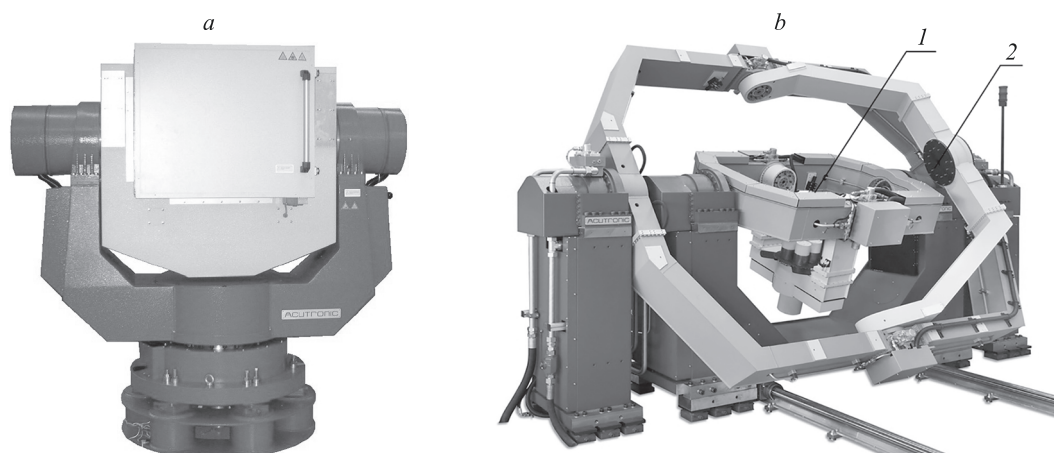


Рис. 1. Трехосный Acutronic AC33V-T450¹ (a) и пятиосный Acutronic HD55H-T65.60² (b) стелы
1 — платформа для закрепления испытуемой системы; 2 — шайба для установки цели

Fig. 1. Three-axis Acutronic AC33V-T450 (a) and five-axis Acutronic HD55H-T65.60 (b) stands
1 — platform for fixing the system under test, 2 — table for setting the target

и управления подвижными объектами часто используют специализированные многоосные стелы качки [9, 10].

На рис. 1, a представлен трехосный стел фирмы Acutronic², используемый для калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем, а на рис. 1, b — пятиосный стел, предназначенный для испытания систем астрокоррекции подвижных объектов и головок самонаведения ракет. Особенность пятиосного стела — возможность воспроизведения не только колебаний в трех плоскостях испытуемой системы, закрепленной на платформе 1, но и углового разворота цели относительно прибора в двух плоскостях. При этом цель — оптический имитатор звезды или термоизлучатель, устанавливается на отдельных рамках на шайбе 2.

Заслуживает внимания стел для оценки влияния динамических воздействий на системы управления ядерными энергетическими установками (рис. 2) [11]. Он представляет собой раскачивающуюся в двух плоскостях раму, установленную на крестообразном подвесе, на которую помещается исследуемый объект. Стел может осуществлять колебания, изменяющиеся по гармоническому закону, в двух ортогональных плоскостях.

Таким образом, задача исследования ДП навигационных приборов и систем управления подвижными объектами обычно решается с помощью применения различных стелов, в большинстве своем специализированных. Выполняется сопоставление параметров последовательных гармонических входных воздействий с соответствующими параметрами выходного сигнала прибора в рабочем диапазоне частот. Недостаток данного метода — невозможность оценки ДП при-

боров и систем при воздействии на них конкретных возмущений, соответствующих условиям их эксплуатации. Например, качки конкретного судна на различном волнении с параметрами, характеризующими реальные условия эксплуатации прибора. Отметим, что при исследовании ДП приборов необходимо задавать гармонические воздействия последовательно на каждой частоте во всем исследуемом диапазоне, что представляется затратным.

Задача настоящей работы — разработка метода оценки ДП гироскопов, позволяющего сократить время экспериментальных работ при серийном про-



Рис. 2. Общий вид стела для испытаний ядерных энергетических установок [11]

Fig. 2. Overall view of the test stand for nuclear power systems

¹ Acutronic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.acutronic.com/simulation-test/3-axis-rate-tables/swiss-3-axis-rate-table-series-ac33v-t>, свободный (дата обращения: 20.11.2022).

² Acutronic [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.acutronic.com/>, свободный (дата обращения: 20.11.2022).

изводстве, а также уточнить значение погрешности в конкретных условиях эксплуатации приборов при исследовательских и арбитражных метрологических работах. Решение указанной задачи позволит уменьшить производственные затраты и себестоимость приборов, а также предоставит дополнительную информацию о динамической точности приборов.

Метод оценки динамической погрешности приборов и датчиков

Для сокращения времени оценки ДП навигационных приборов и исследования ее значений в реальных режимах эксплуатации целесообразно задать возмущающие воздействия не последовательно на каждой из частот, а сделать их псевдослучайными, стационарными и соответствующими заданному спектру частот. Задаваемый спектр частот необходимо выбрать исходя из реальных условий эксплуатации прибора или характеристик, указанных в документации на прибор. Исследования спектров периодических, непериодических и почти периодических функций выполнены в рамках создания классической теории информации [12, 13], они получили развитие в работе [14], а применительно к решению инженерных задач — в [15, 16].

Предлагаемый метод оценки использует расчет спектральных характеристик погрешности путем перехода из временной области в частотную с помощью преобразования Фурье [17, 18]. Это позволит оценить дисперсию погрешности прибора в задаваемом частотном диапазоне.

Пусть $x(t)$ — входной сигнал испытательного стенда (эталонное входное воздействие), $y(t) = x(t) + \varepsilon(t)$ — выходной сигнал прибора, где $\varepsilon(t)$ — ДП прибора. Тогда $\varepsilon(t) = y(t) - x(t)$.

Определим спектральную плотность погрешности $S_\varepsilon(f)$, в соответствии с теоремой Винера–Хинчина [13], как одностороннее преобразование Фурье от корреляционной функции погрешности:

$$S_\varepsilon(\omega) = 2 \int_0^\infty R_\varepsilon(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (1)$$

где $R_\varepsilon(\tau)$ — корреляционная функция погрешности; τ — интервал корреляции; ω — круговая частота.

Поскольку сигналы на входе и выходе прибора являются коррелированными, то

$$R_\varepsilon(\tau) = R_x(\tau) + R_y(\tau) - R_{xy}(\tau) - R_{yx}(\tau), \quad (2)$$

где $R_x(\tau)$ и $R_y(\tau)$ — автокорреляционные функции сигнала со стенда и выходного сигнала прибора; $R_{xy}(\tau)$ и $R_{yx}(\tau)$ — взаимные корреляционные функции сигнала со стенда и прибора.

Подставив выражение (2) в (1), получим спектральную плотность погрешности исследуемого прибора, которая характеризует дисперсию его погрешности во всем частотном диапазоне. Искомую дисперсию определим как площадь под графиком полученной спектральной плотности:

$$D = \sigma^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S(\omega) d\omega.$$

Среднеквадратичное отклонение (СКО) ДП σ микромеханического датчика или инерциального измерительного модуля найдем как $\sigma = \sqrt{D}$.

Метод предполагает использование испытательного оборудования, способного воспроизводить колебания в спектре частот, охватывающем весь частотный диапазон работы исследуемого объекта. Метод реализован следующим образом.

1. После установки прибора на стенд выполним запись характеристик, задаваемых стендом $x(t)$, и характеристик, воспроизводимых датчиком или модулем $y(t)$.
2. С помощью программы обработки данных, реализованной, например, в программной среде MATLAB, произведем расчет авто- и взаимных корреляционных функций входного сигнала со стенда и сигнала с исследуемого прибора, и корреляционной функции ДП по формуле (2). При этом интервал корреляции τ определим в зависимости от частоты дискретизации данных и времени записи.
3. Путем преобразования Фурье полученной корреляционной функции ДП осуществим расчет спектральной плотности ДП по формуле (1), площадь под графиком которой определит искомые дисперсию и СКО ДП.

Отметим, что вид полученного графика спектральной плотности характеризует особенности ДП исследуемого прибора, и позволяет определить, например, наличие низкочастотного дрейфа или высокочастотных шумов. Эти данные можно использовать при исследовательских или арбитражных метрологических работах. Однако в большинстве случаев в условиях производства достаточно знания значения СКО ДП.

Преимущества разработанного метода заключаются в том, что время, необходимое для определения ДП приборов, сокращается в несколько раз за счет исключения необходимости испытаний на каждой частоте в отдельности и составляет не более 10–15 мин. Кроме того, метод позволяет оценить ДП прибора в режиме конкретных возмущающих воздействий на судне, при этом спектры качки судов известны или могут быть рассчитаны.

Верификация предложенного метода

Произведем верификацию метода с использованием электронного кренометра (ЭК), представляющего малогабаритную гировертикаль на микромеханических гироскопах и акселерометрах.

