

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**



Информационные системы.

Информатика.

Проблемы информационной безопасности

Роботизированные комплексы и системы.

Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Микро- и нанoeлектроника.

Физика конденсированного состояния

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств*

Мировоззренческие основы технологии и общества





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

РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ журнал

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**

- Информационные системы. Информатика. Проблемы информационной безопасности
- Роботизированные комплексы и системы. Технологии дистанционного зондирования и неразрушающего контроля
- Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
- Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
- Аналитическое приборостроение и технологии
- Математическое моделирование
- Экономика наукоемких и высокотехнологичных предприятий и производств
- Мировоззренческие основы технологии и общества

- Information Systems. Computer Sciences. Issues of Information Security
- Multiple Robots (Robotic Centers) and Systems. Remote Sensing and Non-Destructive Testing
- Modern Radio Engineering and Telecommunication Systems
- Micro- and Nanoelectronics. Condensed Matter Physics
- Analytical Instrument Engineering and Technology
- Mathematical Modeling
- Economics of Knowledge-Intensive and High-Tech Enterprises and Industries
- Philosophical Foundations of Technology and Society

**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2020, том 8, № 5**

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, No. 5**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5>

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



**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2020, том 8, № 5**

Дата опубликования 30 сентября 2020 г.

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, No. 5**

Publication date September, 30 2020.

Журнал освещает вопросы комплексного развития радиотехнических, телекоммуникационных и информационных систем, электроники и информатики, а также результаты фундаментальных и прикладных междисциплинарных исследований, технологических и организационно-экономических разработок, направленных на развитие и совершенствование современной технологической базы.

Journal highlights the issues of complex development of radio engineering, telecommunication and information systems, electronics and informatics, as well as the results of fundamental and applied interdisciplinary researches, technological and economical developments aimed at the development and improvement of the modern technological base.

Периодичность: 6 раз в год.

Журнал основан в декабре 2013 года. До 2016 года издавался под названием «Вестник МГТУ МИРЭА» (ISSN 2313-5026).

Six issues a year are published.

The journal was founded in December 2013. The name was «Herald of MSTU MIREA» until 2016 (ISSN 2313-5026).

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

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

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

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

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, индексируется в DOAJ, РИНЦ (Science Index), Ulrich's International Periodicals Directory.

The journal is included into the List of peer-reviewed science press of the State Commission for Academic Degrees and Titles of Russian Federation. The journal is indexed: DOAJ, Science Index, Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

Сигов Александр Сергеевич — академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, президент МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА), Москва, Российская Федерация. Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017, sigov@mirea.ru.

Editor-in-Chief:

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

Редакция:

Зав. редакцией Г.Д. Середина
Компьютерная верстка Л.Г. Семерня
119571, г. Москва, пр. Вернадского, 86, оф. Л-119.
Тел.: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

Editorial staff:

Chief of the editorial staff Galina D. Seredina
Desktop publishing Larisa G. Semernya
86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571 Russia.
Phone: +7(495) 246-05-55 (#2-88).
E-mail: seredina@mirea.ru.

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

Registration certificate Эл № ФС 77-74578, issued in December 14, 2018 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media of Russia.

Редакционная коллегия

- Кудж Станислав Алексеевич** проф., д.т.н., ректор РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56521711400, rector@mirea.ru.
- Банис Юрас Йонович** проф., habilitированный доктор наук, проректор Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва, Scopus Author ID 16515798800.
- Боков Алексей Алексеевич** старший научный сотрудник, химический факультет и 4D LABS, Университет Саймона Фрейзера, Ванкувер, Британская Колумбия, Канада, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>.
- Буслаева Татьяна Максимовна** проф., д.х.н., РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru.
- Буш Александр Андреевич** проф., д.т.н., директор Института материалов твердотельной электроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, <http://orcid.org/0000-0003-3990-9847>, bush@mirea.ru.
- Вахрушев Сергей Борисович** проф., д.ф.-м.н., заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru.
- Голованова Наталия Борисовна** проф., д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru.
- Гуляев Юрий Васильевич** академик РАН, член Президиума РАН, проф., д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия, Scopus Author ID 35562581800.
- Жуков Дмитрий Олегович** проф., д.т.н., заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru.
- Кимель Алексей Вольдемарович** доцент, к.ф.-м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды, Scopus Author ID 6602091848.
- Кондратенко Владимир Степанович** проф., д.т.н., заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru.
- Крамаров Сергей Олегович** проф., д.ф.-м.н., Южный университет (ИУБиП), Ростов-на-Дону, Россия, Scopus Author ID 56638328000.
- Мишина Елена Дмитриевна** проф., д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, <http://orcid.org/0000-0003-0387-5016>, mishina@mirea.ru.
- Пасечник Сергей Вениаминович** проф., д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, <http://orcid.org/0000-0002-6050-2761>, pasechnik@mirea.ru.
- Перно Филипп** проф., Центральная Школа г. Лилль, Франция, Scopus Author ID 7003429648.
- Романов Михаил Петрович** проф., д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 14046079000, m_romanov@mirea.ru.
- Савиных Виктор Петрович** член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru.
- Скотт Джеймс** проф., член Лондонского Королевского общества, Университет Кембриджа, Великобритания, Scopus Author ID 35549214200.
- Соколов Виктор Васильевич** проф., д.ф.-м.н., советник по научной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru.
- Тимошенко Андрей Всеволодович** проф., д.т.н., проректор по учебной работе РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru.
- Фетисов Юрий Константинович** проф., д.ф.-м.н., профессор кафедры нанoeлектроники РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru.
- Харин Юрий Семенович** член-корр. НАН Беларуси, проф., д.ф.-м.н., директор НИИ прикладных проблем математики и информатики Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by.
- Цветков Виктор Яковлевич** проф., д.т.н., советник ректората РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru.

Editorial Board

- Stanislav A. Kudzh** Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56521711400, rector@mirea.ru.
- Yuras Banis** Habilitated Doctor of Sciences, Professor, Vice-Rector of Vilnius University, Vilnius, Lithuania, Scopus Author ID 56521711400.
- Alexei A. Bokov** Senior Research Fellow, Department of Chemistry and 4D LABS, Simon Fraser University, Vancouver, British Columbia, Canada, Scopus Author ID 35564490800, ResearcherID C-6924-2008, <http://orcid.org/0000-0003-1126-3378>.
- Tatyana M. Buslaeva** Dr. Sci. (Chemistry), Professor, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru.
- Alexander A. Bush** Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Materials of Solid State Electronics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7201882802, ResearcherID R-2287-2016, <http://orcid.org/0000-0003-3990-9847>, bush@mirea.ru.
- Sergey B. Vakhrushev** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Neutron Research, A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of the RAS, Department of Physical Electronics of St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru.
- Nataliya B. Golovanova** Dr. Sci. (Economics), Professor, Deputy First Vice-Rector of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru.
- Yury V. Gulyaev** Academician of the RAS, Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Supervisor of V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 35562581800.
- Dmitry O. Zhukov** Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Intelligent Technologies and Systems, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 57189660218, zhukov_do@mirea.ru.
- Alexey V. Kimel** Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Radboud University, Nijmegen, Netherlands, Scopus Author ID 6602091848.
- Vladimir S. Kondratenko** Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru.
- Sergey O. Kramarov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russian Federation, Scopus Author ID 56638328000.
- Elena D. Mishina** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, <http://orcid.org/0000-0003-0387-5016>, mishina@mirea.ru.
- Sergey V. Pasechnik** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Optical and Biotechnical Systems and Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, <http://orcid.org/0000-0002-6050-2761>, pasechnik@mirea.ru.
- Philippe Pernod** Professor, Dean of Research, University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France, Scopus Author ID 7003429648.
- Mikhail P. Romanov** Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Cybernetics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 14046079000, m_romanov@mirea.ru.
- Viktor P. Savinykh** Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Engineering), Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56412838700, vp@miigaik.ru.
- James F. Scott** Professor, Fellow of the Royal Society of London, Cambridge University, United Kingdom, Scopus Author ID 35549214200.
- Viktor V. Sokolov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Adviser on Scientific Work of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56951446700, v_sokolov@mirea.ru.
- Andrey V. Timoshenko** Dr. Sci. (Engineering), Professor, Vice Rector for Academic Affairs of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56576076700, ResearcherID Y-8709-2018, timoshenko@mirea.ru.
- Yury K. Fetisov** Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanoelectronics, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 7003504213, fetisov@mirea.ru.
- Yury S. Kharin** Corr. Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Director of the Institute of Applied Problems of Mathematics and Informatics of the Belarusian State University, Minsk, Belarus, Scopus Author ID 6603832008, <http://orcid.org/0000-0003-4226-2546>, kharin@bsu.by.
- Viktor Ya. Tsvetkov** Dr. Sci. (Engineering), Professor, Councilor of the Administration of RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 56069916700, tsvetkov@mirea.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Головин С.А., Зыков С.В., Кораблин Ю.П., Крюков Д.А.***
Применение высокоуровневых методов компромиссной оптимизации для управления автономной роботизированной добычей полезных ископаемых открытым способом **7**
- Кудж С.А., Цветков В.Я., Rogov И.Е.***
Поддержка жизненного цикла программных компонент **19**

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Куликов Г.В., До Чунг Тиен***
Эффективность адаптивного фильтра с алгоритмом слежения за огибающей при приеме сигналов с многопозиционной ФМ на фоне нефлуктуационных помех **34**

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Абдуллаев Д.А., Милованов Р.А., Волков Р.Л., Боргардт Н.И., Ланцев А.Н., Вортилов К.А., Сигов А.С.***
Сегнетоэлектрическая память: современное производство и исследования **44**
- Юрасов А.Н., Яшин М.М.***
Методы эффективной среды как оптимальные методы моделирования физических свойств наноструктур **68**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Кушнир А.П., Асадова Ю.С.***
Герметизация неподвижных соединений **78**
- Рогова В.А., Шамин Р.В.***
Оптимизационные процедуры в задаче маркетинга образовательных услуг на этапе формирования политики набора абитуриентов в вузы **91**
- Худак Ю.И., Парфенов Д.В., Музылев Н.В., Хачлаев Т.С.***
Использование профилирующих функций для постановки задач синтеза слоистых диэлектрических фильтров **103**

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS. COMPUTER SCIENCES. ISSUES OF INFORMATION SECURITY

- Golovin S.A., Zykov S.V., Korablin Yu.P., Kryukov D.A.***
Application of high-level methods of compromise optimization for control of autonomous robotized open pit mining 7
- Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya., Rogov I.E.***
Life cycle support software components 19

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

- Kulikov G.V., Do Trung Tien***
Efficiency of adaptive filter with envelope tracking algorithm when receiving signals with multi-position PSK against the background of non-fluctuation interferences 34

MICRO- AND NANOELECTRONICS. CONDENSED MATTER PHYSICS

- Abdullaev D.A., Milovanov R.A., Volkov R.L., Borgardt N.I., Lantsev A.N., Vorotilov K.A., Sigov A.S.***
Ferroelectric memory: state-of-the-art manufacturing and research 44
- Yurasov A.N., Yashin M.M.***
Methods of effective media as optimal methods for modeling the physical properties of nanostructures 68

MATHEMATIC MODELING

- Kushnir A.P., Asadova Yu.S.***
The sealing of fixed joints 78
- Rogova V.A., Shamin R.V.***
Optimization procedures in the problem of marketing educational services at the stage of forming a policy for recruiting applicants to universities 91
- Hudak Yu.I., Parfenov D.V., Muzylev N.V., Khachlaev T.S.***
Profiling functions application for layered dielectric filter synthesys problem statement 103

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-7-18>



УДК 004.01, 004.415.2.052.03, 004.415.28

Применение высокоуровневых методов компромиссной оптимизации для управления автономной роботизированной добычей полезных ископаемых открытым способом

С.А. Головин¹,
С.В. Зыков^{2, @},
Ю.П. Кораблин¹,
Д.А. Крюков¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²НИУ «Высшая школа экономики» Москва 101000, Россия

@Автор для переписки, e-mail: szykov@hse.ru

В большинстве подходов программной инженерии проектирование программного обеспечения начинается с определения функциональных требований, что вполне подходит проектам по разработке программного обеспечения, ориентированного на Web-приложения. При проектировании высококритичного крупномасштабного программного обеспечения, предназначенного для промышленного использования, необходим учет и нефункциональных требований. Основная идея предлагаемого документоориентированного подхода заключается в максимально раннем проектировании стабильного архитектурного решения, учитывающего нефункциональные характеристики программного обеспечения: надежность, безопасность, сопровождаемость и производительность (атрибуты качества). При этом ключевым вопросом является согласование функциональных требований с учетом ограничений технического характера и требований бизнеса, достигаемое в ходе устойчивого взаимодействия команд заказчика и разработчика. Для повышения гибкости конструируемых решений и предупреждения кризисных ситуаций при разработке высококритичного крупномасштабного программного обеспечения предлагается использовать подход, интегрирующий метод архитектурно-центричного проектирования (*Architecture-Centred Design Method, ACDM*), метод архитектурного анализа компо-

миссов (*Architecture-Tradeoff Analysis Method*, ATAM) с матрицей архитектуры предприятия (*Enterprise Architecture Matrix*, EAM). Это позволяет получить результат, адекватный требуемому уровню ответственности и надежности. Рассмотрение атрибутов качества в рамках метода анализа компромиссов дает возможность выбора и принятия определенных решений в проектировании программного обеспечения, учитывающих масштаб программного обеспечения и сферу его применения. Выделены основные атрибуты качества продукта (стандарт ISO 25010), для которых определены критичные сценарии. Использование указанных сценариев для детального проектирования программного обеспечения с необходимыми параметрами функциональных требований, бизнес-условий и технологических ограничений уменьшает риск развития непредсказуемого и неопределенного поведения системы. На основе предложенного подхода представлено архитектурное решение для высококритичного, ответственного, крупномасштабного программного обеспечения для управления автономной роботизированной добычей полезных ископаемых открытым способом. Выявлены и проранжированы критически важные атрибуты для создания указанного программного обеспечения и описана архитектура решения согласно стандарту разработки программного обеспечения SWEBOOK. Далее, с учетом характера, масштаба и области применения программного решения даны рекомендации по высокоуровневым архитектурным решениям для проекта системы, включая слои, конвейеры и микросервисы. Предлагаемый архитектурно-ориентированный метод разработки подходит для программного обеспечения промышленного уровня различных предметных областей.

Ключевые слова: программное обеспечение, функциональные требования, атрибут качества, архитектура программного решения, метод архитектурно-центричного проектирования (ACDM), метод архитектурного анализа компромиссов (ATAM), матрица архитектуры предприятия (EAM).

Для цитирования: Головин С.А., Зыков С.В., Кораблин Ю.П., Крюков Д.А. Применение высокоуровневых методов компромиссной оптимизации для управления автономной роботизированной добычей полезных ископаемых открытым способом. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):7-18. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-7-18>

Application of high-level methods of compromise optimization for control of autonomous robotized open pit mining

**Sergey A. Golovin¹,
Sergey V. Zykov^{2, @},
Yurii P. Korablin¹,
Dmitry A. Kryukov¹**

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²NRU "Higher School of Economics", Moscow 101000, Russia

@Corresponding author, e-mail: szykov@hse.ru

In most software engineering approaches, software design begins with defining functional requirements, which is well suited to web-based software development projects. When designing high-critical large-scale software intended for industrial use, accounting for non-functional

software requirements is also required. The main idea of the proposed document-oriented approach is to design a stable architectural solution as early as possible, taking into account the non-functional characteristics of the software: reliability, security, maintainability and performance (quality attributes). At the same time, the key issue is the coordination of functional requirements, taking into account technical limitations and business requirements achieved during the steady interaction of customer and developer teams. To increase the flexibility of the designed solutions and prevent crisis situations when developing highly critical large-scale software, it is proposed to use the approach integrating the architecture-centric design method (ACDM), the architecture-tradeoff analysis method (ATAM) with a matrix enterprise architecture matrix (EAM). This allows getting a result that is adequate to the required level of responsibility and reliability. Consideration of quality attributes within the framework of the method of compromise analysis makes it possible to select and make certain decisions in software design taking into account the scale of the software and its scope. The main attributes of product quality are highlighted (ISO 25010 standard), critical scenarios are defined for each of them (templates and use cases). The use of these templates for detailed software design with the necessary parameters of functional requirements, business conditions and technological limitations reduces the risk of developing unpredictable and uncertain system behavior. Based on the proposed approach, an architectural solution is presented for highly critical, responsible, large-scale software for managing autonomous robotic open-pit mining of minerals. Critical attributes for creating the specified software were identified and ranked, and the architecture of the solution according to the SWEBOK software development standard was described. Further, taking into account the nature, scale and scope of the software solution, recommendations are given on high-level architectural templates for the system design, including layers, pipelines and microservices. The proposed architecture-oriented development method is suitable for industrial-level software in various subject areas.

Keywords: software development, functional requirements, quality attribute, architecture of software solutions, architecture-centric design method (ACDM), method of architectural compromise analysis (ATAM), enterprise architecture matrix (EAM).

For citation: Golovin S.A., Zykov S.V., Korablin Yu.P., Kryukov D.A. Application of high-level methods of compromise optimization for control of autonomous robotized open pit mining. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):7-18 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-5-7-18>

Введение

Целью работы является планирование документноориентированной разработки высококритичного крупномасштабного программного обеспечения, предназначенного для промышленного использования и анализ конкретных факторов, включающих атрибуты качества и технологические ограничения, сформированные ключевыми участниками проекта. Подход, не учитывающий при проектировании программного обеспечения в полной мере системообразующие характеристики, как правило, в подобных случаях приводит к негативным результатам. В первую очередь это касается рабочих параметров программных продуктов, как с точки зрения неоправданно высокой стоимости, так и в отношении соответствия решаемым задачам. Предлагаемый подход направлен на систематический учет достаточно широкого спектра основных технических требований и бизнес-ограничений.

В целях повышения гибкости конструируемых решений и предупреждения возможных кризисных ситуаций при разработке программного обеспечения предлагается интеграция архитектурно-центричного метода разработки (*Architecture-Centred Design*

Method, ACDM) [11, 12] и сервисно-ориентированной архитектуры (*Service-Oriented Architecture*, SOA). При этом наилучший синергический эффект планируется получить за счет применения наиболее гибкой и новой версии SOA в форме микросервисной архитектуры [13].

В основу разработанного архитектурного решения положен подход к разработке, известный как архитектурно-центричный метод ACDM, выбранный по следующим причинам: данный метод относится к целеориентированной разработке программного обеспечения, отвечающего заранее определенным целевым характеристикам, включающим «нефункциональные» требования, такие как надежность, безопасность, сопровождаемость и производительность. Такого рода требования, известные иначе как «атрибуты качества» (*Quality attributes*, QA), составляют в совокупности единый – архитектурный фактор процесса разработки. Другие факторы «верхнего уровня» включают в себя ограничения технического характера, а также бизнес-ограничения. Перечисленные виды ограничений зачастую оказываются критически значимыми для аналитических решений, эксплуатационных характеристик, возможностей применения, выбора инструментария, назначения ресурсов и других особенностей разработки высококритичного крупномасштабного программного обеспечения, предназначенного для промышленного использования, например, программного обеспечения управления автономной роботизированной добычей полезных ископаемых открытым способом.

В процессе разработки рассматриваемого класса программного обеспечения сосредоточимся на описании ключевых методов и технологий интеллектуальной геоинформационной платформы, предназначенной для управления транспортно-технологическими процессами при добыче минерального сырья. Рассматриваемые процессы являются сложной инженерно-технологической программно-аппаратной системой, включающей в себя различные типы устройств и механизмов, описание функционирования которых в совокупности не вполне точно представимо аналитически.

В то же время данная система на верхнем уровне ее представления может быть охарактеризована следующими особенностями:

- распределение основных параметров в многомерном пространстве;
- нелинейность и стохастичность отношений между основными параметрами, обусловленная частыми изменениями как способов добычи, так и технологической и горно-геологической среды;
- отсутствие универсального формального критерия для оптимизируемых функций;
- использование различных эмпирических и экспертных правил при планировании горных работ и управлении процессами добычи и транспортировки минерального сырья.

Перечисленные особенности разрабатываемого программного обеспечения с учетом их совокупности и взаимовлияния значительно усложняют корректность требований к программному обеспечению. Кроме того, разработка программного обеспечения в постоянном взаимодействии с конечным пользователем продукта может вызывать сложности.

Рассмотрение атрибутов качества в ходе анализа компромиссов предоставляет возможность более адекватного выбора и принятия более обоснованных решений при проектировании программных продуктов. При этом анализ существующих методов оптимизации компромиссов подчеркивает такие преимущества архитектурно-ориенти-

рованного метода, как значительное облегчение переговоров с заинтересованными сторонами, возможность раннего анализа рисков и, как следствие, снижение рисков на начальном этапе – архитектурном проектировании, которое зачастую является критической стадией разработки [1, 2]. В этой связи, осведомленность, согласованность и одобрение заинтересованных сторон, являются важными факторами успеха программного проекта, в особенности при интенсивной разработке крупномасштабного и ответственного программного обеспечения. Исследования показали, что заинтересованные стороны используют известный подход на основе архитектурно-центричного метода; в настоящей работе предлагается усовершенствовать этот подход за счет синергии с матрицей архитектуры предприятия (*Enterprise Architecture Matrix*, ЕАМ) [13].

Учитывая все вышеизложенное, предлагаемый в данной статье подход на основе высокоуровневой компромиссной оптимизации представляется продуктивным.

Подход на базе архитектурных компромиссов: условия и принципы

Архитектурно-ориентированный метод предполагает, что функционал разрабатываемого программного обеспечения должен соответствовать бизнес-модели. Такое соответствие обеспечивается благодаря систематическому учету комплекса формирующих архитектуру программного обеспечения факторов, включающих в себя как атрибуты качества (QA), так и ограничения с точки зрения технологий и бизнес-требований. Что касается атрибутов качества, стандарт ISO 25010 классифицирует их следующим образом [1–3, 10]:

- качество продукта;
- качество процесса;
- качество использования.

С учетом характера и масштаба программного обеспечения, а также сферы его применения, представляется целесообразным выделить следующие важнейшие атрибуты качества, соответствующие основной категории стандарта ISO 25010:

- функциональная пригодность;
- производительность;
- эргономичность;
- надежность;
- безопасность;
- сопровождаемость;
- совместимость.

Заметим, что на базе упомянутого стандарта предлагается в дополнение к имеющейся в нем классификации:

- формирование приоритетов для атрибутов качества;
- создание «сценариев качества» для каждого из значимых атрибутов качества в помощь разработчикам программных систем (прежде всего, архитекторам).

Подобные «сценарии качества» позволяют явно выделить типовые ситуации, возникающие в том числе при эксплуатации высококритичного по качеству программного обеспечения. При этом архитектурно-ориентированный метод разработки становится не только теоретически адекватным, но и практически полезным, так как предоставляет конкретные пути применения и сценарные варианты использования.

В критических условиях, включающих высокую загруженность, интенсивное использование, а также особые требования к безопасности и надежности, архитектурно-ориентированный метод разработки помогает избежать стратегических ошибок при выполнении архитектурного проектирования крупномасштабного программного обеспечения (в т. ч. в форме «просчетов» и «подводных камней»). Такое преимущество обеспечивается благодаря наличию тщательно разработанных, сбалансированных сценариев, предназначенных для архитектурного и детального планирования и проектирования крупномасштабного программного обеспечения. При этом предлагаемый подход обеспечивает возможность последующего обобщения и распространения указанных сценариев на весь жизненный цикл разработки с необходимыми параметрами в функциональных и бизнес-требованиях, а также технологических ограничениях. Сценарно-ориентированная, управляемая документами разработка программного обеспечения снижает риски проектных ошибок, которые могут привести к развитию системы по пути непредсказуемого (или недокументированного) поведения. При этом в ряде иных, как правило, более строго формализованных, методов отсутствует детальный анализ упомянутых ограничений программного обеспечения на основе атрибутов качества, традиционно называемых «нефункциональными» требованиями.

Другим важным преимуществом предлагаемого подхода на основе архитектурно-ориентированного метода является его ориентированность на «мягкие навыки», включающие процессы взаимодействия, обмена знаниями и технологиями между командой разработчиков, и всеми заинтересованными лицами. При этом в основу подхода положено динамическое назначение и ранжирование совокупности атрибутов качества программного обеспечения, а также экспресс-оценка трудоемкости проектных задач. Прозрачная интеграция подхода со стандартными моделями жизненного цикла (такими как, например, спиральная и эволюционная, описанными в ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 15271-2002), а также с наиболее распространенными методологиями разработки крупномасштабного программного обеспечения (в частности, MSF и RUP, а также *Agile*), открывает возможности гибкого и надежного проектирования ответственного программного обеспечения для указанной предметной области и соответствия требованиям современных стандартов.

В дополнение к перечисленным «гибким» аспектам, предлагаемый подход на основе архитектурно-ориентированного метода разработки учитывает «жесткие» проектные ограничения технического и прикладного характера, которые находятся вне сферы влияния команды разработки и других заинтересованных лиц. Такие ограничения включают *a priori* детерминированные процессы, а также предопределенные инструментальные средства и программно-аппаратные платформы. Примерами подобных ограничений могут служить:

- степень компетентности аналитиков в отношении предметной области (прежде всего, в условиях существенной экономии проектных ресурсов);
- предопределенный язык программирования;
- параллельное развертывание продукта на различных программно-аппаратных платформах.

Процесс проектирования программного обеспечения с учетом особенностей предметной области

Основной процесс архитектурно-ориентированного метода включает представление ключевых компонентов системы и особенностей их взаимодействия (рис. 1) [12]. При



Рис. 1. Базовый процесс архитектурно-ориентированного метода.

этом предполагается последовательное уточнение упомянутых проектных артефактов на уровне ключевых компонентов продукта и их взаимосвязей. Процесс включает семь этапов, которые условно разделяются на фазы «неопределенности» (№№ 1–4) и «определенности» (№№ 6–7). Фаза № 5 считается «кризисной» и предполагает принятие решения о подтверждении или пересмотре выбранной архитектуры [12, 13].

Принимая во внимание предметную область, характер и масштаб рассматриваемого программного обеспечения, представляется целесообразным считать важнейшей фазой создание высокоуровневой концептуальной схемы для проектируемой системы в форме архитектурного проекта. При этом концептуальная схема архитектуры должна включать определенные артефакты, которые выявляются и детализируются в процессе проектирования, основанном на принципах архитектурно-ориентированного метода. На данном этапе упомянутые артефакты должны строиться с учетом таких ключевых особенностей проектируемого программного обеспечения, как:

- 1) среда выполнения;
- 2) представление кода;
- 3) физическое представление системы.

При этом каждый из аспектов (1–3) характеризуется определенным набором атрибутов качества с учетом их ранжирования по степени значимости. В частности, детализация представления среды выполнения позволяет разработчикам анализировать такой атрибут качества, как надежность программного обеспечения. В то же время, в ходе детализации представления на уровне кода, разработчикам следует использовать формальные методы для проверки корректности и эксплуатационных характеристик программного обеспечения.

При этом в целях повышения качества и минимизации ошибок архитектурного проектирования рекомендуется согласовывать вышеприведенные представления с тремя уровнями матрицы архитектуры предприятия, а именно:

- процессы;
- данные;
- компоненты.

С учетом особенностей разрабатываемого программного обеспечения, в т. ч. сферы его применения, в числе приоритетных атрибутов качества (QA) были выделены следующие:

- QA1 – модифицируемость (т.е. переносимость и расширяемость) – в целях интеграции компонент разнородного программного обеспечения в единую информационную среду предприятия для эффективного взаимодействия с существующим функционалом, а также оперативного внесения изменений с учетом технических и технологических требований конкретных горнодобывающих предприятий;

- QA2 – масштабируемость – в целях обеспечения работоспособности программного решения, в том числе в условиях переменной (пониженной или повышенной) производительности в пиковые периоды, с сохранением качества обработки разнородных данных;

- QA3 – безопасность – в целях обеспечения конфиденциальности коммерческих и других секретов горнодобывающих предприятий, целостности и доступности данных, защиты от несанкционированного доступа, ошибочных параметров систем управления, а также самодиагностики и оперативного предупреждения/устранения сбоев;

- QA4 – производительность – с учетом необходимости параллельных вычислений и обработки значительных объемов разнородных данных.

Анализ выявленных атрибутов качества (QA1 – QA4) показывает, что наиболее существенными компромиссными парами для них являются:

- 1) QA1 ↔ QA2,
- 2) QA1 ↔ QA4,
- 3) QA3 ↔ QA4.

В качестве важнейших рекомендаций к высокоуровневому архитектурному проекту программного решения имеет смысл отметить, прежде всего, следующие:

1. В целом архитектура программного решения должна быть сервисно-ориентированной и строиться на принципах SOA (Service-Oriented Architecture). При этом для достижения гибкости, обусловленной пунктами №№ 1–4 базового процесса архитектурно-ориентированного метода, программное решение должно быть разбито на микросервисы. Такое разделение системы на микросервисы призвано обеспечить решение для компромиссов атрибутов качества QA1 и QA2.

2. Для верхнего слоя архитектуры рекомендуется использовать сервисную шину уровня предприятия, построенную на принципах корпоративной шины типа ESB (*Enterprise Service Bus*).

3. На среднем уровне архитектуры (включая, в частности, подсистемы управления горнодобывающим предприятием) рекомендуется использовать многослойную архитектуру. Подобное решение адекватно поддерживает ключевую многоуровневую систему управления предприятием на основе матрицы корпоративной архитектуры (*Enterprise Architecture Matrix, EAM*), в которой выделяются, по крайней мере, четыре уровня-«слоя»:

1) Уровень аппаратной интеграции (подсистемы диспетчерского управления типа SCADA, устройства типа IoT);

2) Уровень краткосрочного планирования ресурсов (подсистемы оперативного управления типа MES);

3) Уровень среднесрочного планирования ресурсов (подсистемы корпоративного планирования типа ERP);

4) Уровень стратегического планирования (включая подсистемы поддержки принятия решений типа DSS).

Уровень (1) поддерживает сбор необработанных (аналоговых) данных, а также управление роботами и сенсорами, включая устройства для «интернета вещей» (IoT, *Internet of Things*). Уровень (2) поддерживает оперативное управление, включая складской учет и управление запасами. Уровень (3) поддерживает планирование ресурсов на период 1–3 года. Уровень (4) поддерживает долгосрочное планирование ресурсов и принятие стратегических решений. Каждый из перечисленных уровней агрегирует, консолидирует и перенаправляет данные на последующие, более высокие уровни планирования и поддержки принятия решений. При этом связи между уровнями рекомендуется обеспечивать посредством серии конвейеров и многоагентной среды, которые в совокупности включают (рис. 2) [1, 2, 4] следующее:

- роботизированные мобильные объекты в форме горнотранспортного оборудования с расширенным комплексом бортовых систем, обеспечивающие сбор данных с датчиков для построения вычислительных моделей автономного управления;

- информационную систему предприятия (с базой данных), обеспечивающую доступ к производственной, технологической, горно-геологической и другой статистической и нормативной информации, необходимой для построения прогнозных вычислительных моделей автономного управления мобильными объектами (в т. ч. самосвалами);

- среду визуализации, обеспечивающую диспетчерское управление программной системой, инструменты взаимодействия, а также представление производственной и технологической информации и выполнение технологических операций в дистанционном режиме;

- программные и алгоритмические решения для дистанционного управления роботизированной техникой, а также вспомогательных технологических операций для взаимодействия мобильных объектов (в т. ч. самосвалов) с маломобильными и инфраструктурными объектами предприятия в автономном режиме.