С целью оценки значения ДП ЭК применим стенд [19], имитирующий бортовую качку судна. При этом стенд позволяет воспроизводить качку как с одним заданным периодом, так и полигармоническую качку с заданным спектром частот. Управление стендом осуществим с помощью компьютера (рис. 3). При экспериментальных исследованиях на платформе стенда установим ЭК, сигнал которого синхронно запишем на втором компьютере. Исследования состоят из двух этапов.

Предложенный метод предполагает, что исследуемый прибор имеет линейную передаточную характери-



Рис. 3. Стенд качки с установленным электронным кренометром
Fig. 3. Pitching stand with installed electronic inclinometer (EI)

стику. На первом этапе произведем оценку указанного предположения. Для этого выполним исследование коэффициента передачи ЭК при гармонических входных воздействиях, задаваемых с помощью стенда качки в рабочем диапазоне частот. Исследования проведем традиционным способом, путем сравнения воспроизводимых стендом качки гармонических колебаний

с известной частотой и амплитудой с результатами измерений прибора. Условия испытаний: диапазон периодов качки от 3 до 10 с и амплитуды $\pm 2^\circ$, $\pm 5^\circ$ и $\pm 10^\circ$ (таблица).

Из таблицы видно, что масштабный коэффициент ЭК в диапазоне задаваемых частот имеет значение 0,995, а его погрешность составляет $\pm 0,005$, что подтверждает линейность системы измерения угла крена.

На втором этапе исследований выполним непосредственные исследования предложенного метода. Для этого используем результаты проведенных ранее натурных испытаний. В натурных условиях была выполнена оценка погрешности ЭК методом сравнения с эталонным прибором. Эксперимент выполнялся на судне, водоизмещением 100 т. Во время эксперимента были записаны реализации бортовой качки с ЭК, а также с бесплатформенной инерциальной системы, построенной на волоконных гироскопах и имеющей точность на порядок выше исследуемой. Запись реализаций производилась за интервал времени 15 мин. Погрешность ЭК, полученная при натурных испытаниях путем сравнения с эталонным прибором, составила $0,28^\circ$.

Очевидно, что указанные реализации характеризуют реальные условия эксплуатации прибора, на их основе построим амплитудный спектр (далее — спектр) качки судна (рис. 4, а). Далее в лабораторных условиях выполним подбор амплитуд и периодов гармонических колебаний стенда. После установки ЭК на стенд за-

Таблица. Коэффициент передачи электронного кренометра при различных условиях качки
Table. EI gain at various pitching parameters

Амплитуда качки	Период качки, с			
	3	5	7	10
	Коэффициент передачи			
$\pm 2^\circ$	0,994	0,992	0,992	0,990
$\pm 5^\circ$	0,997	0,994	0,994	0,995
$\pm 10^\circ$	0,997	0,998	0,997	0,995

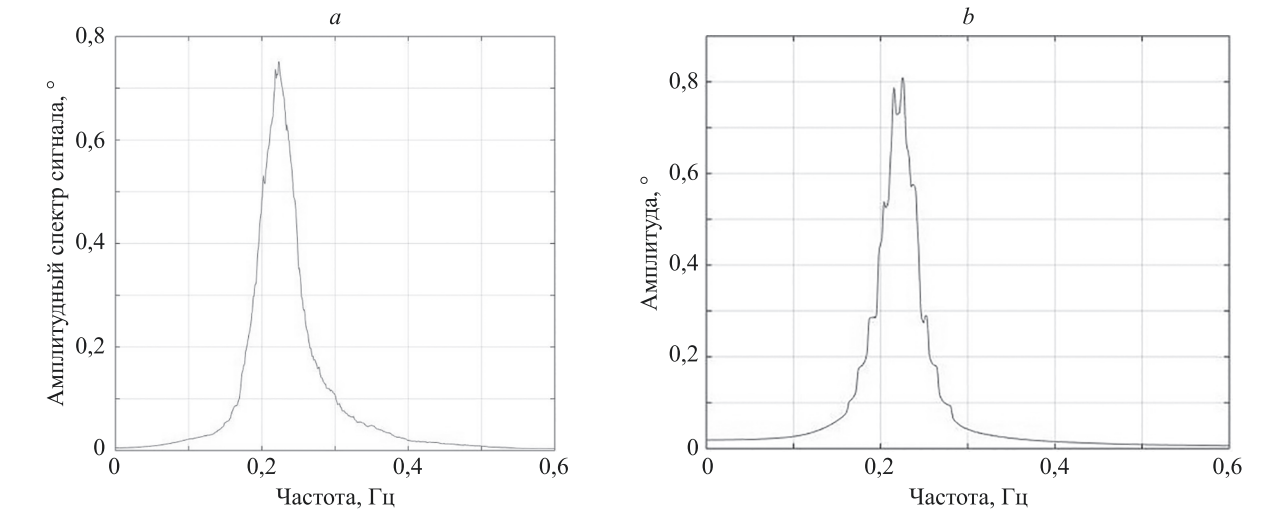


Рис. 4. Амплитудные спектры качки, построенные по реализациям, полученным на: натурных испытаниях (а) и воспроизводимые на стенде (b)

Fig. 4. Pitching amplitude spectrum: based on data from field tests (a); set at the pitching stand (b)

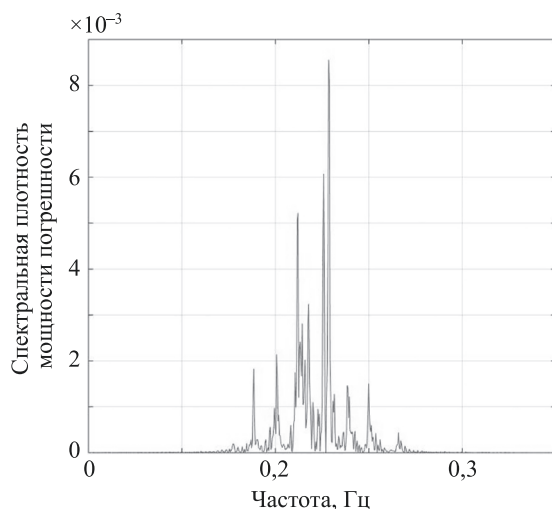


Рис. 5. График спектральной плотности погрешности электронного кренометра

Fig. 5. Power spectral density of EI error

дадим полигармонические колебания, спектр которых приближен к реальному спектру качки, полученному на судне (рис. 4, b).

С использованием реализаций, воспроизводимых стендом колебаний, длительностью 15 мин и записей выходного сигнала ЭК рассчитаем корреляционную функцию погрешности с использованием формулы (2). С помощью преобразования Фурье построим график спектральной плотности мощности погрешности ЭК (рис. 5). Из графика видно, что в показаниях ЭК отсутствует низкочастотный дрейф и высокочастотные шумовые составляющие.

Литература

1. Денисенко В. Динамическая погрешность измерительных каналов АСУ ТП // Современные технологии автоматизации. 2011. № 2. С. 92–101.
2. Ривкин С.С. Расчет динамических погрешностей гироскопических устройств на качающемся основании. Научно-производственное объединение «Азимут», 1991. 96 с.
3. Гравовский В.А. Динамические измерения: учебное пособие. Л.: СЗПИ, 1987. 86 с.
4. Захаров И.П., Сергиенко М.П. Метрологическая идентификация динамических характеристик средств измерительной техники. Харьков: СМИТ, 2012. 226 с.
5. Челпанов И.Б., Ефстифеев М.И., Кочетков А.В. Методы испытаний микромеханических датчиков и приборов // Приборы. 2014. № 4(166). С. 16–20.
6. Вавилов В.Д., Тимошенко С.П., Тимошенко А.С. Микро-системные датчики физических величин: монография в двух частях. М.: Техносфера, 2018. 550 с.
7. Нахов С.Ф., Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Депутатова Е.А., Skorobogatov V.V., Nikolaenko A.Iu. Опыт проектирования и изготовления блоков измерителей линейного ускорения на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговой и цифровой системами управления. Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Ю.А.Гагарина, 2021. 240 с.
8. Грязин Д.Г. Расчет и проектирование буюв для измерения морского волнения. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2000. 134 с.
9. Калихман Д.М. Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. 296 с.

Дисперсию погрешности ЭК определим как площадь под указанным графиком, СКО погрешности ЭК при этом составило $0,36^\circ$, что согласуется с погрешностью ЭК, полученной при натурных исследованиях. Очевидно, что разница в указанных значениях СКО объясняется погрешностью эксперимента и воспроизведения задаваемого спектра качки.

Результаты экспериментальных исследований показали, что разработанный метод позволяет производить оценку ДП приборов в условиях, наиболее приближенных к реальным условиям эксплуатации. При этом время, необходимое для проведения исследований, сокращается в 5 раз и составляет не более 15 мин с последующей обработкой данных. При этом полученные результаты хорошо согласуются с результатами полученных ранее исследований.

Заключение

Предложенный метод оценки динамической погрешности гироскопических приборов не требует испытаний прибора на каждой частоте в отдельности и позволяет сократить время экспериментальных исследований при серийном производстве.

Метод дает возможность уточнять значение погрешности и получать дополнительную информацию о динамической точности приборов в конкретных условиях их эксплуатации.