Для поддержки процессов архитектурного проектирования многоуровневого программного обеспечения по приведенной выше схеме рекомендуется в дополнение к методам разработки архитектуры на базе ACDM использовать методы анализа архитектур-

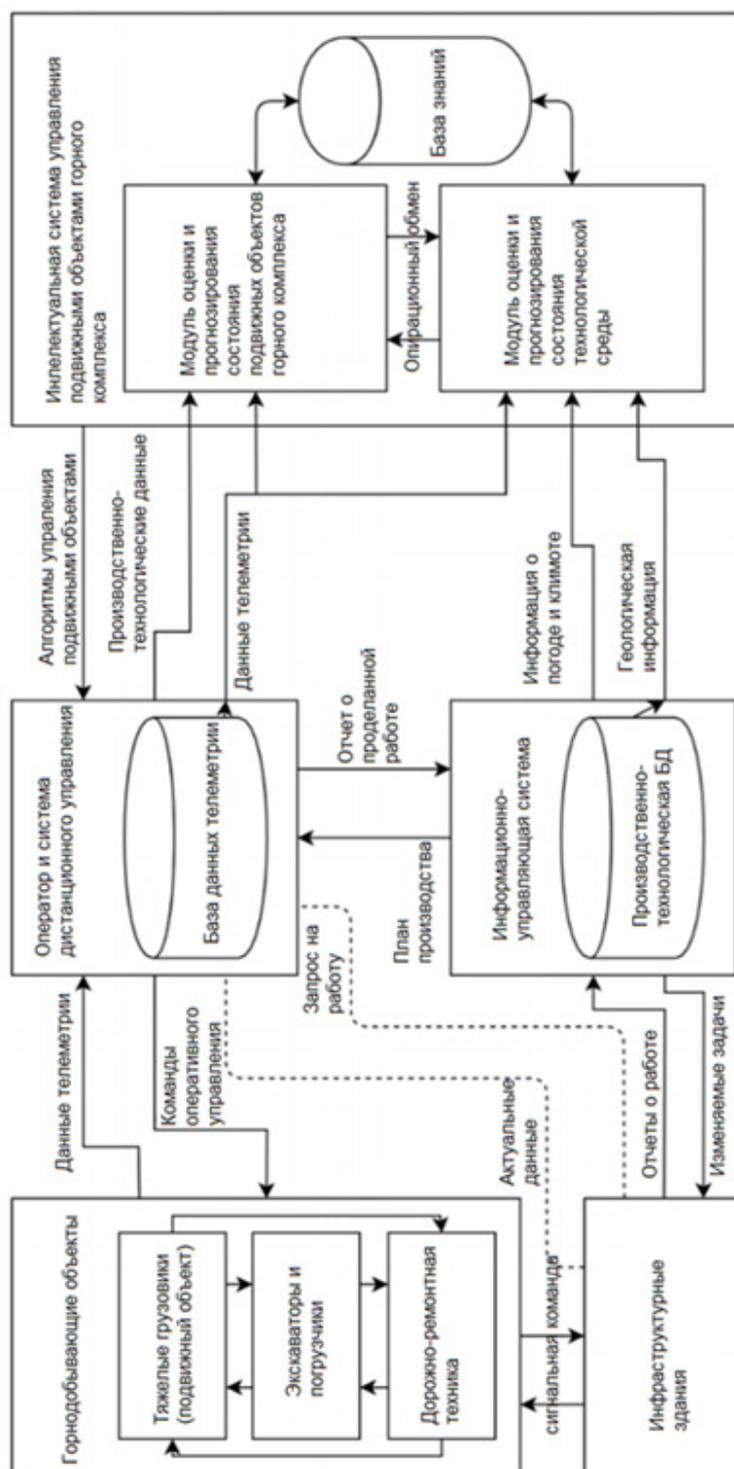


Рис. 2. Обобщенная схема функционирования системы горнодобывающего предприятия.

ных компромиссов (*Architecture Tradeoff Analysis Method, ATAM*) и совещания по ревизии архитектуры (*Architecture Review Board, ARB*).

Оба названных класса методов (ATAM и ARB) являются архитектурно-центрическими и применяются на ранних стадиях разработки, прежде всего, в ходе высокоуровневого проектирования программных решений. При этом требуется уделять особое внимание

оценке атрибутов качества, а также выявлению предпосылок для их применения. Рекомендуется синергия методов ATAM и ARB вместе с ACDM и EAM, что потенциально позволит повысить качество верификации архитектурной схемы программного решения уже на ранних стадиях разработки. Подобный подход существенно снизит критические риски и обеспечит более полное согласование атрибутов качества проектируемого программного решения с ограничениями с точки зрения технологий и бизнес-требований.

Заключение

Предложенный в настоящей работе подход на базе архитектурно-ориентированного метода разработки применим для разработки ответственного программного обеспечения промышленного уровня в различных предметных областях. При этом ввиду высокой сложности процессов проектирования эффективное применение данного подхода требует, как высокого уровня профессиональных знаний, так и методологического обобщения (в том числе за счет интеграции с такими методами как ATAM и ARB). Комплексное использование изложенных принципов и методов обеспечивает потенциальное повышение эффективности при разработке программного обеспечения в рассматриваемых областях.

В настоящей статье разработан высокоуровневый подход к представлению архитектуры высококритичного крупномасштабного программного обеспечения, предназначенного для автономной роботизированной добычи полезных ископаемых открытым способом. В качестве важного момента необходимо отметить возможность более эффективного (с точки зрения адаптивного реагирования) взаимодействия между представителями заказчика и разработчика проектируемого программного обеспечения.

В основу предложенного подхода положен принцип возможно более ранней – в начале фазы проектирования – стабилизации архитектурного представления программного обеспечения в форме семейства компонентов и связей, как это предписывается соответствующим стандартом программной инженерии (SWEBOOK).

Для достижения этой цели предлагается использовать комплексный подход на базе архитектурно-ориентированного метода разработки, что позволит обеспечить более оперативное и точное соответствие бизнес-ограничений, функциональных и технических требований.

Разработанный комплексный подход включает разработанные в научных центрах CMU и SEI методы компромиссного анализа и оптимизации (в т. ч. ATAM, ACDM и ARB), а также оригинальный метод на основе матрицы корпоративной архитектуры (EAM). На основе предложенного подхода выявлена, сформирована и проранжирована совокупность критически значимых атрибутов для построения программных решений рассматриваемого класса и масштаба, с учетом особенностей предметной области. В результате разработана высокоуровневая архитектура, представленная в форме компонентов и связей, а также даны рекомендации по архитектурным шаблонам для будущего программного решения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-17-00184).

Литература / References

1. Maranzano J.R., Rozsypal S.A., Zimmerman G.H., Warnken G.W., Wirth P.E. Architecture reviews: practice and experience. *IEEE Software*. 2005;22(2):34-43. <https://doi.org/10.1109/MS.2005.28>
2. Ferber S., Heidl P., Lutz P. Reviewing Product Line Architectures: Experience Report of ATAM in an Automotive Context. In: van der Linden F. (Ed.) *Software Product-Family Engineering*. PFE 2001. Lecture Notes in Computer Science, V. 2290. Heidelberg Berlin, Heidelberg: Springer; 2002. P. 364-382. https://doi.org/10.1007/3-540-47833-7_33
3. Harley N. 11 of the most costly software errors in history, 2018. <https://raygun.com/blog/costly-software-errors-history/>
4. Clements P., Kazman R., Klein M. *Evaluating Software Architecture: Methods and Case Studies*. Addison-Wesley; 2002. 304 p.
5. Bass L., Clements P., Kazman R. *Software Architecture in Practice (2nd Edition)*. Addison-Wesley; 2003. 560 p.
6. Carnegie Mellon University / Software Engineering Institute. *The Capability Maturity Model: Guidelines for Improving the Software Process*. Addison-Wesley; 1995.
7. Humphrey W.S. *Introduction to the Team Software Process*. Addison-Wesley; 1999. 496 p.
8. Boehm B. *Software Engineering Economics*. New Jersey: Prentice Hall; 1981. 767 p.
9. Patel J., Lee R.Y., Kim H-K. Architectural View in Software Development Life-Cycle Practices. In: 6th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (ICIS 2007). Melbourne, Australia; 2007. <https://doi.org/10.1109/ICIS.2007.64>
10. Norman D.A. *The Invisible Computer*. Cambridge, MA: MIT Press; 1998. 340 p.
11. Cabrera A.A.A., Komoto H., van Beek T.J., Tomiyama T. Architecture-centric design approach for multidisciplinary product development. In: T. Simpson, J. Jiao, Z. Siddique, K. Hölttä-Otto (Eds.). *Advances in Product Family and Product Platform Design. Methods & Applications*. New York: Springer; 2014. P. 419-447. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7937-6_17
12. Lattanze A.J. *Architecting software intensive systems: a practitioner's guide*. CRC Press; 2008. 416 p.
13. Зыков С.В., Singh A. *Agile Enterprise Engineering: Smart Application of Human Factors. Models, Methods, Practices, Case Studies*. Springer Nature Switzerland AG; 2020. 158 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40989-0>

Об авторах:

Головин Сергей Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математического обеспечения и стандартизации информационных технологий Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Зыков Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор Департамента программной инженерии факультета компьютерных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (101000, Россия, Москва, ул. Мясницкая, д. 20).

Кораблин Юрий Прокофьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Крюков Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Sergey A. Golovin, D.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Sergey V. Zykov, D.Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of School of Software Engineering of Faculty of Computer Science, Higher School of Economics, National Research University (20, Myasnitskaya Str., Moscow, 101000, Russia)

Yurii P. Korablin, D.Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Dmitry A. Kryukov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of ERP, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Поступила: 23.01.2020; получена после доработки: 02.07.2020; принята к опубликованию: 06.07.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-19-33>



УДК 334.71: 656: 338.245

Поддержка жизненного цикла программных компонент

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

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: cvj2@mail.ru

Современная разработка программного обеспечения основана на системном подходе, при котором программа или программный комплекс рассматривается как система взаимодействующих программных компонент. Модели программных компонент являются аналогами подсистем сложной системы. В силу этого сложную программу рассматривают как систему программных компонент. Организация структуры программных компонент влияет на качество и результат действия программы. Организация взаимодействия программных компонент влияет на эффективность работы программы. Важным фактором системы программных компонент является жизненный цикл, который определяет эффективность и целесообразность применения данной программы. Программное обеспечение отличается от многих сложных систем и информационных систем тем, что обладает возможностью увеличения своего жизненного цикла. При этом необходимость увеличения жизненного цикла характеризуется двумя факторами: внешним и внутренним. Внутренний фактор возникает при моральном старении программы. В этом случае она не соответствует новым условиям, например, новой операционной системе. Внешний фактор возникает при внешнем воздействии в виде помех или целенаправленных действий, типа компьютерных вирусов. Проблема создания структуры программных компонент вычислительных комплексов и информационных систем, обеспечивающих длительность жизненного цикла при наличии внешних воздействий, является актуальной. Исследование данной проблемы способствует совершенствованию технологической базы вычислительных комплексов и информационных систем, решающих прикладные задачи. В статье представлена новая модель жизненного цикла, основанная на двух моделях роста и деградации. Предложен

ресурсный подход для оценки жизненного цикла. В качестве аналитического решения предлагается использовать логистическое уравнение, которое достаточно хорошо описывает механизмы процесса формирования жизненного цикла. В статье рассматриваются три вида ресурса при вычислениях: физический, технологический и коммуникационный. Общим решением резервирования предлагается создание сети с включением модели мультиграфа.

Ключевые слова: программное обеспечение, программные компоненты, жизненный цикл, резервирование, составная модель, информационные ресурсы, логистическое уравнение.

Для цитирования: Кудж С.А., Цветков В.Я., Рогов И.Е. Поддержка жизненного цикла программных компонент. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):19-33. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-19-33>

Life cycle support software components

Stanislav A. Kudzh,
Viktor Ya. Tsvetkov[@],
Igor E. Rogov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: cvj2@mail.ru

Modern software development is based on a systems approach, in which a program or software complex is considered as a system of interacting software components. Models of software components are analogs of complex system subsystems. Therefore, a complex program is considered as a system of software components. The organization of the structure of software components affects the quality and result of the program. The organization of interaction between software components affects the efficiency of the program. An important factor in the system of software components is the life cycle, which determines the effectiveness and feasibility of using this program. Software differs from many complex systems and information systems in that it has the ability to increase its life cycle. Moreover, the need to increase the life cycle is characterized by two factors: external and internal. The internal factor arises due to the obsolescence of the program. In this case, it does not meet the new conditions, for example, a new operating system. The external factor arises from external influences in the form of interference or purposeful actions, such as computer viruses. The problem of creating the structure of software components of computing systems and information systems that ensure the duration of the life cycle in the presence of external influences is topical. The study of this problem contributes to the improvement of the technological base of computing systems and information systems that solve applied problems. The article presents a new life cycle model based on two models of growth and degradation. The article recommends a resource-based approach for life cycle assessment. As an analytical solution, it is proposed to use a logistic equation, which describes the mechanisms of the life cycle formation process quite well. The article discusses three types of resource in calculations: physical, technological and communicative. A general redundancy solution is proposed to create a network with the inclusion of a multigraph model.

Keywords: software, software components, lifecycle, redundancy, composite model, information resources, logistic equation.

For citation: Kudzh S.A., Tsvetkov V.Y., Rogov I.E. Life cycle support software components. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):19-33 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-19-33>

Введение

Отличительными особенностями разработки современных программных компонент и программного обеспечения являются вычислительная интеграция, распределенная коммуникация, допустимый параллелизм процессов, наличие внешних и внутренних помех вычислительному процессу, зависимость жизненного цикла (ЖЦ) от внешних и внутренних условий, резервирование вычислительного процесса и другое. Программные компоненты (ПК) можно рассматривать как относительно независимые системы, решающие одну или несколько вычислительных задач, которые являются частью программного обеспечения вычислительных систем или информационных систем (ИС). Они могут функционировать автономно и в составе комплексов программных компонент. Аналогом ПК может являться искусственный нейрон или мультиагент. При организации в комплекс программных компонент они могут создавать синергетический эффект, несвойственный отдельному ПК. Важным этапом создания программного компонента является разработка концептуального описания информационной услуги или информационной конструкции [1], которая включает проект модели жизненного цикла.

Анализ причин, влияющих на качество информационных услуг, позволяет сделать вывод о том, что порой даже взгляды потребителя и производителя программного обеспечения на вопросы ценности соответствующих программно-аппаратных комплексов различны. Ценность информационной услуги необходимо рассматривать при формировании потребительской стоимости информационного компонента как с позиций производителя, так и потребителя.

И, наверное, самым важным является изучение преимуществ информационной услуги с позиций ее жизненного цикла. Здесь следует выделить три основных направления:

- 1) проектирование, разработка и формирование информационной услуги или информационной конструкции программно-аппаратного обеспечения;
- 2) предоставление информационной услуги;
- 3) последующий реинжиниринг или регенерация информационной услуги.

При этом программные компоненты могут быть активными и пассивными. Активные ПК выполняют функции вычисления, анализа, сравнения, идентификации. Важной характеристикой активных ПК является их жизненный цикл, связанный с живучестью и эффективностью ПК. Отдельные программные компоненты, комплексы программных компонент (КПК) и программное обеспечение (ПО) обладают возможностью увеличения жизненного цикла. Возможность увеличения жизненного цикла характеризует гибкие технологические системы и саморазвивающиеся системы. Например, применение новой операционной системы без изменения ПК и КПК может увеличивать их жизненный цикл. Это пример поддержки ЖЦ с помощью внешних ресурсов.

При этом уровень технологических процессов, обеспечивающих соответствующее качество и максимальную доступность программных компонент в рамках предоставления информационных услуг, состоит из последовательности технологических операций, направленных на реализацию информационных сервисов в пределах ЖЦ.

1. Методология исследования

Основой исследования являются системный анализ, структурный анализ, сравнительный анализ и качественный анализ. В качестве материалов в данной работе исполь-

зованы публикации в области разработки и управления программными компонентами, а также материалы по технологиям применения мультиагентных систем и искусственных нейронных сетей.

Первое направление исследования – анализ ценности программного обеспечения, который может включать разные наборы программных компонент, как «идеальный продукт», поэтому издержки на его производство и цена совпадают.

Второе направление предполагает, что с позиции производителя программного обеспечения на этапе разработки определяется ожидаемая ценность, в то же время издержки производства программных компонент должны включать затраты на планируемые внутренние и внешние «дефекты».

Третье направление исследования – это последующий реинжиниринг или регенерация ПК и КПК, что также увеличивает жизненный цикл. Однако увеличение ЖЦ возможно не всегда, а только при определенных условиях. Поэтому исследование ЖЦ и методов его поддержки является актуальной проблемой для ПК, ПО и ИС. За рубежом применяют термин Systematic Literature Review (SLR) [2] как основу для внесения изменений в программное обеспечение и обновление ПК. Целью настоящей работы является выявление и анализ факторов, которые влияют на жизненный цикл ПО и ПК в контексте управления программным обеспечением.

2. Результаты исследований

2.1. Концепции разработки программных компонент

Программное обеспечение и программные компоненты связаны между собой. Программное обеспечение является более общим объектом и может включать разные наборы программных компонент, но при этом решать одну главную задачу. Программный компонент может быть рассмотрен как система, в силу чего к нему могут быть применены системный анализ и системное проектирование. Как всякая система, ПК имеет жизненный цикл. Комплексы программных компонент, как более сложная система по отношению к ПК, имеют свой жизненный цикл. Комплексы программных компонент, решающих одну задачу, могут иметь разный уровень надежности и разные периоды ЖЦ. Поэтому анализ и комплексирование программных компонент направлен не только на решение вычислительной задачи, но и на обеспечение надежности и устойчивости вычислений. Устойчивость вычислений зависит от внешних и внутренних воздействий, которые изменяют жизненный цикл вычислительной системы и жизненный цикл совокупности программных компонент. Планирование и управление разработкой программных компонент является важной задачей и отражено в ряде глобальных проектов, одним из которых является проект разработки глобального программного обеспечения (Global Software Development – GSD). В ряде работ [2–4] отмечено, что в процессе разработки необходимо решать вопросы нормального функционирования ПК, распределения вычислительных задач и управления вычислительным процессом. Нормальное функционирование и управление вычислительным процессом зависят от жизненного цикла ПК.

На сегодняшний день существует несколько моделей, поддерживающих функционирование ПК, в том числе модели на основе критериев жизненного цикла [5]. Результаты

исследования SLR показывают, что жизненный цикл КПК и ПК существенно зависит от потребленных, потребляемых и резервируемых ресурсов. При формировании модели ЖЦ программных компонент авторы пришли к выводу, который согласуется с [6] и рядом других работ, что современные программные системы часто слишком сложны, чтобы быть представленными одной моделью. Признавая это, авторы предлагают диадную модель ЖЦ, позволяющую описывать ЖЦ с разных точек зрения. В этом контексте состав модели ЖЦ стал составным, поскольку сочетание разных оценок неизбежно. Авторами определен подход для формирования частей ЖЦ ПК и метод композиции частей в составную модель ЖЦ ПК.

2.2. Модели жизненного цикла

Модель жизненного цикла применяют в разных направлениях: биологии, экономике, моделировании, вычислениях, информатике, проектировании, строительстве и т.д. Жизненный цикл является интегральной характеристикой вычислительных систем. Жизненный цикл отражает последовательность временных периодов, на каждом из которых объект имеет разную эффективность и по-разному проявляет себя по отношению к внешнему окружению. В первую очередь это относится к эффективности эксплуатации объекта. Связь эффективности функционирования объекта с этапами жизненного цикла определяет важность поддержки этапов жизненного цикла, на которых объект обеспечивает максимальную эффективность.

Поддержка жизненного цикла может быть внешней и внутренней. Внутренняя поддержка ЖЦ направлена на функционирование системы и исключение противоречий между ее компонентами. Одним из методов внутренней поддержки является обеспечение условий комплементарности [7] между программными компонентами, решающими общую задачу. Внешняя поддержка ЖЦ направлена на отражение внешних угроз среды или конкурентов.

Необходимо различать жизненные циклы разных систем и объектов. Продукция имеет иную модель ЖЦ по сравнению с проектом [8]. Проект имеет иной ЖЦ по сравнению со сложной технической системой. ЖЦ ИС [9] отличается от жизненного цикла технической системы. Анализ эффективного функционирования системы связан с исследованием таких важных параметров, как критерий длительности функционирования программ, причинно-следственная связь функционирования программы с внешними факторами, модели проектирования ЖЦ.

Рассмотрим несколько типовых моделей жизненного цикла. Распространенная модель ЖЦ – трапециевидная модель, включающая четыре этапа или четыре фазы. Более сложной является модель, известная как «петля качества» (ISO 9001), которая включает 11 фаз. Эти модели являются статическими. При проектировании и в динамических системах существуют каскадная и спиральная модели ЖЦ. Каскадная модель опирается на дополнительные внешние ресурсы, которые увеличивают длительность жизненного цикла. Спиральная – основана на выработке дополнительного ресурса в процессе функционирования системы или объекта. Эти модели ЖЦ являются динамическими. Фактически они выполняют функции реинтеграции и регенерации [10]. В данной работе предлагается ресурсная модель жизненного цикла [5], основанная на том, что объем ресурсов и скорость их расходования определяет жизненный цикл системы или объекта.

Уравнение, описывающее процесс изменения состояния системы за счет расхода ресурсов, называется логистическим уравнением. Логистическое уравнение, также известное как уравнение Ферхюльста (Pitire Francois Verhulst), изначально было получено при рассмотрении модели роста [11]. Обозначим через P состояние системы в зависимости от времени t . Такая модель сводится к дифференциальному уравнению:

$$\delta \frac{dP}{dt} = rP \left(1 - \frac{P}{K} \right). \quad (1)$$

Логистическое уравнение допускает разные трактовки. Применительно к цели данного исследования оно рассматривается с позиций расхода и потребления ресурсов. В выражении (1) параметр r характеризует скорость расхода ресурсов, а параметр K – максимально возможную ёмкость ресурсов системы. Показатель δ является индикатором процесса. Большинство записей данного уравнения не рассматривают показатель δ . В нашем исследовании этот показатель является индикатором, который имеет два оппозиционных целочисленных значения $+1$ и -1 . Значение величины δ отражает два качественно разных процесса, но протекающих по одинаковой аналитической зависимости. При равенстве единице его опускают. Положительное значение индикатора δ соответствует развитию системы (ПК) за счет потребления ресурса и накопления собственного ресурса. Его отрицательное значение соответствует деградации системы за счет расхода собственного ресурса и потерю ресурса системой. Точным решением уравнения (1) является логистическая функция – S -образная кривая (логистическая кривая), для которой существует предел:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = K.$$

Можно упростить решение логистического уравнения до вида, которое используют в однопараметрической модели Раша:

$$P(t) = \frac{KP_0 e^{rt}}{K + P_0(e^{rt} - 1)}, \quad (2)$$

$$P(t) = \frac{P_0 e^{t-a}}{1 + P_0 e^{t-a}}.$$

Соответствующая кривая приведена на рис. 1, она известна в математике и относится к классу сигмоид (sigmoid). Сигмоида – гладкая монотонная S -образная возрастающая функция, которая применяется для отражения процесса накопления и предела процесса. Величина a задает сдвиг вправо от начала координат. Для рис. 1 величина a соответствует середине сигмоиды. Сигмоида $S1$, как модель жизненного цикла, показывает рождение и рост. Насыщение или зрелость системы отражает горизонтальный отрезок P_{con} , который дополняет сигмоиду.

На рис. 1 показаны три начальные фазы жизненного цикла: рождение, рост, зрелость. Этот график соответствует $\delta = 1$. Приведенная модель называется моделью роста. Если начинается деградация системы, то индикатор δ принимает значение -1 . Это эквивалент-

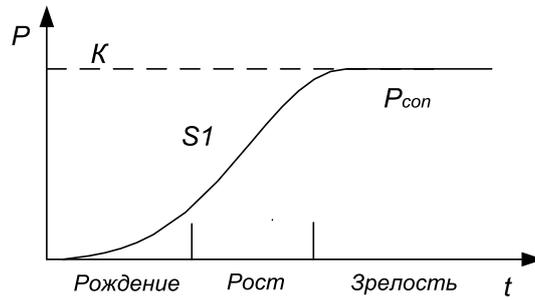


Рис. 1. Три фазы жизненного цикла при $\delta = 1$.

но тому, что аргумент t изменит знак, и величина a заменится на величину b , которая задает сдвиг влево. В результате для процесса деградации получаем уравнение:

$$P(t) = \frac{P_0 e^{-t+b}}{1 + P_0 e^{-t+b}}. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) скорости расхода ресурсов r условно равны 1. Это упрощение делается для того, чтобы понять суть процесса роста и деградации. Графическая зависимость, соответствующая уравнению (3), имеет вид, приведенный на рис. 2.

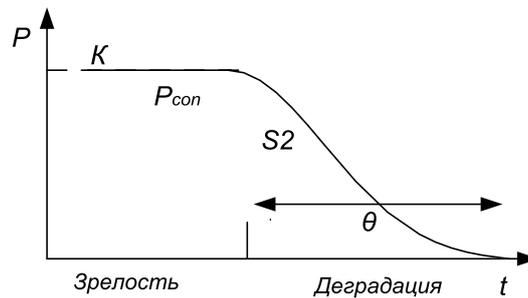


Рис. 2. Две фазы жизненного цикла при $\delta = -1$.

Здесь приведена другая сигмоида $S2$. Она отличается от $S1$ наклоном и деталями. Рис. 1 показывает три фазы жизненного цикла. Рис. 2 показывает две фазы жизненного цикла. Фаза «зрелость» является общей на обоих рисунках, что дает основание рассматривать данную модель жизненного цикла (рис. 1, 2) как составную трапециевидную модель, имеющую четыре фазы. Раздельный показ жизненного цикла на рис. 1 и рис. 2 свидетельствует о том, что рост и рождение объекта или системы не зависят от ее возможной последующей диссипации или деградации. И наоборот, деградация системы не зависит от предыдущих фаз рождения и роста.

Модель, приведенную на рис. 2, называют моделью деградации. Она включает часть процесса зрелости (P_{con}) и процесс деградации $S2$. Процесс $S2$ может быть также процессом диссипации. Время деградации (диссипации) обозначено символом θ . Суммарный жизненный цикл программных компонент ЖЦ ПК определится как:

$$\text{ЖЦ ПК} = S1 + P_{con} + S2. \quad (4)$$

Наступление деградации или диссипации часто происходит под воздействием внешних деструктивных сил (рис. 3). В нормальном состоянии на вход комплекса программных компонент поступает входная информация, которая в ходе вычислений преобразуется в выходную.



Рис. 3. Модель воздействия деструктивных сил на комплекс программных компонент.

Деструктивное воздействие приводит к расходу ресурсов комплекса ПК и создает процесс, который изображен кривой S_2 на рис. 2. Для того чтобы поддержать жизненный цикл ПК, необходимо предотвратить деградацию S_2 . Для этого вводят дополнительный внешний ресурс S_1^* из резерва, соответствующий условию $S_1^* = -S_2$. В результате новый ресурс нейтрализует деградацию S_2 и период зрелости возрастет:

$$P_{con}^* = P_{con} + \theta. \quad (5)$$

Деградация происходит за счет внутренних отказов или внешних воздействий. При появлении новых причин, вызывающих деградацию S_2^* , необходимо использование новых ресурсов S_{i+1}^* . Рекурсивное использование выражения (5) позволяет увеличивать жизненный цикл ПК, пока имеются ресурсы подавления деградации или диссипации.

Также существуют и принципиальные математические подходы для системы типовых моделей программных компонент жизненного цикла (рис. 4).

Информация или документы в виде информационного сообщения проверяются при поступлении на соответствие предметной области.

Информационный массив образует множество проблемно-ориентированных документов, каждый из которых в системе представляется в виде поискового образа.

Документы классифицируются в программных компонентах в соответствии с информационным профилем документа.

Структурирование и классификация информации, в том числе деление на крупные и мелкие части в соответствии с критериями, происходит на последующих этапах.

В случае необходимости сбора дополнительной информации к первичному информационному массиву могут добавляться дополнительные информационные сообщения, и процедура повторяется.

2.3. Составная модель ЖЦ ПК

Как уже отмечалось [6], для сложных объектов или процессов невозможно описание с помощью одной модели, что вынуждает использовать две и более модели. Жизненный цикл может быть фиксированным и адаптивным. Адаптивный или меняющийся ЖЦ це-

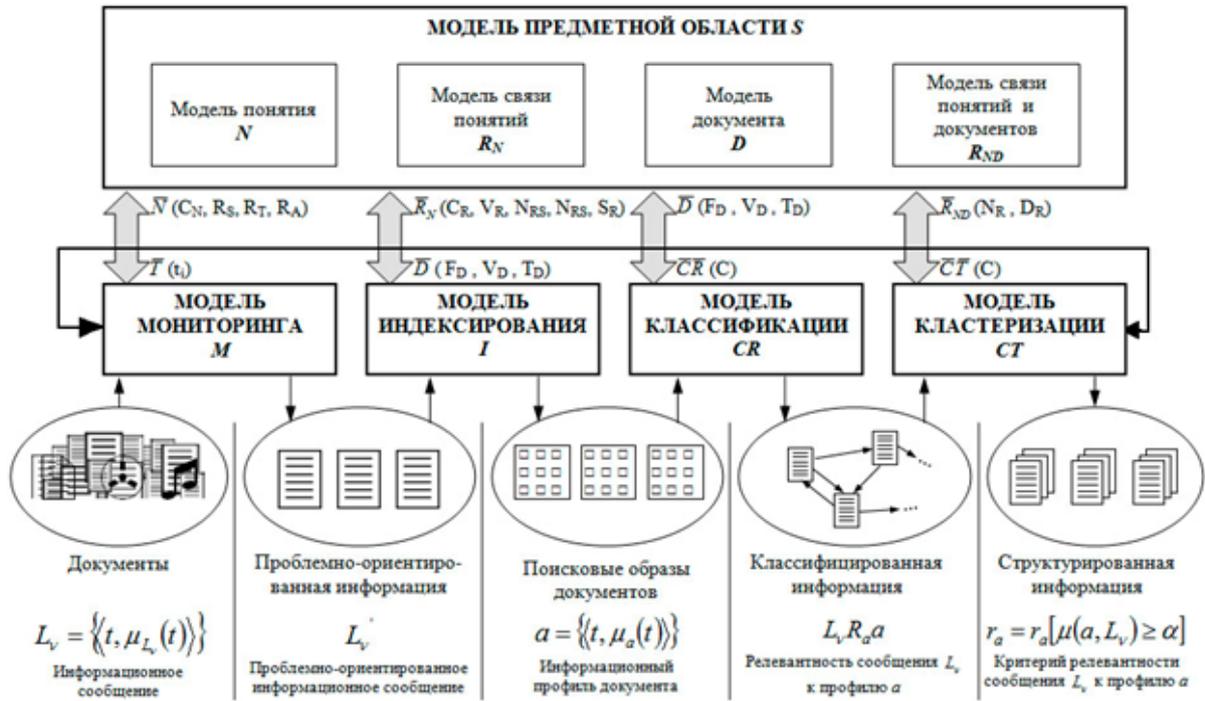


Рис. 4. Математическая модель жизненного цикла программных компонент.