Осуществлена успешная верификация метода на специализированном стенде, способном воспроизводить колебания в заданном спектре частот, при этом были использованы характеристики реальной качки судна и результаты натурных испытаний аппаратуры.

References

1. Denisenko V. Dynamic error in measuring channels of process control system. *Sovremennye tehnologii avtomatizacii*, 2011, no. 2, pp. 92–101. (in Russian)
2. Rivkin S.S. *Dynamic Errors Calculation of Gyroscopic Devices on an Oscillating Base*. NPO Azimut Publ., 1991, 96 p. (in Russian)
3. Granovskii V.A. *Dynamic Measurements*. Leningrad, SZPI Publ., 1987, 86 p. (in Russian)
4. Zakharov I.P., Sergienko M.P. *Metrological Identification of the Dynamic Characteristics of Measuring Equipment*. Kharkiv, SMIT Publ., 1012, 226 p. (in Russian)
5. Chelpanov I.B., Kochetkov A.V., Evstifeev M.I. Test methods of micromechanical sensors and devices. *Instruments*, 2014, no. 4(166), pp. 16–20. (in Russian)
6. Vavilov V.D., Timoshenko S.P., Timoshenko A.S. *Microsystem Sensors of Physical Values*. Moscow, Technosfera Publ., 2018, 550 p. (in Russian)
7. Nakhov S.F., Kalikhman D.M., Kalikhman L.Ia., Deputatova E.A., Skorobogatov V.V., Nikolaenko A.Iu. *Experience in Design and Manufacture of Linear Acceleration Meters Units Based on Quartz Pendulum Accelerometers With Analog and Digital Control Systems*. Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov Publ., 2021, 240 p. (in Russian)
8. Griazin D.G. *Calculation and Design of Buoys for the Confused Sea Measurements*. St. Petersburg, Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2000, 134 p. (in Russian)
9. Kalikhman D.M. *Precision Controlled Stands for Dynamic Testing of Gyroscopic Devices*. St. Petersburg, State Research Center of the

10. Грязин Д.Г., Величко О.О., Чекмарев А.Б. Метрологическое обеспечение испытаний микромеханических датчиков и модулей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 7. С. 67–77.
11. Сатаев А.А. Системный анализ и модели теплогидравлических процессов в оборудовании судовых ЯЭУ при воздействии внешних динамических сил: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нижегородский государственный политехнический университет им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2022. 23 с.
12. Харкевич А.А. Спектры и анализ / 2-е изд. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953. 215 с.
13. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука, 1968. 449 с.
14. Розин А.М. Теория информации и связи. М.: Энергия, 1971. 184 с.
15. Лэнди Р., Дэвис Д., Албрехт А. Справочник радиоинженера. М., Л.: Госэнергоиздат, 1961. 704 с.
16. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы. М.: Наука, 1974. 832 с.
17. Грязин Д.Г., Величко О.О. Способ определения динамических погрешностей микромеханических инерциальных датчиков и инерциальных измерительных модулей на их основе. Патент RU2546983. Бюл. 2015. № 10.
18. Gryazin D., Belova O. The method for estimating the dynamic error of sensors and modules under their operating conditions and its application // Proc. of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 777–781. <https://doi.org/10.1109/rusautocon54946.2022.9896370>
19. Грязин Д.Г., Гороховский К.С. Новые средства контроля динамических погрешностей магнитных компасов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 567–575. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-567-575>
- Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, 2008, 296 p. (in Russian)
10. Gryazin D.G., Velitchko O.O., Chekmarev A.B. Measurement assurance of micromechanical sensors and units testing. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2012, no. 7, pp. 67–77. (in Russian)
11. Sataev A.A. *System analysis and models of thermal-hydraulic processes in the equipment of shipboard NPPs under the influence of external dynamic forces*. Dissertation abstract for the degree of candidate of technical sciences, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2022, 23 p. (in Russian)
12. Kharkevich A.A. *Spectra and Analysis*. 2nd ed. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1953, 215 p. (in Russian)
13. Sveshnikov A.A. *Applied Methods of the Random Functions Theory*. Moscow, Nauka Publ., 1968, 449 p. (in Russian)
14. Rosin A.M. *Information and Communication Theory*. Blackie, 1966. 175 p.
15. Landee R.W., Davis D.C., Albrecht A.P. *Electronic Designers' Handbook*. McGraw-Hill, 1957.
16. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review*. McGraw-Hill, 1968, 1130 p.
17. Gryazin D.G., Velichko O.O. method for determining dynamic errors of micromechanical inertial sensors and inertial measurement modules on their basis. *Patent RU2546983*. 2015. (in Russian)
18. Gryazin D., Belova O. The method for estimating the dynamic error of sensors and modules under their operating conditions and its application. *Proc. of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2022, pp. 777–781. <https://doi.org/10.1109/rusautocon54946.2022.9896370>
19. Gryazin D.G., Gorokhovskiy K.S. New tools for monitoring the dynamic errors of magnetic compasses. *Journal of Instrument Engineering*, vol. 64, no. 7, pp. 567–575. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-567-575>

Авторы

Грязин Дмитрий Геннадиевич — доктор технических наук, профессор, главный метролог – начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 25638150600](https://orcid.org/0000-0003-3562-6815), <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>, volnagdg@yandex.ru

Белова Ольга Олеговна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc 57190378217](https://orcid.org/0000-0001-7924-7169), <https://orcid.org/0000-0001-7924-7169>, olga_o_belova@mail.ru

Authors

Dmitry G. Gryazin — D.Sc., Professor, Chief Metrologist, Head of Department, State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 25638150600](https://orcid.org/0000-0003-3562-6815), <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>, volnagdg@yandex.ru

Olga O. Belova — PhD, Senior Researcher, State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc 57190378217](https://orcid.org/0000-0001-7924-7169), <https://orcid.org/0000-0001-7924-7169>, olga_o_belova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.02.2023

Одобрена после рецензирования 21.04.2023

Принята к печати 30.05.2023

Received 25.02.2023

Approved after reviewing 21.04.2023

Accepted 30.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-659-667

Method of type-C liquefied natural gas tank modeling based on volume optimization for future “milk-run” exploitation

Lev V. Ivanov¹✉, Alexander Yu. Baranov², Anna V. Novitskaya³

^{1,2,3} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² R&D KRION LLC, Saint Petersburg, 197375, Russian Federation

¹ levladiv@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6916-7154>

² abaranov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9263-8153>

³ vasilenok_anna@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7100-6635>

Abstract

Common practice methods of tank design for transportation of liquefied natural gas don't take into account the specifics of the gas carriers operation under the condition of partial filling of cryogenic tanks. A new method for designing of type-C tank is proposed. Method is based on solving the problem of increasing the volume of transported liquefied natural gas by small-scale inland carriers. The method is based on usage of a number of limiting parameters: minimal allowable ventless operation time, allowable values of the ship's draft, and the actual duration of voyages between neighboring consumers. The method allows optimizing type, shape, wall thickness, and heat insulation thickness of cryogenic tank. The proposed method is aimed at enlargement of usage of the ship's hull dimensions. This is achieved by changing the diameter, the distance between centers of the bi-lobe tank, the thickness of the insulation, and the maximum allowable working pressure. An increase in the volume of the tank is achieved by coordination such parameters as the maximum allowable draft of the vessel, the minimum time of ventless storage, and the time of ventless operation under partial filling conditions. The calculation of the ventless operation time is determined by the operating conditions of type-C tanks. The calculation of the heat ingress into the tank takes into account the contact area of liquefied gas and its vapors with the metal wall of the tank. The calculations do not take into account the assumption of thermal equilibrium between the liquid and vapor fractions, which leads to the need to take into account heat transfer from vapor to liquid. The implementation of the method is shown on the example of the modeling of the two-way river-sea type vessel. It is shown that optimization of tank parameters in accordance with proposed criteria can lead to an increase in the volume of transported natural gas by more than 4 %. The method can be used in the development of new and modernization of existing vessel projects to transportation of liquefied natural gas operating in water basins of Lena and Yenisei rivers in the East Siberian region. The described method can also be used in the design of road and rail tanks as well as small-scale bullet tanks for liquefied natural gas.