лесообразно описывать набором моделей, каждая из которых характеризует определенный процесс и зависит от разных факторов. Составная модель жизненного цикла, состоящая из двух частных моделей, приведена на рис. 5. Эти две модели характеризуют рост и деградацию, и соответственно характеризуют модель роста и модель деградации ЖЦ.

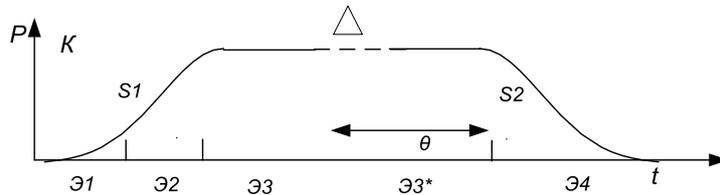


Рис. 5. Составная модель жизненного цикла программных компонент.

На рис. 5 условный разрыв между моделями роста и деградации показан пунктиром и обозначен символом Δ . Символом θ обозначено увеличение жизненного цикла программных компонент, обусловленное применением внешних информационных ресурсов (5). В общем случае величина Δ будет зависеть от количества актов информационного взаимодействия «помеха-ресурс»:

$$\Delta = P_{con} + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_n. \tag{6}$$

Выражение (6) показывает, что увеличение ЖЦ ПК возможно за счет подключения внешнего ресурса, подавляющего внешнее деструктивное воздействие. Условно обозначено n таких взаимодействий. Такими воздействиями могут быть, например, атаки вирусов.

При информационном взаимодействии может быть две ситуации – запаздывание и синхронность. Следует отметить важность информационной модели, называемой ин-

формационной ситуацией [12]. Информационная ситуация описывает модель объекта и все наиболее важные факторы, которые на него воздействуют. На рис. 6 показан результат информационного взаимодействия внешнего ресурса ($S1^*$) и деструктивного воздействия ($S2$).

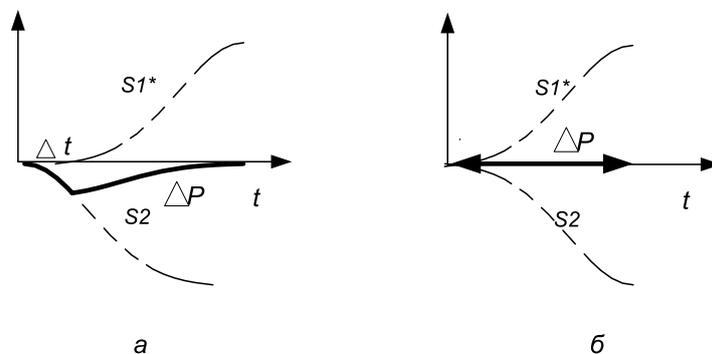


Рис. 6. Использование ресурса для ликвидации деструктивного воздействия на ЖЦ ПК:
 а – асинхронное; б – синхронное.

На рис. 6 показаны асинхронное (рис. 6а) и синхронное (рис. 6б) информационное взаимодействие между ресурсом и деструктивным воздействием. Результат взаимодействия обозначен как ΔP . Значение ΔP показано жирной линией. Для асинхронного взаимодействия (рис. 6а) деструктивная сила начинает действовать раньше, и между $S2$ и $S1^*$ существует период задержки Δt . В этом случае ресурс или резерв не успевают вовремя погасить деструктивную силу, и результат взаимодействия ΔP в течение некоторого времени отличен от нуля, он показан ломаной линией. График ΔP соответственно меняет состояние P .

Для синхронного взаимодействия (рис. 6б) деструктивная сила сразу встречает противодействие. В этой ситуации между $S2$ и $S1^*$ не существует задержки Δt , и они фактически симметричны. Такая ситуация имеет место при атаке компьютерного вируса на систему, в которой установлена антивирусная защита. В этом случае ресурс сразу погашает деструктивную силу и результат взаимодействия ΔP равен нулю, он показан прямой линией с нулевым значением.

2.4. Организация программных компонент как метод резервирования

В работе [13] обоснована актуальность использования проблемно-ориентированной конфигурации вычислительных комплексов для автоматизированных систем обработки информации и управления. На практике программные компоненты включают группы алгоритмов или группы задач. Каждый компонент решает несколько возможных задач. Системный термин «программный компонент» можно заменить эквивалентным термином из области вычислений – «специализированный вычислительный комплекс (СВК)». На каждом ПК или СВК находится как минимум один алгоритм. Если количество алгоритмов на СВК больше одного, то они объединяются в резервированную внутреннюю сеть. Объединение алгоритмов в сеть создает ресурс жизненного цикла ПК. Алгоритмы координируют свои действия между собой по сети. Такая модель ПК допускает возникновение отказов, заключающихся в потере связи между алгоритмами и полным или частичном выходе из строя алгоритмов.

Программные компоненты образуют КПК при решении сложной задачи. КПК, как правило, обладает синергетическим эффектом и это – его преимущество по отношению к отдельным компонентам. Программный комплекс имеет свой жизненный цикл. В комплексе ПК часто функционируют по принципу двойной алгоритмической модели. Примером являются роевые алгоритмы или алгоритмы муравьиной колонии. Главная задача такого алгоритма – достижение групповой цели, вторая задача — взаимодействие между собой для повышения надежности и увеличения жизненного цикла всего комплекса. При сетевой организации КПК отказы в одном ПК (СВК) перераспределяют его задачи на весь комплекс. Сетевое взаимодействие выполняет роль ресурса. Такой ресурс возможен при введении механизма реконфигурации вычислительных комплексов [14], учитывающего особенности программных компонент.

Обращает на себя внимание то, что триада объектов является минимальной моделью элемента сети ПК с резервированием. Наличие трех связей обеспечивает взаимодействие между тремя компонентами, если одна из связей прервется. В комплексе все ПК связаны между собой с помощью сети по схеме «каждая с каждой», в результате чего при выходе из строя одной связи между СВК за счет дополнительных соединений связь в системе будет сохраняться, и комплекс будет функционировать; при выходе из строя одной СВК ее функции будут перераспределяться между оставшимися СВК, и комплекс также будет функционировать. Три (и более) связанных ПК создают резерв для каждой из систем комплекса. Резерв по внешней связи создает резервная сеть. Основная идея резервирования – создание треугольников связанных систем. Линию можно прервать, а сеть прервать сложнее. Пример сети Интернет показывает это свойство.

Технологическая модель или метод поддержки ЖЦ комплексов ПК разделен на следующие части: резервирование физических ресурсов (вычислительных машин) путем объединения их в сеть; резервирование технологических ресурсов (программных компонент) путем объединения их в сеть; резервирование коммуникационных ресурсов (каналов связи) на физическом уровне путем создания в сети схем мультиграфа; введение правил перераспределения ресурсов при выходе ресурса из строя; поддержка жизненного цикла за счет дополнительных ресурсов.

Процессуальная модель поддержки ЖЦ ПК заключается в следующем. Гетерогенный комплекс ПК (КПК) может находиться во множестве состояний Z , каждое из которых может быть представлено процессами роста $S1_i$ (подключение ресурса) и деградации $S2_i$. Каждое состояние Z_i зависит от взаимодействия ресурса и процесса диссипации (рис. 5). В ходе функционирования комплекс ПК переходит от одного состояния к другому S_i . Переход между состояниями вычислительного комплекса ПК происходит как под воздействием внешних факторов, так и под воздействием внутренних событий. Предлагаемый метод адаптивного реагирования на процессы диссипации предполагает создание реактивной системы отклика на воздействия, которая инициирует подключение ресурса для нейтрализации очередной диссипации.

Сущность метода поддержки ЖЦ КПК заключается в создании резервированной архитектуры комплекса и использовании индикационного контроллера, реагирующего на внешнее воздействие или внутреннюю потерю комплементарности действий системы. Метод позволяет реинтегрировать комплекс ПК после отказа одного из компонентов и продолжить исполнение функционального процесса.

Общий алгоритм поддержки или реинтеграции комплексов ПК в случае отказа состоит из следующих шагов: индикация отказа, оценка последствий отказа, перераспределение задач на другие ПК, подавление помехи за счет внутренних ресурсов, исключение полностью отказавшего устройства из сети КПК, исключение связей с полностью отказавшим устройством, попытка восстановления отказавшего ПК. Предложенные методы отличаются от существующих тем, что учитывают особенности формирования жизненного цикла КПК за счет учета потребления и расхода ресурсов.

3. Обсуждение результатов

Оценка методов разработки программного обеспечения (SEE) является важной деятельностью в этой области. В работе [3] проведен анализ на основе подборки из 1178 публикаций с целью выявления явных и неявных тенденций в разработке и развитии программного обеспечения и программных компонент. Несмотря на такой большой объем исследований, в нем не нашлось места для анализа влияния ресурсов на жизненный цикл ПК и КПК. Предлагаемая работа восполняет этот пробел.

В модели деградации $S2$ следует различать диссипацию [15] и деградацию [16] ПК, хотя результаты от действия этих процессов одинаковые. Деградация означает нарушение внутренней согласованности и комплементарности компонентов ПК. Диссипация означает отклонение состояния ПК в сторону от целевого при внутренней согласованности компонентов системы. В первом случае ресурсы направляются на самовосстановление, потому что оно требуется всегда. Во втором случае они направляются на отражение угроз и самовосстановление, если оно требуется.

Существует ряд ограничений применения данной технологии. Основное ограничение заключается в том, что каждый КПК должен иметь не менее трех СВК. Комплекс ПК должен иметь сетевую, а не линейную структуру. Базовым звеном технологии должна быть триада. С одной стороны, это обеспечивает резервирование, но с другой стороны, в системе появляются паразитные обратные связи. Эти связи уменьшают внутреннюю устойчивость работы КПК с большим числом СВК. Рост числа СВК влечет рост сложности системы в геометрической прогрессии, а также рост сложности проблемы синхронизации. Введение индикативного показателя в логистическое уравнение продиктовано необходимостью отражения характера двух противоположных процессов. В большинстве работ эти процессы рассматривают независимо. Введение индикативного показателя позволяет, при необходимости, сравнивать эти процессы и даже объединять для получения суммарного эффекта. Модель формирования жизненного цикла за счет логистической кривой удобна, но математически является разрывной, что следует расценить как недостаточно гибкое аналитическое решение.

Выводы

Широкое применение программных компонент в прикладных областях способствует формированию нового направления программной инженерии. Модели программных компонент широко используют при решении динамических задач, например, при управлении транспортом. Это привело к созданию специализированных транспортных киберфизических систем, которые приходят на смену интеллектуальным транспортным

системам. Основой киберфизических систем являются программные компоненты. Для увеличения жизненного цикла программных компонент и, главное, комплекса программных компонент, необходимо проводить резервирование технологических и физических ресурсов с использованием сетевых моделей, включая модели мультиграфа. Для обеспечения устойчивой и надежной работы отдельных ПК и комплекса ПК должны использоваться модели триад [17]. Для моделирования жизненного цикла целесообразно использовать логистические уравнения. Для моделирования жизненного цикла с помощью логистических уравнений целесообразно использовать две модели описания жизненного цикла. Первая часть модели ЖЦ – это модель роста. Вторая часть модели ЖЦ – это модель деградации. Предложен рекурсивный механизм поддержки ЖЦ ПК, основанный на противодействии внешним деструктивным воздействиям дополнительных ресурсов. Рассмотрены синхронное и асинхронное противодействие деструктивным воздействиям.

Еще одним фактором поддержки и увеличения жизненного цикла служит механизм саморазвития. Это является предметом дальнейших исследований.

Литература:

1. Tsvetkov V.Ya. Information Constructions. *European Journal of Technology and Design*. 2014;5(3):147-152. <http://dx.doi.org/10.13187/ejtd.2014.5.147>
2. Sajjad M., Sajid A., Niazi M., Alshayeb M., Richardson I. Key factors that influence task allocation in global software development. *Inf. Soft. Technol.* 2017;91:102-122. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.06.009>
3. Sehra S.K., Brar Y.S., Kaur N., Sehra S.S. Research patterns and trends in software effort estimation. *Inf. Soft. Technol.* 2017; 91:1-21. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.06.002>
4. Tiwari S., Gupta A. Investigating comprehension and learnability aspects of use cases for software specification problems. *Inf. Soft. Technol.* 2017;91:22-43. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.06.003>
5. Tsvetkov V.Ya. Resource Method of Information System Life Cycle Estimation. *European Journal of Technology and Design*. 2014;2(4):86-91. <https://doi.org/10.13187/ejtd.2014.5.147>
6. Laghouaouta Y., Anwar A., Nassar M., Coulette B. A dedicated approach for model composition traceability. *Inf. Soft. Technol.* 2017;91:142-159. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.07.002>
7. Цветков В.Я. Комплементарность информационных ресурсов. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016;2:182-185. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=8546>
8. Муравьева Я.И. Жизненный цикл проекта. *Экономика и социум*. 2016;3(22):1889-1894.
9. Дик В.В., Шайтура С.В. Жизненный цикл информационных систем. *Вестник МГТУ МИРЭА (Российский технологический журнал)*. 2014;3(4):116-129.
10. Магчин В.Т. Регенерация бортовых баз данных. *Наука и технологии железных дорог*. 2019;4(12):20-29.
11. Verhulst P.F. Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. *Corresp. Math. Phys.* 1838;10:113-126.
12. Markelov V.M. Situational Modeling in Logistics. *European Journal of Economic Studies*. 2013;6(4):204-209.
13. Сорокин С.А., Бененсон М.З., Сорокин А.П. Методики оценки производительности гетерогенных вычислительных систем. *Российский технологический журнал*. 2017;5(6):11-19. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-11-19>
14. Riakiotakis I., Ciorba F.M., Andronikos T., Papakonstantinou G. Distributed dynamic load balancing for pipelined computations on heterogeneous systems. *Parallel Computing*. 2011;37(10-11):713-729. <https://doi.org/10.1016/j.parco.2011.01.003>
15. Kawai R., Parrondo J.M.R., Van den Broeck C. Dissipation: the phase-space perspective. *Phys. Rev. Lett.* 2007;98(8):080602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.080602>

16. Singh B., Sharma N. Mechanistic implications of plastic degradation. *Polym. Degrad. Stabil.* 2008;93(3):561-584. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008>
17. Кудж С.А., Цветков В.Я. Тринитарные системы. *Российский технологический журнал.* 2019;7(6):74-88. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-151-167>

References:

1. Tsvetkov V.Ya. Information Constructions. *European Journal of Technology and Design.* 2014;5(3):147-152. <http://dx.doi.org/10.13187/ejtd.2014.5.147>
2. Sajjad M., Sajid A., Niazi M., Alshayeb M., Richardson I. Key factors that influence task allocation in global software development. *Inf. Soft. Technol.* 2017;91:102-122. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.06.009>
3. Sehra S.K., Brar Y.S., Kaur N., Sehra S.S. Research patterns and trends in software effort estimation. *Inf. Soft. Technol.* 2017; 91:1-21. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.06.002>
4. Tiwari S., Gupta A. Investigating comprehension and learnability aspects of use cases for software specification problems. *Inf. Soft. Technol.* 2017;91:22-43. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.06.003>
5. Tsvetkov V.Ya. Resource Method of Information System Life Cycle Estimation. *European Journal of Technology and Design.* 2014;2(4):86-91. <https://doi.org/10.13187/ejtd.2014.5.147>
6. Laghouaouta Y., Anwar A., Nassar M., Coulette B. A dedicated approach for model composition traceability. *Inf. Soft. Technol.* 2017;91:142-159. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.07.002>
7. Tsvetkov V.Ya. Complementarity of information resources. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2016;2:182-185 (in Russ.). URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=8546>
8. Murav'eva Ya.I. Project life cycle. *Ekonomika i sotsium = Economy and society.* 2016;3(22):22-25 1888-1893 (in Russ.).
9. Dick V.V., Shaytura S.V. Life cycle of information systems. *Vestnik MGTU MIREA (Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal) = Russian Technological Journal.* 2014;3(4):116-129 (in Russ.).
10. Matchin V.T. Onboard database Regeneration. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog = Science and technology of railways.* 2019;4(12):20-29 (in Russ.).
11. Verhulst P.F. Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. *Corresp. Math. Phys.* 1838;10:113-126.
12. Markelov V.M. Situational Modeling in Logistics. *European Journal of Economic Studies.* 2013;6(4):204-209.
13. Sorokin S.A., Benenson M.Z., Sorokin A.P. Methods for evaluating the performance of heterogeneous computer systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal.* 2017;5(6):11-19 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-6-11-19>
14. Riakiotakis I., Ciorba F.M., Andronikos T., Papakonstantinou G. Distributed dynamic load balancing for pipelined computations on heterogeneous systems. *Parallel Computing.* 2011;37(10-11):713-729. <https://doi.org/10.1016/j.parco.2011.01.003>
15. Kawai R., Parrondo J.M.R., Van den Broeck C. Dissipation: the phase-space perspective. *Phys. Rev. Lett.* 2007;98(8):080602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.080602>
16. Singh B., Sharma N. Mechanistic implications of plastic degradation. *Polym. Degrad. Stabil.* 2008;93(3):561-584. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008>
17. Kudzh S.A., Tsvetkov V.Y. Trinitarian systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal.* 2019;7(6):151-167 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-151-167>

Об авторах:

Кудж Станислав Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 56521711400, <http://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Цветков Виктор Яковлевич, доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, советник ректората ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 56069916700

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

About the authors:

Stanislav A. Kudzh, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Rector of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 56521711400, <http://orcid.org/0000-0003-1407-2788>

Viktor Ya. Tsvetkov, Dr. Sci. (Engineering), Dr. Sci. (Economics), Professor, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 56069916700

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

Поступила: 18.12.2019; получена после доработки: 13.07.2020; принята к опубликованию: 25.07.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-34-43>



УДК 621.391.072

Эффективность адаптивного фильтра с алгоритмом слежения за огибающей при приеме сигналов с многопозиционной ФМ на фоне нефлуктуационных помех

Г.В. Куликов[@],
До Чунг Тиен

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

Энергетические и спектральные преимущества сигналов с фазовой манипуляцией предопределили их широкое применение в современных цифровых навигационных, связанных и телевизионных системах. Использование такого вида сигнала в многопозиционном формате с увеличенным количеством возможных фазовых состояний позволяет повысить информационную емкость канального символа, а вследствие этого – пропускную способность радиоканалов. Наличие в радиоканалах нефлуктуационных помех сильно снижает помехоустойчивость приема информации. Известным способом борьбы с такими помехами является использование в приемнике адаптивных нерекурсивных фильтров. В статье оценивается эффективность применения адаптивного нерекурсивного фильтра с алгоритмом настройки весовых коэффициентов, следящим за постоянной огибающей полезного сигнала, при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией на фоне шумовых и нефлуктуационных помех. Рассматриваются два типа таких помех – гармонические и ретранслированные. С помощью компьютерного моделирования определяются оптимальные параметры фильтра (коэффициент адаптации и его длина); оценивается влияние фильтра на помехоустойчивость квадратурного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией для различных комбинаций помех и их интенсивности. Показано, что такой адаптивный фильтр может успешно справляться с наиболее опасными прицельными гармоническими помехами.

Ключевые слова: многопозиционная фазовая манипуляция, гармоническая помеха, ретранслированная помеха, адаптивный фильтр, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки.

Для цитирования: Куликов Г.В., До Чунг Тиен. Эффективность адаптивного фильтра с алгоритмом слежения за огибающей при приеме сигналов с многопозиционной ФМ на фоне нефлуктуационных помех. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):34-43. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-5-34-43>

Efficiency of adaptive filter with envelope tracking algorithm when receiving signals with multi-position PSK against the background of non-fluctuation interferences

Gennady V. Kulikov[@],
Do Trung Tien

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

The energy and spectral advantages of signals with phase-shift keying predetermined their widespread use in modern digital navigation, communications and television systems. The use of this type of signal in a multi-position format with an increased number of possible phase states allows increasing the information capacity of the channel signal, and consequently the throughput rate of radio channels. The presence of non-fluctuation interference in such radio channels greatly reduces the noise immunity of information reception. A well-known way to deal with such interference is to use adaptive non-recursive filters in the receiver. The article evaluates the effectiveness of using such a filter with an algorithm for setting weight coefficients that controls the constant envelope of a useful signal when receiving signals with multi-position phase shift keying against the background of noise and non-fluctuation interference. Two types of such interference are considered – harmonic and relayed. Using computer simulation, the optimal filter parameters (adaptation coefficient and its length) are determined; the effect of the filter on the noise immunity of the quadrature signal receiver with multi-position phase shift keying for various combinations of interference and their intensity is estimated. It is shown that such an adaptive filter can successfully cope with the most dangerous sighting harmonic interference.

Keywords: multi-position phase shift keying, non-fluctuation interference, adaptive filter, noise immunity, bit error rate.

For citation: Kulikov G.V., Do Trung Tien. Efficiency of adaptive filter with envelope tracking algorithm when receiving signals with multi-position PSK against the background of non-fluctuation interferences. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):34-43 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-5-34-43>

Введение

Широкое применение сигналов с фазовой манипуляцией в современных цифровых связных, телевизионных и навигационных системах связано с их энергетическими и спектральными преимуществами. Использование таких сигналов с многопозиционным форматом (М-ФМ) позволяет существенно повысить информационную емкость канального символа и, как следствие, увеличить пропускную способность радиоканала. При этом наличие помех в радиоканале, в том числе, гармонических и ретранслированных,

сильно снижает помехоустойчивость систем передачи данных, особенно при большой позиционности применяемых сигналов [1–7]. Борьба с такими помехами является важной задачей для каждой радиосистемы.

Известным способом борьбы с нефлуктуационными помехами является использование адаптивных нерекурсивных фильтров (рис. 1) с регулируемыми весовыми коэффициентами (ВК) [8–10]. Так, в [8] предложен алгоритм подстройки коэффициентов, учитывающий постоянную огибающую полезного сигнала. В [11] проведен анализ работоспособности алгоритма на примере приема модулированных сигналов с непрерывной фазой и показана его эффективность.

Целью работы является анализ эффективности применения адаптивного фильтра, учитывающего постоянную огибающую полезного сигнала, для подавления гармонических и ретранслированных помех при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией и анализ помехоустойчивости приема.

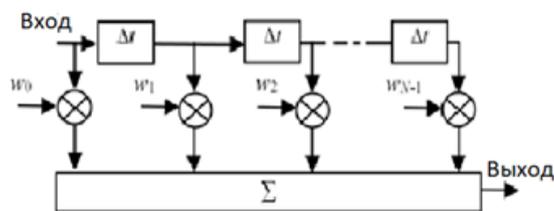


Рис. 1. Адаптивный нерекурсивный фильтр.

Математическая модель сигнала и помех

Передаваемый сигнал М-ФМ на тактовом интервале, равном длительности T_s канального символа, несущего информацию об $k = \log_2 M$ информационных битах, принимает одно из M возможных значений:

$$s_i(t) = S_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i), \quad \varphi_i = \frac{i2\pi}{M}, \quad t \in (0; T_s], \quad i = 0, 1, \dots, M - 1, \quad (1)$$

где $S_0 = \sqrt{2E_s/T_s}$ – амплитуда сигнала; $E_s = kE_b$ – энергия канального символа; E_b – энергия, приходящаяся на один бит информации; ω_0 – несущая частота.

На входе приемника процесс имеет вид:

$$x(t) = s_i(t) + s_{\text{int}}(t) + n(t),$$

где $n(t)$ – стационарный случайный процесс типа «белый гауссовский шум» с нулевым средним значением и дельта-функцией корреляции:

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

N_0 – односторонняя спектральная плотность мощности шума; $s_{\text{int}}(t)$ – нефлуктуационная помеха одного из двух видов (или их совокупность):

1. Гармоническая помеха:

$$s_{\text{int}}(t) = \mu A_0 \cos[(\omega_0 + \Delta\omega_{\text{int}})t + \varphi_{\text{int}}] \quad (2)$$

с относительной интенсивностью μ , частотной расстройкой $\Delta\omega_{\text{int}}$ и случайной начальной фазой φ_{int} .

2. Ретранслированная помеха:

$$s_{\text{int}}(t) = \mu s(t - \tau, \varphi_{\text{int}}), \quad (3)$$

где τ – временная задержка помехи.

Модель приемника и алгоритм работы нерекурсивного фильтра

Для приёма сигнала М-ФМ используется когерентный квадратурный приёмник (рис. 2).

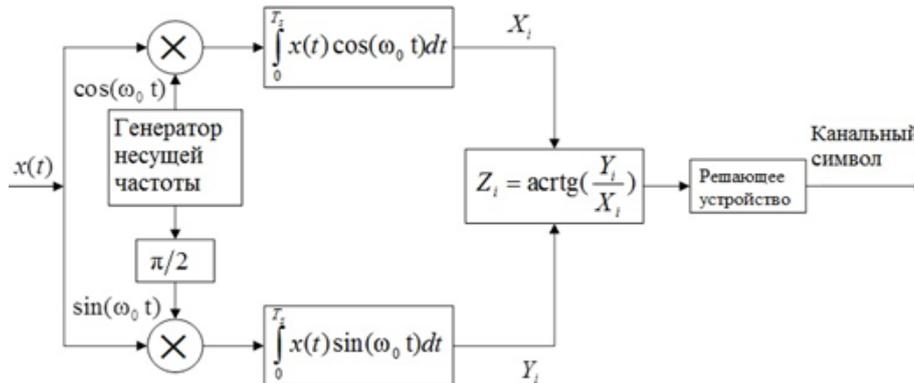


Рис. 2. Когерентный квадратурный приёмник.

На входе приемника установлен адаптивный нерекурсивный фильтр (рис. 1), выполненный на основе алгоритма настройки вектора ВК [8]:

$$\mathbf{W}^{i+1} = \mathbf{W}^i - d \cdot (|b_i|^2 - 1) b_i \mathbf{A}_i^*.$$

Здесь d – коэффициент, определяющий степень инерционности и устойчивость процесса адаптации, $(\cdot)^*$ – знак комплексного сопряжения, $\mathbf{A}_i = [a_i, a_{i-1}, \dots, a_{i-N+1}]^T$ – вектор последовательности входных отсчетов фильтра; $\mathbf{W}^i = [w_0^i, w_1^i, \dots, w_{N-1}^i]$ – вектор ВК в i -й момент времени, b_i – элемент выходной последовательности нерекурсивного фильтра.

Результаты моделирования

Результаты получены с помощью компьютерного имитационного моделирования. При этом использована программа [12].

А. Определение оптимального значения коэффициента адаптации d .

Вначале было определено оптимальное значение коэффициента адаптации d . Оценка проводилась по критерию минимума вероятности битовой ошибки BER для трех значений позиционности сигналов М-ФМ: $M = 2$ (BPSK), $M = 4$ (QPSK) и $M = 8$ (8PSK).

Из рис. 3 видно, что при $d = 10^{-7}$ адаптация осуществляется наилучшим образом, и такое значение этого параметра приближается к оптимальному.

В. Зависимость вероятности битовой ошибки от длины нерекурсивного фильтра.

Точность фильтрации, а, следовательно, и вероятность битовой ошибки BER приемника существенно зависят от длины фильтра N . Это иллюстрирует рис. 4, из которого видно, что при $N < 128$ значения BER возрастают. При $N > 128$ значения BER практически стабилизируются на минимальном уровне.

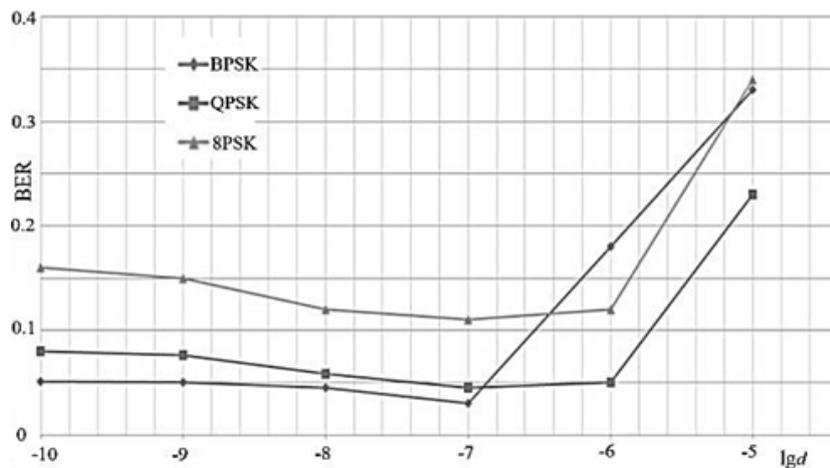


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от коэффициента адаптации d .

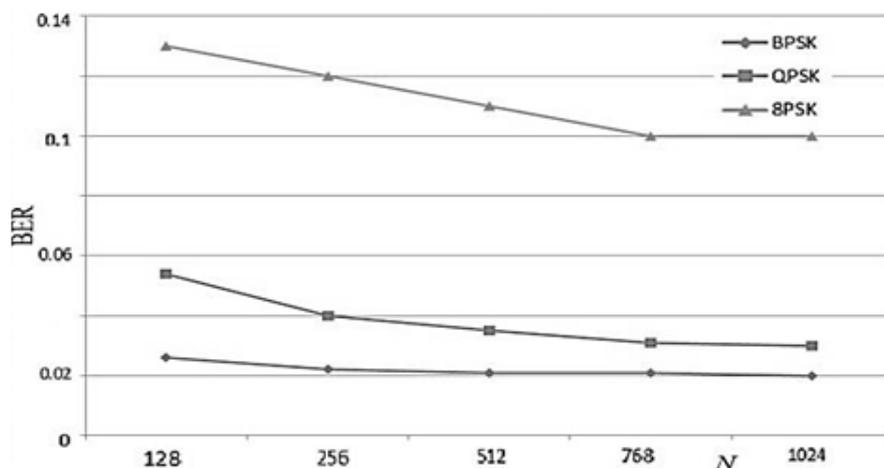


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки от длины фильтра N .

С. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум

Исследования зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум $SNR = E_b/N_0$ были проведены для различной помеховой ситуации в радиоканале: шум, гармоническая помеха, ретранслированная помеха, обе помехи одновременно.

1) На входе приемника присутствует сигнал, шум и гармоническая помеха ($\Delta\omega_{int} = 0$).

На рис. 5 показаны зависимости вероятности битовой ошибки BER от SNR. Для сравнения сплошными линиями даны кривые, полученные без адаптивного фильтра. Наглядно виден положительный эффект использования такого фильтра – вероятность битовой ошибки значительно снижается. Это особенно заметно при большой интенсивности помехи и большой позиционности сигнала. Так, при $\mu = 0.5$ для $M = 2$ использование адаптивного фильтра дает энергетический выигрыш не более 0.5 dB, для $M = 4$ – около 3 dB, для $M = 8$ – более 5 dB. Это объясняется разной шириной спектра сигналов и, соответственно, разной степенью их поражения гармонической помехой.