Keywords

cryogenic tank design, type-C tank, partial filling, tank optimization, inland carrier, small-scale tanker, liquefied natural gas, ventless operation

For citation: Ivanov L.V., Baranov A.Yu., Novitskaya A.V. Method of type-C liquefied natural gas tank modeling based on volume optimization for future “milk-run” exploitation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 659–667. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-659-667

УДК 621.642.86

Метод моделирования резервуаров сжиженного природного газа типа С на основе оптимизации объема для будущей эксплуатации в режиме частичного заполнения

Лев Владимирович Иванов¹✉, Александр Юрьевич Баранов²,
Анна Владимировна Новицкая³

^{1,2,3} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² Научно-производственное предприятие «КРИОН», Санкт-Петербург, 197375, Российская Федерация

¹ levladiv@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6916-7154>

² abaranov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9263-8153>

³ vasilenok_anna@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7100-6635>

Аннотация

Введение. Распространенные на практике методы проектирования танков для транспортировки сжиженного природного газа не учитывают специфики эксплуатации танкеров-газовозов при частичном заполнении криогенных резервуаров. Предложен новый метод проектирования судовых танков типа С, основанный на решении задачи увеличения объема перевозимого сжиженного природного газа речными малотоннажными речными танкерами. Метод основан на применении ряда ограничительных параметров: минимального допустимого времени бездренажного хранения криопродукта, допустимых значений осадки судна и реальной продолжительности переходов между соседними потребителями. Выполнена оптимизация типа, формы, толщины стенок и теплового ограждения криогенного танка. **Метод.** Предложенный метод направлен на увеличение использования габаритов корпуса судна. Это достигается изменением диаметра, расстояния между центрами двудольного танка, толщины изоляции и максимально допустимого давления. Увеличение объема танка обеспечено согласованием таких параметров, как максимально допустимая осадка судна, минимальное время бездренажного хранения и время бездренажного хранения при различном начальном уровне заполнения. Расчет времени бездренажного хранения определен условиями эксплуатации резервуаров типа С. Расчет подвода тепла к резервуару учитывает площадь контакта сжиженного газа и его паров со металлическими стенками резервуара. В расчетах не принимается допущение о тепловом равновесии между жидкой и паровой фракциями, что приводит к необходимости учета теплопередачи от пара к жидкости. **Основные результаты.** Реализация метода показана на примере расчета танков для судов типа река–море. Показано, что оптимизации параметров резервуаров в соответствии с предложенными критериями может привести к увеличению объема перевозимого природного сжиженного газа более чем на 4 %. **Обсуждение.** Метод может найти применение при разработке новых и модернизации существующих проектов судов для перевозки сжиженного природного газа, работающих в водных бассейнах рек Лена и Енисей Восточно-Сибирского региона. Описанный метод может быть использован при проектировании автомобильных и железнодорожных цистерн, а также стационарных малогабаритных цилиндрических цистерн для транспортировки и хранения сжиженного природного газа.

Ключевые слова

проектирование криогенного танка, танки типа С, частичное заполнение, оптимизация танка, речной газовоз, малотоннажный газовоз, сжиженный природный газ, бездренажное хранение

Ссылка для цитирования: Иванов Л.В., Баранов А.Ю., Новицкая А.В. Метод моделирования резервуаров сжиженного природного газа типа С на основе оптимизации объема для будущей эксплуатации в режиме частичного заполнения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 592–600 (на англ. яз.). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-592-600

Introduction

Liquefied Natural Gas (LNG) has become a new major clean energy source¹ [1]. Distant settlements are in need of fuel supply. Fuel supply chain in North-Eastern Siberia has name “Northern delivery”. Due to logistic problems, the fuel price transportation fee may be up to 70 % of total price [2]. Since in such places usually there are no developed railways or roads, the only reliable way of LNG transportation is naval one: by sea or river.

Due to multiple unique factors specific to North Siberia region, existing methods of technical analysis and optimization of LNG tanks are not effective. Such specific factors include: long distances between each point of LNG consumption, shallow draft on majority of waterways,

and lack a single large consumers [3]. Based on analytical papers [4–6], the conception of “milk-run” delivery is the most rational solution. Milk Run concept means that LNG carrier moves along the distribution route and unloads parts of LNG. Afterwards, vessel continues movement with partial filled tanks. The main problem with partial filling is faster self-pressurization. When inner pressure reaches peak number of Maximum Allowable Working Pressure (MAWP) safety valve opens and Boil-Off Gas (BOG) is released. Discharge of BOG is a big problem that harms economic efficiency of LNG transportation and causes environmental damage.

Different method of modeling of small-scale LNG tank was developed. Paper [7] described an original method of projecting inland small-scale LNG carrier based on usage of standard ISO insulated LNG containers. Boundary conditions are selected by specific of a waterway of river Danube: ship’s length, breadth and draft. Maximum

¹ GIIGNL. Annual Report. 2020 URL: <https://giignl.org/document/giignl-2020-annual-report/> (accessed: 08.12.2021).

allowable draft defines maximum weight of cargo. Different variants of vessel hulls were analyzed to find the best one.

Although standard ISO¹ containers are reliable way of LNG storage, the coefficient of effective displacement usage is lower than any other Cargo Containment System (CCS). That's why this method cannot be used to design LNG carriers for main rivers. Also described method does not suit for reconstruction and modernization projects.

LNG carriers on Lena and Yenisei will be exploited in "milk-run" based logistics supply chain. By that reason the CCS for these vessels must be designed in view of this feature. Different models were already designed: for small pressurized vessels and large ones. For example, in [8] model, the case has been presented without phase-equilibrium between LNG and its vapor. Separated heat ingress is calculated towards vapor phase and liquid phase: vapor overheat in large LNG reservoir reaches up to 10 K. Heat transfer from vapor to liquid phase has been calculated by integrating the heat flux from the vapor phase to the vapor-liquid interface. The main mechanism of heat transfer is conduction. LNG is presented as multicomponent liquid. Although this method is reliable for the full-scale LNG reservoirs — for the small-scale ones it needs to be adjusted.

In paper [9], evaporation rate under different loading condition is calculated with ANSYS Fluent software. With assumption of different initial filling, the authors did not consider the change of the liquid level due to change in density of LNG due to the increase of temperature.

Lee et al. [10] present experimental data from nitrogen tank self-pressurization. This paper stated that equivalent thermal conductivity is a convenient calculation method of heat ingress through the wall to BOG and from BOG to LNG (if sloshing effect is neglected).

Ferrin et al. [11] calculated convective heat ingress under different filling conditions. The modeling object in this paper is small vertical cylinder tank. Although the described method of heat transfer calculation is accurate, it's hard to apply Computational Fluid Dynamics (CFD) calculations for the full-scale tank holding time calculation due to the necessity of high-performance computer.

Paper [12] presents the whole algorithm of calculation LNG evaporation from a reservoir. Heat transfer coefficient between BOG and LNG is presented as a steady number. Heat ingress rate is a steady number as well. REFPROP wrapper was used to perform the modeling. With static number of heat transfer coefficient, it is not reliable for the calculations with constant change in thermodynamic parameters of LNG and its vapor.

All the methods described above cannot be utilized effective enough under specific conditions that require taking into consideration partial filling of tank. Described methods include simplifications making obtainable data unusable in such conditions. Presented method is based on the usage of ship's hull parameters and drain-free operation time under different filling conditions, so it may be implemented in development of new ship and modernization of the existing ones. Method allows

adjusting tank dimensions, volume, thickness of tank walls, and thermal insulation. Proposed method allows achieving enlargement of LNG volume and prevent LNG loss due to BOG discharge under any specific conditions of tank exploitation.

Model development

The enlargement of LNG tanks is achieved by optimization parameters of tank: its shape, length, diameter, thickness of wall, and insulation. Volume enlargement is achieved when following parameters are matched:

- Draft of the fully loaded vessel matches with maximum allowable draft for the unique waterway.
- Ventless operation holding time under maximum filling condition matches 15 days.
- Ventless operation holding time under partial filling condition is more than time set by operational conditions.

Current draft of vessel is determined by weight of the CCS. Weight is determined by volume of tanks and wall thickness. Type and shape of tank are determined by the available space in the ship's hull. Total weight of CCS is limited by maximum allowable draft:

$$Draft = f(W_{total}, L, B, H) \leq \text{Maximum allowable draft},$$

where W_{total} — total weight of CCS; L — length of the ship; B — breadth; H — vessel's board height.

Total weight of CCS:

$$W_{total} = W_{LNG} + W_{tank},$$

where W_{LNG} — mass of LNG; W_{tank} — mass of tanks.

$$W_{LNG} = f(V, Fl, n);$$

$$W_{tank} = f(V, n, Wall, Ins),$$

where V — volume of tank; Fl — filling limit; n — number of tanks; $Wall$ — thickness of the tank walls; Ins — thickness of the tank insulation.

Volume of tank:

$$V = f(D_{max}, l_t, Wall, Ins),$$

where D_{max} — overall diameter of the tank; l_t — tank's length.

MAWP is determined by the thickness of tank walls and volume of a tank. Ventless operation holding time is determined by MAWP, surface area of tank, and thickness of heat insulation. Second parameter of optimization determines thickness of heat insulation. If holding time is more than required 15 days, insulation thickness gets diminished, volume of tank increases, and thickness of tank walls gets calculated again. Holding time is limited by minimal ventless operation time and maximal time of voyage under partial filling conditions (MTPFC).

$$\text{Holding time} = f(V, Wall, Ins, MAWP, Fl) \geq \text{required time}.$$

Maximum allowable filling limit is 0.98. Maximum filling limit is one under which maximal ventless holding

¹ ISO VAC 40 LNG: 40 ft LNG Iso Container. URL: <https://wessingtoncryogenics.com/products/liquefied-natural-gas-containers/iso-vac-40-lng/> (accessed: 27.01.2023).

time is reached. For maximum filling level minimal required time is 15 days.