2) На входе приемника присутствует сигнал, шум и ретранслированная помеха ($\tau = 0.5T_s$).

Установлено, что исследуемый адаптивный фильтр не подавляет ретранслированную помеху, которая имеет такие же параметры огибающей, как и полезный сигнал, и его использование не изменяет величины BER.

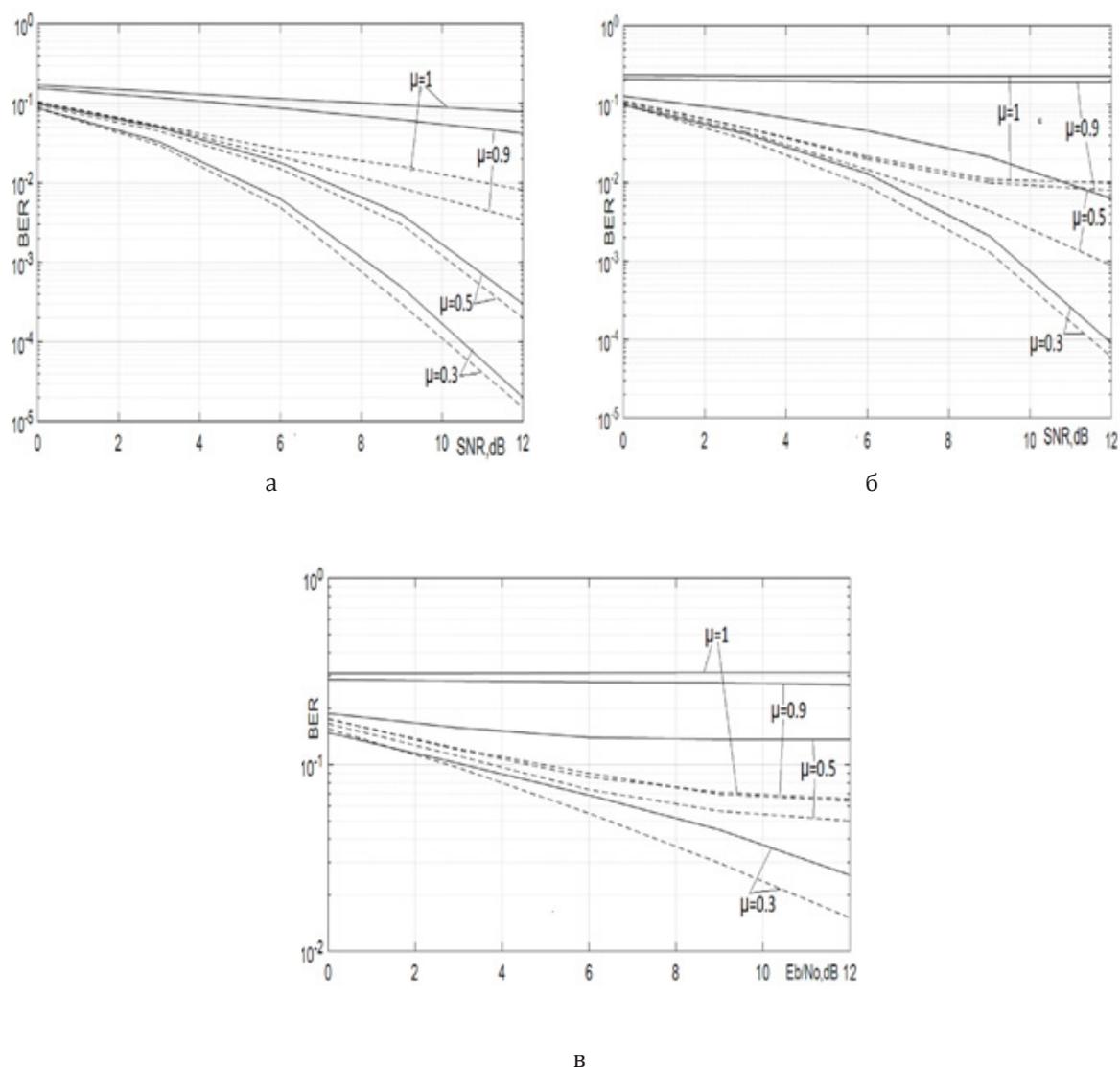


Рис. 5. Зависимость BER от SNR при наличии гармонической помехи:
а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.

3) На входе приемника присутствует сигнал, шум, гармоническая ($\Delta\omega_{int} = 0$) и ретранслированная помеха ($\tau = 0.5T_s$).

При исследовании полагалось, что обе помехи имеют одинаковую интенсивность μ . Видно (рис. 6), что без адаптивного фильтра (сплошные линии) значения BER значительно ухудшаются по сравнению со случаем, когда на входе приемника присутствует только одна гармоническая помеха (рис. 5). Использование фильтра (пунктирные линии) несколько снижает величину BER за счет подавления гармонической помехи, но она все же остается достаточно высокой из-за невозможности подавления ретранслированной помехи.

4) На входе приемника присутствует сигнал, шум и три гармонические помехи с разными частотными расстройками.

На рис. 7 показаны зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум, когда на входе приемника кроме шума присутствуют одновременно три гармонические помехи, имеющие разные частотные расстройки относительно несущей частоты

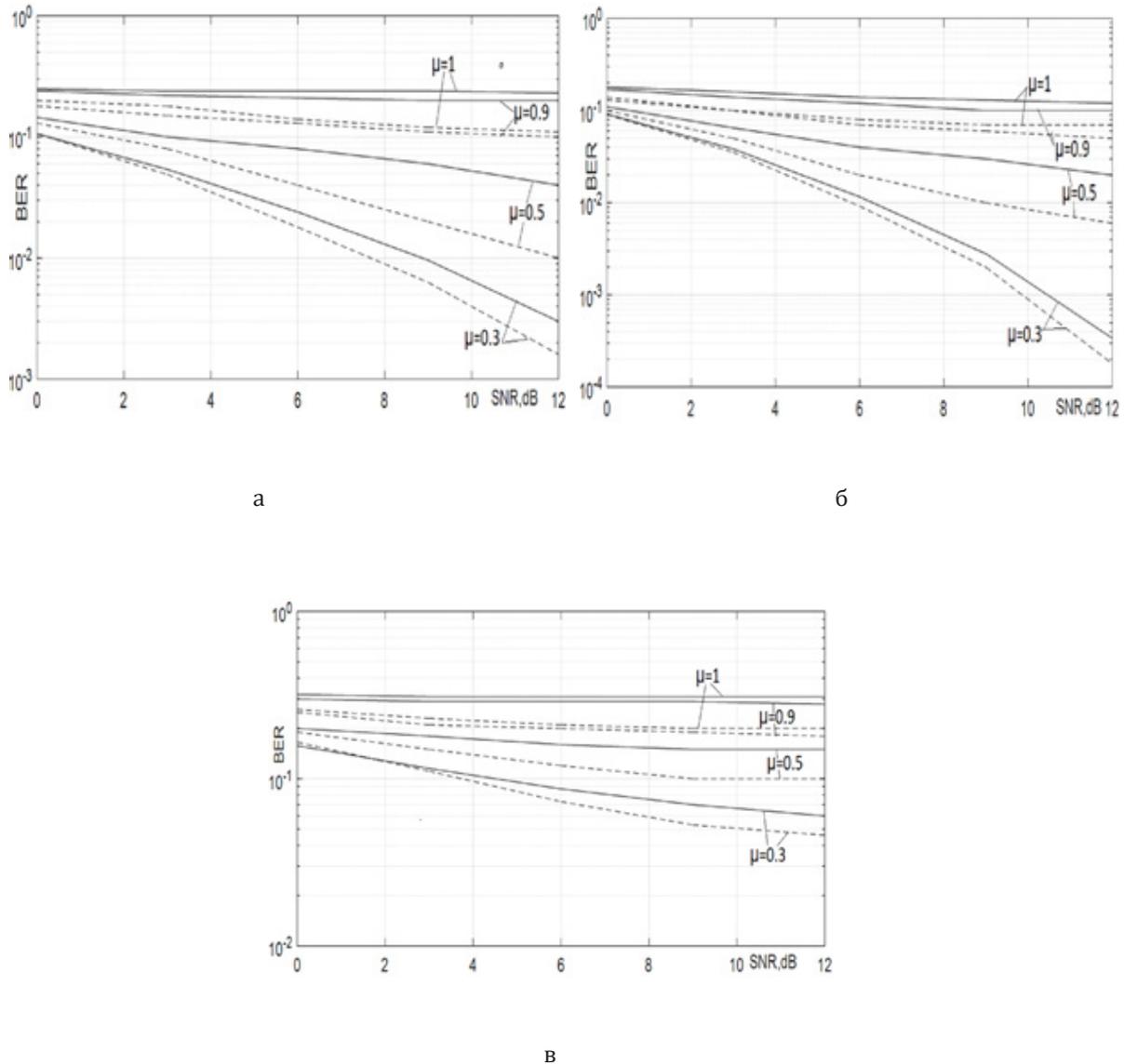


Рис. 6. Зависимость BER от SNR при наличии гармонической и ретранслированной помех: а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.

сигнала. Видно, что, хотя в целом ситуация ухудшилась по сравнению со случаем 1 (одна гармоническая помеха), адаптивный фильтр справляется со своей задачей.

Д. Зависимость вероятности битовой ошибки от количества гармонических помех на входе приемника.

На рис. 8 и 9 показаны зависимости вероятности битовой ошибки при $SNR = 7$ dB от количества гармонических помех L одинаковой интенсивности $\mu = 0.5$, одновременно присутствующих на входе приемника и имеющих разные частотные расстройки $\Delta\omega_{int}$ относительно несущей частоты сигнала. Кривые на рис. 8 получены без адаптивного фильтра, а на рис. 9 – с адаптивным фильтром.

Видно, что при всех L адаптивный фильтр улучшает помехоустойчивость приема, но при увеличении числа гармонических помех эффективность фильтра все же несколько снижается.

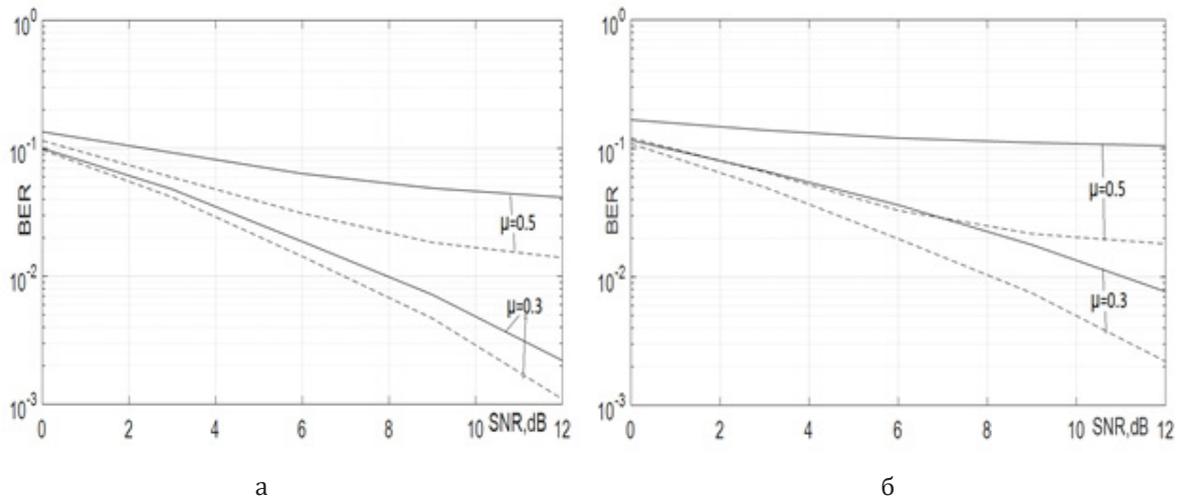


Рис. 7. Зависимость BER от SNR при наличии трех гармонических помех:
а – BPSK, б – QPSK, в – 8PSK.

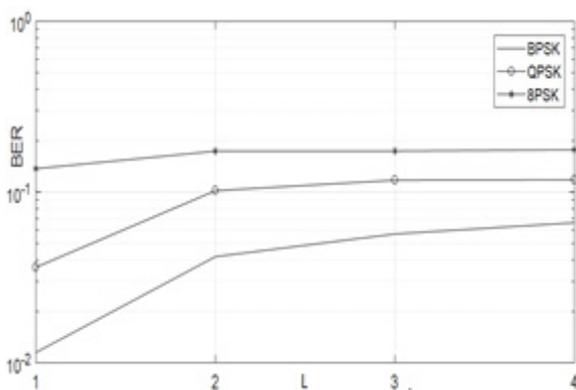


Рис. 8. Зависимость BER от количества гармонических помех L без адаптивного фильтра.

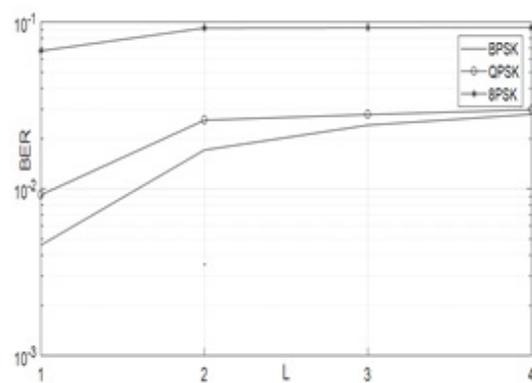


Рис. 9. Зависимость BER от количества гармонических помех L с адаптивным фильтром

Выводы

Проведенный анализ эффективности применения адаптивного фильтра при приеме сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией позволяет сделать следующие выводы:

1. Использование адаптивного нерекурсивного фильтра с алгоритмом подстройки весовых коэффициентов, учитывающим постоянную огибающую полезного сигнала, является эффективным способом для борьбы с гармонической помехой, особенно при ее большой интенсивности.
2. При увеличении числа гармонических помех эффективность адаптивного фильтра снижается.
3. Для эффективной работы адаптивного нерекурсивного фильтра его длина должна быть не менее 256 элементов.
4. Исследуемый адаптивный фильтр неэффективен для подавления ретранслированной помехи.