When second optimization parameter is matched, thickness of heat insulation is adjusted for partial filling conditions when minimal time is determined by the future of exploitation conditions.

Optimization of tank volume is achieved when all the following conditions are matched:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Holding time} \geq 15 \text{ days} \\ \text{Holding time under partial filling} \geq \text{MTPFC} \\ \text{Draft} = \text{Maximum allowable draft} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \text{whatever} \\ \text{comes} \\ \text{first} \end{array} \right.$$

Overall algorithm of tank optimization is based on maximization of volume of LNG carried by the vessel. This algorithm is presented in Fig. 1.

A method for specifying the type-C tank shape was chosen based on paper [13]. Accessible space is determined by IGC and DNVGL codes regulation¹. Upper-deck part of

tank cannot be higher than 3 meters above the upper deck (or tank radius, whatever number is smaller). For bi-lobe tanks distance between cylinders centers is $0.35 r$ to $0.75 r$ [14].

Maximum diameter of type-C LNG tanks is the sum of below-deck space height (H_b) and upper (H_u) deck space height.

$$D_{\max} = H_b + H_u.$$

Hence, tank shape is chosen by the following conditions:

$$\frac{B}{D_{\max}} < 1.35 \text{ — cylinder shape of the tank;}$$

$$1.35 \leq \frac{B}{D_{\max}} < 1.8 \text{ — bi-lobe shape;}$$

$$\frac{B}{D_{\max}} \geq 1.8 \text{ — multi-lobe shape.}$$

Maximum tank length:

$$l_{\max} \leq 0.2L.$$

¹ The International Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code). URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IGCCode.aspx> (accessed: 27.01.2023).

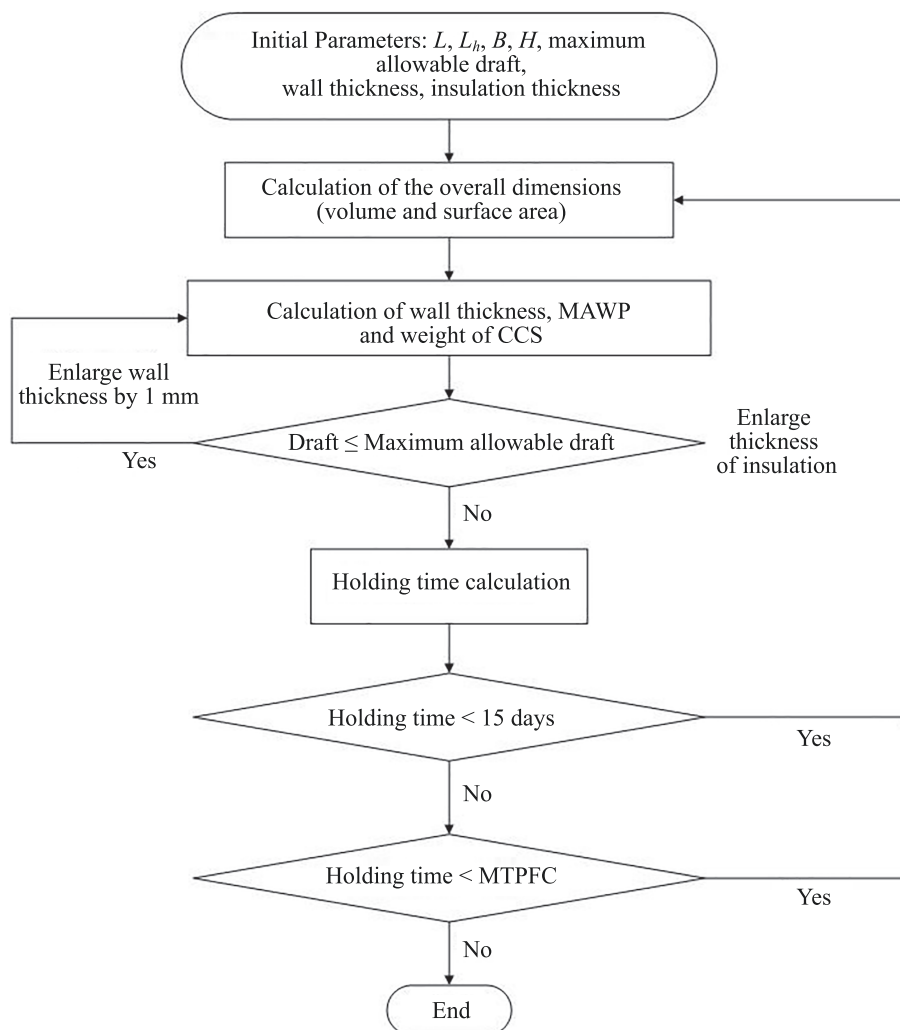


Fig. 1. Modeling algorithm

Hence, number of tanks:

$$n = \frac{L_h}{l_{\max}}$$

where L_h — length of the vessel's hull.

The number of tanks is obtained by rounding this number up.

Tank length:

$$l_t = \frac{L_h - 2l_{\text{coff}}}{n},$$

where l_{coff} — length of cofferdam.

Type-C tanks work under high pressure. MAWP is a function of tanks walls thickness. Therefore, maximum thickness of tanks walls is limited by maximum allowable weight of CCS. Weight of CCS is a sum of metal parts weight, insulation layer weight, and LNG stored in the tanks with maximum allowable filling. Tanks wall thickness is calculated by GNVGL guideline¹. Sloshing effect is neglected due to the high thickness of the walls that cannot be damaged by LNG sloshing. Sloshing is taken under consideration only when dealing with membrane tanks.

Vessel lightweight (LWT) is calculated by the following formula [7]:

$$m_{LWT} = -4.44 \cdot 10^{-6} (LBH)^2 + 0.195LBH.$$

Deadweight (DWT) of vessel:

$$m_{DWT} = 1.2(m_t + m_{LNG}),$$

where m_{LNG} — mass of LNG stored in tanks; m_t — total mass of the tank; 1.2 is a coefficient that includes weight of the fuel, water supply, weight of the ship's crew, etc.

Therefore, total displacement of the vessel:

$$\Delta = m_{LWT} + m_{DWT}.$$

Loaded draft of the vessel:

$$\text{Draft} = \Delta (LBC_B p_w)^{-1},$$

where C_B — is cubic coefficient of vessels hull; p_w — relative density of water.

Second limiting parameter is minimum allowable holding time. This parameter is set by IGC code and equal to 15 days.

Assumption is made that LNG is pure methane. Heat ingress into the tank calculated as conduction only. Insulation is made from sprayed polyurethane foam (PUF). Density of PUF is 40 kg/m³. Thermal conductivity is a function of temperature:

$$\lambda_{PUF} = -0.0003T_{PUF}^2 + 0.1908T_{PUF} - 4.2758.$$

This equation is based on experimental parameters [15], in range from 95 to 220 K. Mean deviation of

¹ DNVGL-CG-0135 Liquefied gas carriers with independent cylindrical tank of type C. 2016. URL: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/CG/2016-02/DNVGL-CG-0135.pdf> (accessed: 08.12.2021).

presented polynomial equation from experimental results is $R^2 = 0.9983$. PUF temperature is average temperature between cold LNG side and warm outer side.

Type-C tank is made from 304L stainless steel. Since thermal conductivity does not change much, $\lambda_m = 24.21$ W/(m·K) is a constant.

Insulation layer is covered by a thin layer of coating that prevents water contact with PUF. Thickness of this layer is 5 mm and thermal conductivity is $\lambda_{\text{coat}} = 0.5$ W/(m·K).

Metal in contact with LNG assumed to have temperature of LNG. Metal in contact with BOG assumed to have temperature of BOG.

Fourier's law calculates heat ingress Q through insulation.

$$Q = \frac{T_{\text{out}} - T_{\text{ins}}}{\frac{d_m}{\lambda_m F_{m.av}} + \frac{d_{\text{ins}}}{\lambda_{PUF} F_{PUF.av}} + \frac{d_{\text{coat}}}{\lambda_{\text{coat}} F_{\text{coat}}}},$$

where d_m , d_{ins} , d_{coat} — thickness of metal layer, PUF insulation and primer coating; $F_{m.av}$ — mean contact surface between liquid and outer side of walls; $F_{PUF.av}$ — mean contact surface between outer surface of metal and outer surface of the heat insulation; F_{coat} — mean contact surface between outer surface of the heat insulation and outer surface of coating; T_{out} — temperature outside of the tank; T_{ins} — temperature inside the tank.

Heat ingress is calculated separately towards vapor phase and liquid phase. To calculate mean surface for cylinder tank body and hemisphere tank head following formulas were used:

$$F_{av.cil} = \frac{F_t + F_m}{2},$$

$$F_{av.hs} = \sqrt{F_t F_m},$$

where F_t — surface area of contact inside the tank; F_m — surface area of wall outside the tank.

Heat ingress to vapor and liquid phase are calculated separately since there is no equilibrium state and vapor phase is overheated.

Surface area is a variable parameter. Heat ingress towards liquid and vapor are different and based on the area of contact between fluid and tank wall. Since shape of a tank is not an ordinary vertical cylinder, contact surface calculation is a complicated task. Height of the interface between liquid and vapor allow calculating area of contact between liquid and tank wall. LNG and BOG liquid (ρ_L) and vapor (ρ_V) densities are functions of temperature and pressure:

$$\rho_L = f(P, T_L);$$

$$\rho_V = f(P, T_V).$$

Height of the interface is a function of liquid density:

$$h_{\text{int}} = f(\rho_L) \rightarrow f(P, T_L).$$

Hence, area of contact between wall and liquid:

$$F_L = f(h_{\text{int}}) \rightarrow f(\rho_L) \rightarrow f(P, T_L);$$

$$F_V = F_{total} - F_L.$$

Evaporation heat is also a function of pressure and temperature:

$$H_{vap} = f(P, T_L).$$

Saturation temperature of liquid methane is a function of pressure:

$$T_{sat} = f(P).$$

Heat transfer from overheated BOG to liquid LNG is assumed by mechanism of conduction since convection part is negligible [9].

$$Q_{VL} = F_{VL} \lambda_V \left. \frac{\partial T_v}{\partial z} \right|_{z=0},$$

where $\frac{\partial T_v}{\partial z}$ — temperature gradient in the stratified vapor zone.

Vapor-liquid interface area is function of height of interface if sloshing effect is neglected. For the cases of vertical cylinder reservoirs, F_{VL} is constant.

$$F_{VL} = f(f(h_{int})) \rightarrow f(\rho_L) \rightarrow f(P, T_L).$$

Evaporation condition calculation algorithm follows.

If at the beginning of a time step $T_L < T_{sat}$, evaporation on this time step does not occur. Change of the masses of liquid and vapor are 0.

Temperature and density of liquid on the next time step:

$$T_L' = T_L + \frac{(Q_L + Q_{VL})\Delta t}{C_{pL}m_L};$$

$$\rho_L' = f(T_L', P).$$

Volume of liquid on the next time step:

$$V_L' = \frac{m_L}{\rho_L'}.$$

Volume of vapor on the next time step:

$$V_V' = V_{total} - V_L'.$$

Temperature and density of vapor on next time step:

$$T_V' = T_V + \frac{(Q_V - Q_{VL})\Delta t}{C_{pV}m_V};$$

$$\rho_V' = \frac{m_V}{V_V'}.$$

Enthalpy of vapor:

$$h_V' = \frac{h_V m_V + (Q_V - Q_{VL})\Delta t}{m_V}.$$

New pressure at the end of a time step:

$$P' = f(\rho_V', h_V').$$

If at the beginning of time step $T_L \geq T_{sat}$, evaporation occurs. Changes of masses on the next step:

$$\Delta m = \frac{(Q_L + Q_{VL})\Delta t}{H_{vap}}.$$

Enthalpy of liquid and vapor:

$$h_L' = \frac{(h_L m_L + (Q_L + Q_{VL})\Delta t - \Delta m H_{vap})}{m_L - \Delta m};$$

$$h_V' = \frac{(h_V m_V + (Q_V - Q_{VL})\Delta t + \Delta m H_{vap})}{m_V + \Delta m}.$$

If enthalpy of liquid on the next step is more than enthalpy of saturated liquid $h_L' > h_{sat}$:

$$\Delta m = \frac{(h_L' - h_{sat})m_L}{H_{vap}}.$$

And enthalpy and temperature of liquid on the next step is:

$$h_L' = h_{sat};$$

$$T_L' = T_{sat}.$$

Density of liquid on the next time step:

$$\rho_L' = \frac{m_L - \Delta m}{V_L}.$$

Therefore, volume of liquid and vapor:

$$V_L' = (m_L - \Delta m) \rho_L';$$

$$V_V' = V_{total} - V_L'.$$

Hence, density of vapor:

$$\rho_V' = \frac{m_V + \Delta m}{V_V'}.$$

Pressure on the next time step:

$$P' = f(\rho_V', h_V').$$

Calculation algorithm is based on one used in paper [12]. The main difference is calculation of changed surface area of tank contact with LNG and BOG and interface area between vapor and liquid phase.

Maximal holding time is obtained from calculated data under different initial filling level. The graph of changes in holding time dependent of filling limit is presented in Fig. 2.

Graph from the Fig. 2 repeats the pattern for self-pressurized cryogenic reservoirs from the book [16].

However, “milk-run” transportation requires partial filling conditions. Since holding time of partially filled tank is much lower than fully filled, it is necessary to calculate drainless time under partial filling conditions. Such conditions depend on logistics: future area of work of the vessel. To prevent LNG loss by BOG discharge, such modes of operation must be taken into account.

Results and discussion

As an example of this method usage, vessel RSD62 was set as a case. RSD62 is small-scale inland oil carrier

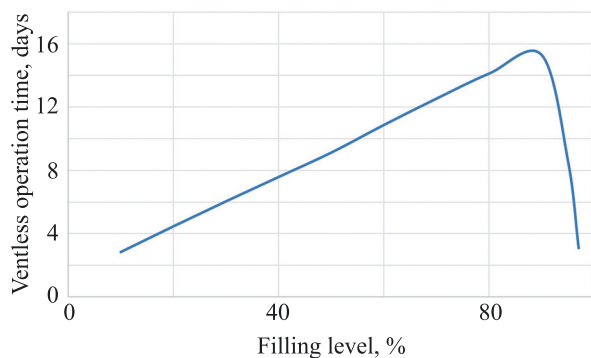


Fig. 2. Holding time under different filling conditions

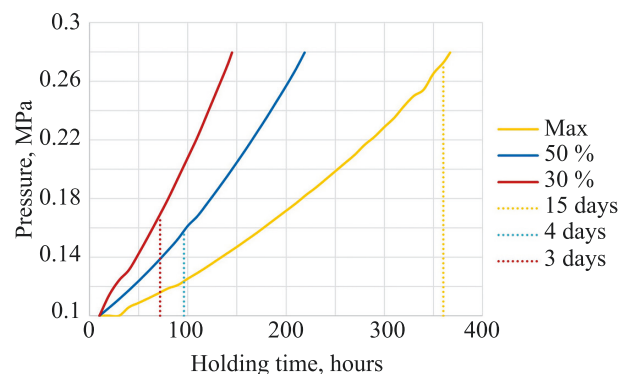


Fig. 3. Pressure build-up under different filling conditions

Table. Parameters of CCS

Step	Tank Volume, V , m ³	Total Volume, V_{total} , m ³	Wall thickness, $Wall$, mm	Insulation thickness, Ins , mm	$MAWP$, MPa	Holding time, days	
						Fl , %	Ventless operation time, days
1	1769.1	7076.5	31.94	300	0.34	91.8	24.46
						50	19.12
						30	12.87
2	1826.6	7306.5	29.43	200	0.29	92.8	17.46
						50	11.50
						30	7.62
3	1880.8	7523.4	25.43	100	0.25	93.6	6.46
						50	5.17
						30	3.33
4	1837.7	7350.8	27.68	180	0.28	93	16.17
						50	10.17
						30	6.75
5	1845.9	7383.9	27.16	165	0.27	93.2	15.29
						50	9.12
						30	6.04

used for northern delivery in North-Eastern Siberia. Main dimensions of this vessel are L — 141 m, B — 16,92 m, H — 6,3 m, L_h — 100 m, $Draft$ — 3,5 m¹.

For the initial cycle of tank modeling, volume of a tank is set as 1200 m³. Initial insulation thickness is set as 300 mm.

To obtain thermodynamic properties of liquid methane and its vapor, CoolProp wrapper for Python was utilized. All parts of the algorithm were realized with Python programming.

Initial conditions for modeling are: LNG temperature is 110 K and vapor temperature is 112 K. Before loading, LNG tank is cooled with methane vapor and after loading of LNG its vapor is slightly overheated. Environment temperature is 290 K.

Partially loaded tank conditions were analyzed. Longest trip with 50 % filling is 4 days. Longest trip with 30 % filling is 3 days.

After the modeling, the preferable tank shape appeared to be bi-lobe one. Maximal filling level is 93.2 %. All iterations of calculated CCS are presented in Table.

After modeling, it was investigated that optimal design is tank with insulation thickness of 165 mm. Fig. 3 shows pressure build-up inside the tank under different filling conditions of the tank after last iteration.

With presented method, on the first iteration total volume of LNG carried by vessel is 7076.5 m³. After volume optimization this number was increased to 7383.8 m³. Extra 307.3 m³ generate additional positive economic effect on whole vessel project.

Conclusion

This paper presented new method of type-C LNG tank modeling. Proposed method is easy to use and it may be

¹ Project RSD62. Dry-cargo vessel of river and mixed (river-sea) with a deadweight of 5640 tons URL: <https://www.meb.com.ua/dry/RSD62.html> (accessed: 12.10.2022).

completely automated. New method is not only suitable for new vessel projects but also for reconstruction and modernization projects. Optimization is based on the maximal usage of allowable space in vessel's hull and a close approximation of draft of fully loaded vessel up to maximum allowable draft on the waterway. Heat insulation is modeled to match minimum requirement of holding

time according to IGC code, but also specific regimes of future exploitation were taken into account. With modeling of specific partially filling conditions of “milk-run” logistics, drainless operation mode on whole route of LNG distribution is preserved. This specific modeling prevents BOG discharge into the environment and economic losses due to loss of cargo.

References

1. Lee S., Seo Y., Lee J., Chang D. Economic evaluation of pressurized LNG supply chain. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 33, pp. 405–418. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.05.039>
2. Knizhnikov A.Yu., Klimentiev A.Yu. Perspective and opportunities of usage of LNG in arctic regions of Russia. *Conference WWF View Russia*, 2018, Moscow.
3. Ivanov L.V., Baranov A.Yu. Analysis of technical and logistic solutions used in the inland transportation by small-scale LNG carriers. *Gas Industry*, 2021, no. 4(815), pp. 80–86. (in Russian)
4. Budiyo M.A., Pamitran A.S., Yusman T. Optimization of the route of distribution of LNG using small scale LNG carrier: a case study of a gas power plant in the Sumatra region, Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2019, vol. 9, no 6, pp. 179–187. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8103>
5. Budiyo M.A., Riadi A., Sumanta Buana I.G.N., Kurnita G. Study on the LNG distribution to mobile power plants utilizing small-scale LNG carriers. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 7, pp. e04538. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04538>
6. Strantzali E., Aravossis K., Livanos G.A., Nikoloudis Ch. “A decision support approach for evaluating liquefied natural gas supply options: Implementation on Greek case study”. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 222, pp. 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.031>
7. Kalajdžić M., Bobić D. Unconventional inland LNG carrier design for the river Danube. *Proc. of the 23th Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding SORTA*, 2018, pp. 426–443.
8. Huerta F., Vesovic V. A realistic vapour phase heat transfer model for the weathering of LNG stored in large tanks. *Energy*, 2019, vol. 174, pp. 280–291. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.174>
9. Wang Y., Yun Y., Chen M., Lim Y. Numerical prediction research on the evaporation rate of liquid cargo tank for LNG Filling Vessel Based on Ansys. *Proc. of the 5th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation (ICMIA 2016)*, 2016. <https://doi.org/10.2991/icmia-16.2016.96>
10. Lee D.-H., Cha S.-J., Kim J.-D., Kim J.-H., Kim S.-K., Lee J.-M. Practical prediction of the boil-off rate of independent-type storage tanks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 36. <https://doi.org/10.3390/jmse9010036>
11. Ferrín J.L., Pérez-Pérez L.J. Numerical simulation of natural convection and boil-off in a small size pressurized LNG storage tank. *Computers and Chemical Engineering*, 2020, vol. 138, pp. 106840. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106840>
12. Jo Y., Shin K., Hwang S. Development of dynamic simulation model of LNG tank and its operational strategy. *Energy*, 2021, vol. 223, pp. 120060. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120060>
13. Ivanov L.V., Baranov A.Yu., Malysheva T.A., Andreev A.M. Selection of cryogenic tanks for modernization of small-scale LNG carriers. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2021, no. 1, pp. 40–45. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-1-40-45>
14. Salarkia M., Golabi S., Amirsalari B. Optimum design of liquified natural gas Bi-lobe tanks using finite element, genetic algorithm and neural network. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 862–877. <https://doi.org/10.22055/JACM.2019.14801>
15. Sparks L.L. *Thermal conductivity of polyurethane foam from 95 to 340 K*. National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, USA, 1982. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir82-1664.pdf> (accessed: 10.12.2021).

Литература

1. Lee S., Seo Y., Lee J., Chang D. Economic evaluation of pressurized LNG supply chain // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. V. 33. P. 405–418. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.05.039>
2. Knizhnikov A.Yu., Klimentiev A.Yu. Perspective and opportunities of usage of LNG in arctic regions of Russia // *Conference WWF View Russia*, Feb. 2018, Moscow.
3. Иванов Л.Е., Баранов А.Ю. Анализ технических и логистических решений, применяемых при транспорте СПГ малотоннажными газовозами // *Газовая промышленность*. 2021. № 4(815). С. 80–86.
4. Budiyo M.A., Pamitran A.S., Yusman T. Optimization of the route of distribution of LNG using small scale LNG carrier: a case study of a gas power plant in the Sumatra region, Indonesia // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2019. V. 9. N 6. P. 179–187. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8103>
5. Budiyo M.A., Riadi A., Sumanta Buana I.G.N., Kurnita G. Study on the LNG distribution to mobile power plants utilizing small-scale LNG carriers // *Heliyon*. 2020. V. 6. N 7. P. e04538. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04538>
6. Strantzali E., Aravossis K., Livanos G.A., Nikoloudis Ch. “A decision support approach for evaluating liquefied natural gas supply options: Implementation on Greek case study” // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 222. P. 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.031>
7. Kalajdžić M., Bobić D. Unconventional inland LNG carrier design for the river Danube // *Proc. of the 23th Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding SORTA*. 2018. P. 426–443.
8. Huerta F., Vesovic V. A realistic vapour phase heat transfer model for the weathering of LNG stored in large tanks // *Energy*. 2019. V. 174. P. 280–291. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.174>
9. Wang Y., Yun Y., Chen M., Lim Y. Numerical prediction research on the evaporation rate of liquid cargo tank for LNG Filling Vessel Based on Ansys // *Proc. of the 5th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation (ICMIA 2016)*. 2016. <https://doi.org/10.2991/icmia-16.2016.96>
10. Lee D.-H., Cha S.-J., Kim J.-D., Kim J.-H., Kim S.-K., Lee J.-M. Practical prediction of the boil-off rate of independent-type storage tanks // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. V. 9. N 1. P. 36. <https://doi.org/10.3390/jmse9010036>
11. Ferrín J.L., Pérez-Pérez L.J. Numerical simulation of natural convection and boil-off in a small size pressurized LNG storage tank // *Computers and Chemical Engineering*. 2020. V. 138. P. 106840. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106840>
12. Jo Y., Shin K., Hwang S. Development of dynamic simulation model of LNG tank and its operational strategy // *Energy*. 2021. V. 223. P. 120060. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120060>
13. Иванов Л.В., Баранов А.Ю., Малышева Т.А., Андреев А.М. Методика подбора криогенных резервуаров для модернизации проектов малотоннажных судов // *Вестник Международной академии холода*. 2021. № 1. С. 40–45. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-1-40-45>
14. Salarkia M., Golabi S., Amirsalari B. Optimum design of liquified natural gas Bi-lobe tanks using finite element, genetic algorithm and neural network // *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2020. V. 6. N 4. P. 862–877. <https://doi.org/10.22055/JACM.2019.14801>
15. Sparks L.L. *Thermal conductivity of polyurethane foam from 95 to 340 K*. National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, USA, 1982 [Электронный ресурс]. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir82-1664.pdf> (дата обращения: 10.12.2021).

16. Arkharov A.M., Arkharov I.A., Belyakov V.P. et. al. *Cryogenic Systems. In 2 vol. V. 2. Fundamentals of Designing Devices, Installations and Systems*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999, 720 p. (in Russian)

16. Архаров А.М., Архаров И.А., Беляков В.П. и др. Криогенные системы. В 2 т. Т. 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем: учебное пособие. М.: Машиностроение, 1999. 720 с.

Authors

Lev V. Ivanov — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57216964617](https://orcid.org/0000-0002-6916-7154), <https://orcid.org/0000-0002-6916-7154>, levladiv@mail.ru

Alexander Yu. Baranov — D.Sc., Professor, Head of Research Department, R&D KRION LLC, Saint Petersburg, 197375, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191032604](https://orcid.org/0000-0002-9263-8153), <https://orcid.org/0000-0002-9263-8153>, abaranov@itmo.ru

Anna V. Novitskaya — PhD, Lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57211850010](https://orcid.org/0000-0001-7100-6635), <https://orcid.org/0000-0001-7100-6635>, vasilenok_anna@itmo.ru

Авторы

Иванов Лев Владимирович — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57216964617](https://orcid.org/0000-0002-6916-7154), <https://orcid.org/0000-0002-6916-7154>, levladiv@mail.ru

Баранов Александр Юрьевич — доктор технических наук, профессор, руководитель департамента, Научно-производственное предприятие «КРИОН», Санкт-Петербург, 197375, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191032604](https://orcid.org/0000-0002-9263-8153), <https://orcid.org/0000-0002-9263-8153>, abaranov@itmo.ru

Новицкая Анна Владимировна — кандидат технических наук, преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57211850010](https://orcid.org/0000-0001-7100-6635), <https://orcid.org/0000-0001-7100-6635>, vasilenok_anna@itmo.ru

Received 16.01.2023

Approved after reviewing 12.04.2023

Accepted 23.05.2023

Статья поступила в редакцию 16.01.2023

Одобрена после рецензирования 12.04.2023

Принята к печати 23.05.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»

Уважаемые подписчики научно-технической литературы!

Журнал выходит 6 раз в год.

На журнал «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики» можно оформить подписку в почтовых отделениях по объединенному каталогу «Пресса России», подписные индексы 47197 (полугодовая подписка),

а также online

по объединенному каталогу «Пресса России» и по каталогу «Пресса по подписке», подписные индексы Э47197 (полугодовая подписка) и по электронному каталогу Почты России, подписной индекс ПС543.

Корпоративная подписка и подписка физических лиц возможна по каталогу компаний «Урал-Пресс», подписные индексы 47197 (полугодовая подписка) и 70522 (годовая подписка).

Сведения о подписке можно уточнить в редакции журнала по адресу:

Санкт-Петербург, ул. Ломоносова., д.9, литера А, комн. 2136.

Тел.: +7(812) 480 02 75

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Журнал публикует научные обзоры, полнотекстовые статьи и краткие сообщения.

Полнотекстовая статья должна иметь четкую структуру, включающую в себя аннотацию, ключевые слова, введение, несколько содержательных разделов и заключение.

В аннотации, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо в объеме 200–400 слов в форме краткого реферата (Abstract) изложить научное содержание статьи: предмет, цель работы, метод или методология проведения работы, краткое описание эксперимента, полученные результаты, рекомендации по их применению.

Ключевые слова должны отражать информацию, представленную в статье. Основное ключевое слово указывается первым.

Во введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, провести краткий анализ известных из научной литературы решений (со ссылками на источники), дать критику их недостатков, показать научную новизну и преимущество (особенности) предлагаемого подхода.

В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи должен быть разбит на содержательные разделы (2–3 раздела).

В заключении необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать на направления дальнейших исследований и области применения.

Пристатейный список литературы (рекомендуется): для обзорной статьи — не менее 50, для полнотекстовой статьи — не менее 15, для краткого сообщения — не менее 8 литературных источников.

Ссылки на стандарты и иные нормативные документы, а также на неперсонифицированные интернет-ресурсы в список литературы не вносятся, а оформляются в виде сносок.

Объем обзорной статьи предварительно согласовывается с редакцией.

Объем полнотекстовой статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 8 страниц машинописного текста (с рисунками и таблицами), шрифт 12 pt, один интервал.

Объем краткого сообщения — до 3 страниц, шрифт 12 pt, один интервал. Рубрикация текста не требуется. Статьи принимаются в электронном виде (ntvitmo@itmo.ru). В распечатанном виде с подписями авторов материалы представляются в редакцию по запросу редакции после прохождения процедуры рецензирования.

Комплект документов должен включать:

- текст статьи с заверстанными рисунками и таблицами;
- формы сведений об авторах (на каждого автора); допускается указание нескольких мест работы автора;
- файлы с рисунками к статье в оригинальном формате (предпочтительно JPEG) с максимальным разрешением; допускается представление цветных рисунков, если в черно-белом варианте теряется полезная информация;
- лицензионное соглашение;
- согласие на обработку персональных данных.

REQUIREMENTS FOR EXECUTION OF PAPERS

Scientific reviews, full-text and brief papers are published.

A full-text paper should have a well-defined structure, including an abstract, keywords, introduction, several substantive chapters and a conclusion.

An abstract is intended for general public. It is necessary to set forth the scientific content of the paper limited by 200–400 words in the form of a brief abstract: the subject, the work objective, the method or methodology of work, a brief description of the experiment, obtained results, recommendations for their application.

Keywords should be connected with the information presented in the paper. The main keyword is given first.

The introduction should contain a meaningful statement of the issue in question, a brief analysis of the solutions known from scientific literature (with references to sources), a criticism of their shortcomings, scientific novelty and advantages (features) of the proposed approach.

The main body of the paper should represent exact statement of the problem being solved, obtained assertions and conclusions are to be set forth and explained in detail (proved), the results of experimental studies or mathematical modeling should be given to illustrate the statements made. The main text of the paper needs to be split up into meaningful sections (2–3 sections).

In conclusion it is necessary to summarize the main results, comment on them and, if possible, to indicate the areas of future research and application.

A list of references is recommended: for a review paper — at least 50 items, for full-text paper — not less than 15, for a brief paper — at least 8 references. References to standards and other regulatory documents, as well as to Internet resources, are not included in a reference list and are documented as footnotes.

The length of a review paper is coordinated with the editorial board beforehand.

The length of a full-text paper, including illustrations, tables and references, should not exceed 8 pages of typewritten text (figures and tables included), font 12 pt, single-spaced.

The length of a brief paper is up to 3 pages, font 12 pt, single-spaced.

No rubrication is required.

Papers are accepted in electronic form (ntvitmo@itmo.ru).

Materials are submitted to the editors on request after the procedure of reviewing in a printed form signed by the authors.

A set of documents should include:

- The text of the paper with make-up figures and tables;
- The forms with information about the authors (for each author), several employers can be specified by the author;
- Files with pictures to the paper in their original format (preferably JPEG) with the maximum resolution; should useful information is lost in the black and white variant, color drawings are permitted;
- Publishers license agreement;
- Consent to the processing of personal data.

OPTICAL ENGINEERING

Optical properties of borate family nonlinear crystals and their application in sources of intense terahertz radiation

A model of a refractive fiber optic sensor sensing element based on MMF-SMF-MMF structure using surface plasmon resonance

AUTOMATIC CONTROL AND ROBOTICS

Analysis of frequency-robust multivariable dynamical systems

NEW MATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

Fractal micro- and nanodendrites of silver, copper and their compounds for photocatalytic water splitting

Mathematical modeling of tri-layer dielectric OTFT based on pentacene semiconductor for enhancing the electrical characteristics (in English)

Researching carbon dioxide hydrates in thin films via FTIR spectroscopy at temperatures of 11–180 K

COMPUTER SCIENCE

Method for increasing the information value of video data based on the removal of redundant frames and entropy estimation

Attacker group detection method based on HTTP payload analysis

Facial keypoints detection using capsule neural networks

Review of national and international standards for categorizing of critical information infrastructure objects

Criterion of the network infrastructure security

A novel approach to feature collection for anomaly detection in Kubernetes environment and agent for metrics collection from Kubernetes nodes (in English)

Time parameters linear approximation method in elastic systems

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND COGNITIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

Role discovery in node-attributed public transportation networks: the study of Saint Petersburg city open data (in English)

Exploring the possibility of predicting users' career guidance preferences based on analysis of community topics and the gender in the online social network users' profiles

Blindness detection in diabetic retinopathy using Bayesian variant-based connected component algorithm in Keras and TensorFlow (in English)

Joint recognition of text and layout in historical Russian documents (in English)

Intelligent clinical decision support for small patient datasets

MODELING AND SIMULATION

Assessment of the readiness of a computer system for timely servicing of requests when combined with information recovery of memory after failures

Buckling analysis of an orthotropic cylindrical shell structure in the ANSYS Mechanical APDL software package

Justification of the choice of mobile broadband access technology for building radio communication networks of railway transport

Comparative performance analysis of DVR & DSTATCOM for distributed generation with gravitational search algorithm (in English)

Estimation of the moments of a quantized random variable

Experimental method for estimating the dynamic error of devices and sensors under their operating conditions

Method of type-C liquefied natural gas tank modeling based on volume optimization for future "milk-run" exploitation (in English)

Lubenko D.M., Ezhov D.M., Svetlichnyi V.A., Andreev Yu.M., Nikolaev N.A. 439

Ivoilov K.A., Gagarinova D.O., Zykina A.A., Meshkovskiy I.K., Plyastsov S.A. 448

Omorov R.O., Akunova A., Akunov T.A. 455

Sidorov A.I., Bezrukov P.A., Nashchekin A.V., Nikonorov N.V. 465

Panghal D., Yadav R. 473

Golikov O.Yu., Yerezhap D.E., Sokolov D.Yu. 483

Obukhov A.D., Nikol'yukin M.S. 493

Pavlov A.V., Voloshina N.V. 500

Boitsev A.A., Volchek D.G., Magazenkov E.N., Nevaev M.K., Romanov A.A. 506

Livshitz I.I. 519

Shilova A.D. 530

Darwesh G., Hammoud J., Vorobeva A.A. 538

Martynchuk I.G., Zhmylev S.A. 547

Lytkin Yu.V., Chunaev P.V., Gradov T.A., Boytsov A.A., Saitov I.A. 553

Khlobystova A.O., Abramov M.V., Stoliarova V.F. 564

Anantha Babu S., Murali S., Vijayan E., Anand M., Ramanathan L. 575

Mohammed S., Teslya N. 585

Vatian A.S., Golubev A.A., Gusarova N.F., Dobrenko N.V., Zubanenko A.A., Kustova E.S., Tatarinova A.A., Tomilov I.V., Shovkoplyas G.F. 595

Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. 608

Petrov D.S., Semenov A.A. 618

Medvedev A.S., Raspaev Yu.A. 628

Bhavya K., Rama Rao P.V.V., Ravi Srinivas L. 635

Lomakin M.I., Dokukin A.V. 646

Gryazin D.G., Belova O.O. 652

Ivanov L.V., Baranov A.Yu., Novitskaya A.V. 659