Литература:

1. Rosenbaum A.S. PSK error performance with Gaussian noise and interference. *BSTJ*. 1969;48:413-442. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01122.x>
2. Nandi M. Symbol Error Probability of Coherent PSK System in the Presence of Two Path Interference. *IJPA*. 2013;5(2):133-137.
3. Mohammad Samir Modabbes and Salem Nasri. Bit Error Rate Analysis for BPSK Modulation in Presence of Noise and Two Co-channel Interferens. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2010;10(5):152-155. http://paper.ijcsns.org/07_book/201005/20100522.pdf
4. Chiani M., Win M.Z., Zanella A. Error Probability for Optimum Combining of M-ary PSK Signals in the Presence of Interference and Noise. *IEEE Trans. Commun.* 2003;51(11):1949-1957. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.819197>
5. Milošević M.S., Stefanović M.Č. Performance Loss Due to Atmospheric Noise and Noisy Carrier Reference Signal in QPSK Communication Systems. *Elektronika i Elektrotehnika*. 2005;58(2):5-9.
6. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с многофазной фазовой манипуляцией при наличии гармонических помех. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2018;11:32-38. <https://doi.org/10.18127/j19998465-201811-06>
7. Нгуен Ван Зунг. Помехоустойчивость когерентного приема сигналов с многофазной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированных помех. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2019;3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
8. Treichler J.R., Agee B.G. A new approach to multipath correction of constant modulus signals. *IEEE Trans. ASSP*. 1983;31(2):459-472. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1983.1164062>
9. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive signal processing. New York: Prentice-Hal, 1985. 492 p.
10. Monzingo R.A., Haupt R.L., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays, 2nd Edition. SciTech Publishing, 2011. 686 p.
11. Куликов Г.В. Два алгоритма адаптивной фильтрации нефлуктуационных помех при приеме модулированных сигналов с непрерывной фазой. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2003;6:19-23.
12. Куликов Г.В., Нгуен Ван Зунг, Кулагин В.П. Программа моделирования канала передачи дискретных сообщений методом QPSK на фоне нефлуктуационных помех. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617939, зарег. 25.06.2019

References:

1. Rosenbaum A.S. PSK error performance with Gaussian noise and interference. *BSTJ*. 1969; 48:413-442. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01122.x>
2. Nandi M. Symbol Error Probability of Coherent PSK System in the Presence of Two Path Interference. *IJPA*. 2013;5(2):133-137.
3. Mohammad Samir Modabbes and Salem Nasri. Bit Error Rate Analysis for BPSK Modulation in Presence of Noise and Two Co-channel Interferers. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2010;10(5):152-155. http://paper.ijcsns.org/07_book/201005/20100522.pdf
4. Chiani M., Win M.Z., Zanella A. Error Probability for Optimum Combining of M-ary PSK Signals in the Presence of Interference and Noise. *IEEE Trans. Commun.* 2003;51(11):1949-1957. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.819197>
5. Milošević M.S., Stefanović M.Č. Performance Loss Due to Atmospheric Noise and Noisy Carrier Reference Signal in QPSK Communication Systems. *Elektronika i Elektrotehnika*. 2005;58(2):5-9.
6. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Nesterov A.V., Lelyuh A.A. Noise immunity of reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of harmonic interference. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2018;11:32-38 (in Russ.). <https://doi.org/10.18127/j19998465-201811-06>
7. Nguyen Van Dung. Noise immunity of a coherent reception of signals with multiple phase shift keying in the presence of a retranslated interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics. [online journal]*. 2019;3 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
8. Treichler J.R., Agee B.G. A new approach to multipath correction of constant modulus signals. *IEEE Trans. ASSP*. 1983;31(2):459-472. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1983.1164062>
9. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive signal processing. New York: Prentice-Hal; 1985. 492 p.
10. Monzingo R.A., Haupt R.L., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays, 2nd Edition. SciTech Publishing; 2011. 686 p.
11. Kulikov G.V. Two algorithms for adaptive filtering of non-fluctuation interference when receiving modulated signals with a continuous phase. *Naukoemkie tekhnologii = Science Intensive Technologies*. 2003;6:19-23 (in Russ.).
12. Kulikov G.V., Nguyen Van Dung, Kulagin V.P. A QPSK method for modeling a discrete message transmission channel against non-fluctuation interference. Certificate of state registration of computer programs No. 2016917939, registered. 06/25/2019. (in Russ.).

Об авторах:

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

До Чунг Тиен, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

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

Do Trung Tien, Postgraduate Student of the Department of Radio electronic systems and complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA - Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia).

Поступила: 24.12.2019; получена после доработки: 17.04.2020; принята к опубликованию: 06.05.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>



УДК 53.06

К 100-летию открытия сегнетоэлектричества

Сегнетоэлектрическая память: современное производство и исследования

Д.А. Абдуллаев^{1,2},
Р.А. Милованов^{1,2},
Р.Л. Волков³,
Н.И. Боргардт³,
А.Н. Ланцев⁴,
К.А. Воротилов^{1,@},
А.С. Сигов¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва 119991, Россия

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Зеленоград, 124498, Россия

⁴ЗАО Скан, Москва 119330, Россия

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

Полупроводниковая индустрия остро нуждается в новых видах запоминающих устройств, сочетающих скоростные характеристики оперативной памяти с энергонезависимостью Flash памяти. Такая универсальная память должна обладать неограниченным числом циклов записи/чтения, низким энергопотреблением и стоимостью, обеспечивать высокую плотность записи информации и потенциал к дальнейшему масштабированию. Сегнетоэлектрическая память FRAM уже более 20 лет рассматривается в качестве одного из кандидатов на роль универсальной памяти. Зарядовый принцип записи, основанный на переключении вектора спонтанной поляризации, обеспечивает высокую энергоэффективность, наряду с энергонезависимостью, высокими скоростями, практически неограниченным числом циклов записи/чтения, длительным временем хранения, а также стойкостью к воздействию специальных факторов. Однако, обладая высоким потенциалом,

сегнетоэлектрическая память все еще не заняла значительной доли рынка энергонезависимых запоминающих устройств в связи с проблемами достижения высоких уровней интеграции. В работе представлен анализ современного состояния производства FRAM. Исследована структура сегнетоэлектрических конденсаторов и ячеек памяти основных производителей коммерчески доступных FRAM – компаний Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Fujitsu и Lapis Semiconductor, проведено сравнение полученных результатов с данными производителей. Все ячейки памяти используют сегнетоэлектрический конденсатор на основе слоя цирконата-титаната свинца PZT толщиной около 70 нм и электродов из IrO_x/Ir или Pt. Переходным технологическим процессом производства FRAM устройств остается 130 нм КМОП процесс, используемый на фабриках Texas Instruments. Обсуждаются возможные пути преодоления проблем скейлинга и дальнейшего развития технологии сегнетоэлектрических устройств, включая ALD-технологии создания бинарных сегнетоэлектриков, пьезоэлектронные транзисторы, структуры на основе двумерных полупроводников и пр. Удастся ли FRAM технологии расширить область применений и разрешить одно из основных противоречий современных вычислительных устройств между быстродействующим процессором и относительно медленной памятью, зависит от решения вопросов интеграции новых технологических решений.

Ключевые слова: энергонезависимая память, сегнетоэлектрические запоминающие устройства, интегральная схема, ячейка памяти, цирконат-титанат свинца, оксид гафния.

Для цитирования: Абдуллаев Д.А., Милованов Р.А., Волков Р.Л., Боргардт Н.И., Ланцев А.Н., Воротилов К.А., Сигов А.С. Сегнетоэлектрическая память: современное производство и исследования. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):44-67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>

To the 100th anniversary of the discovery of ferroelectricity

Ferroelectric memory: state-of-the-art manufacturing and research

Daniil A. Abdullaev^{1,2},
Roman A. Milovanov^{1,2},
Roman L. Volkov³,
Nikolay I. Borgardt³,
Andrey N. Lantsev⁴,
Konstantin A. Vorotilov^{1,@},
Alexander S. Sigov¹

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

³National Research University of Electronic Technology – MIET, Moscow 124498, Russia

⁴CJSC Scan, Moscow 119330, Russia

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

Semiconductor industry calls for emerging memory, demonstrating high speed (like SRAM or DRAM), nonvolatility (like Flash NAND), high endurance and density, good scalability, reduced energy consumption and reasonable cost. Ferroelectric memory FRAM has been considered as one of the emerging memory technologies for over 20 years. FRAM uses polarization switching that provides low power consumption, nonvolatility, high speed and endurance, robust data retention, and resistance to data corruption via electric, magnetic fields and radiation. Despite the advantages, market share held by FRAM manufacturers is insignificant due to scaling challenges. State-of-the-art FRAM manufacturing is studied in this paper. Ferroelectric capacitors and memory cells made by main commercial FRAM manufacturers (Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Fujitsu и Lapis Semiconductor) are explored. All memory cells are based on the lead zirconate titanate PZT capacitor with the thickness of about 70 nm and IrO_x/Ir or Pt electrodes. The leading FRAM technology remains the 130 nm node CMOS process developed at Texas Instruments fabs. New approaches to further scaling and new devices based on ferroelectrics are reviewed, including binary ferroelectrics deposited by ALD techniques, piezoelectronic transistors, ferroelectric/2D-semiconductor transistor structures, and others. Whether FRAM technology will be able to resolve one of the main contradictions between a high-speed processor and a relatively slow nonvolatile memory depends on the success of the new technologies integration.

Keywords: non-volatile memory, ferroelectric memory, integrated circuit, memory cell, lead zirconate titanate, hafnium oxide.

For citation: Abdullaev D.A., Milovanov R.A., Volkov R.L., Borgardt N.I., Lantsev A.N., Vorotilov K.A., Sigov A.S. Ferroelectric memory: state-of-the-art manufacturing and research. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(5):44-67 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-44-67>

Введение

Сегнетоэлектрические запоминающие устройства (FRAM или FeRAM – Ferroelectric Random Access Memory, т.е. сегнетоэлектрическая память с произвольной выборкой) рассматриваются микроэлектронной индустрией в качестве одного из перспективных видов энергонезависимых запоминающих устройств (ЗУ), которые могут сменить Flash память, обладающую недостаточной скоростью и ресурсом. Такая универсальная память должна сочетать в себе быстроту динамической памяти DRAM (Dynamic RAM) и энергонезависимость Flash памяти, обладая при этом высокой информационной емкостью, низким энергопотреблением, должна быть дешевой и иметь хорошие предпосылки к скейлингу. Другими рассматриваемыми кандидатами являются резистивная память (RRAM или ReRAM – Resistive RAM), память на основе фазового перехода (PRAM – Phase-change RAM), магниторезистивная память (MRAM – Magnetoresistive RAM), в том числе на переносе спинового момента (STT-RAM – Spin-transfer torque RAM). Основные технические параметры, физические, технологические и конструктивные особенности перспективных энергонезависимых ЗУ, в сравнении с занимающими основную долю рынка DRAM и Flash NAND, представлены в таблице [1–12]. Все они (FRAM, MRAM, RRAM, PRAM) отличаются энергонезависимостью, высокими скоростями записи/считывания и длительным временем хранения информации, однако находятся на различных стадиях освоения промышленного производства.

Большинству требований, предъявляемых к универсальной памяти, соответствует технология FRAM. Отличительной особенностью FRAM является зарядовый принцип записи, основанный на переключении поляризации в сегнетоэлектрическом конденсаторе, что обеспечивает энергонезависимость наряду с высокой энергоэффективностью, скоростями чтения/записи, большим числом циклов перезаписи ($10^{12} - 10^{15}$) и длительным временем хранения (~ 10 лет) [3–5]. Сегнетоэлектрические материалы отличаются также высокой стойкостью к воздействию специальных факторов, что определяет перспективы их применения в особых условиях эксплуатации [13–15].

Материалы и конструкции

Сегнетоэлектриками называют класс кристаллических диэлектриков, в которых возникает спонтанная поляризация, существующая независимо от наличия внешнего электрического поля и меняющая свое направление при изменении направления внешнего поля [16]. Именно этот факт существования устойчивого состояния спонтанной поляризации и ее переключения внешним электрическим полем используется для записи и хранения информации.

Идея использования сегнетоэлектриков для записи информации появилась еще в 50-е годы прошлого столетия, когда делались попытки использования объёмных кристаллов [17], а в 70-е годы был предложен элемент памяти на основе сегнетоэлектрического транзистора [18]. Эти исследования не привели к созданию промышленных технологий сегнетоэлектрической памяти в силу недостаточной стабильности наблюдаемых эффектов.

Промышленный бум освоения данной технологии приходится на начало 2000-х гг. Интеграцией сегнетоэлектрических материалов занимались ведущие компании и исследовательские центры [2, 19]. Для интеграции использовались классические кислородно-октаэдрические сегнетоэлектрики, среди которых особую роль играют перовскиты [16, 20]. Классическими примерами таких материалов являются твердые растворы цирконата-титаната свинца (PZT – $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$) и титаната бария-стронция (BST – $\text{BaSr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$). PZT оказался наиболее востребованным для FRAM применений в силу относительно низкой температуры кристаллизации перовскитной фазы ($400-700$ °C) и высокой величины остаточной поляризации ($20-50$ мкКл/см²), при этом наибольшее распространение получили твердые растворы вблизи морфотропной области с примерно равным соотношением циркония и титана [21]. PZT обладает также высоким значением пьезоэлектрического коэффициента, что обеспечивает его, а также релаксорного сегнетоэлектрика $(1-x)[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]-x\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT), доминирующее положение на рынке пьезоэлектрических микроэлектромеханических систем (MEMS) [22, 23]. Необходимо отметить, что последнее десятилетие в ряде стран ведется кампания по запрету свинецсодержащей керамики в связи с экологическими соображениями, однако, до сих пор не удалось найти приемлемую по параметрам замену [24, 25]. К тому же этот вопрос не стоит перед микроэлектронной индустрией, которая успешно решает вопросы утилизации куда более опасных соединений. Более важным представляется примесное загрязнение технологического оборудования, которое приводит к необходимости создания специализированных участков при изготовлении сегнетоэлектрического конденсатора (FRAM модуля), что увеличивает стоимость производства и сроки проведения ис-

Сравнение основных характеристик различных видов памяти [1–12]

Параметры	DRAM	Flash (NAND)	FRAM	MRAM/ STT-RAM	PRAM	RRAM
Энергозависимость	нет	да	да	да	да	да
Информация	заряд	заряд	заряд	сопротивление	сопротивление	сопротивление
Физический эффект	заряд конденсатора	заряд в плавающем затворе	поляризация конденсатора	туннельное магнитное сопротивление	изменение фазы материала	образование проводящих каналов
Ячейка памяти	1Т1С	1Т	1Т1С	1Т1Р	1Т1Р	1Т1Р
Состояние “1”	заряженный конденсатор	заряд в плавающем затворе	вектор спонтанной поляризации	сонаправленные векторы намагнитченности	кристаллическая фаза	наличие проводящих каналов
Состояние “0”	разряженный конденсатор	отсутствие заряда в плавающем затворе	изменение направления вектора поляризации	противонаправленные векторы намагнитченности	аморфная фаза	отсутствие проводящих каналов
Рабочее напряжение, В	1.5–2	16–20	1.8–3	1–3	1.5–1.8	3.3
Ток записи, мкА	~10 ³	~10 ³	~1	~10–10 ²	~100	~10 ² –10 ³
Время чтения, нс	30	50	20–50	3–20	20	–
Время записи/стирания, нс	50/50	10 ⁴ /10 ³	50/50	20/20	30/20	103/102
Число циклов перезаписи	неограниченно	10 ⁵	10 ¹² –10 ¹⁵	10 ¹⁵	10 ⁹ –10 ¹²	10 ⁶
Размер ячейки (F ²)/техпроцесс (нм)	6–10/18	5/14	20–40/130	16–40/65 (MRAM) 6–20/45 (STT-RAM)	4–19/45	6–10/40
Структура	TE/High-k D/BE	Si/D/FG/D/G	TE/PZT/BE	MTJ (RL/BL/PL)	TE/GST/Heater/BE	TE/Ox/BE
Функциональные материалы	Ta ₂ O ₅ , Al ₂ O ₃ , HfO ₂ , ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ /ZrO ₂	λ-Si (FG)	Pb(Zr _{1-x} Ti _x)O ₃	FeNi/Ru/FeNi (RL) AlO или MgO (BL) CoFeB/Ru/CoFeB (PL) FeNi/Ru/FeNi/PTMn (FL)	GexSbyTez (GST) TiN/TiSiN (Heater)	TaO, HfO, TiNiO/TiO, ZrTe/AlO, Ir/TaO/TaN
Основные производители	Samsung, Intel, SK Hynix, Nanay, Elpida, Winbond	Micron, Samsung, Sandisk/Toshiba, SK Hynix, Intel	Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Fujitsu, Lapis	Everspin, Sony, Samsung, Avalancheche Technology	Micron/Intel, Samsung	Panasonic, AdestoTechnologies, Fujitsu
Преимущества	низкая цена, высокая плотность, быстроедействие	низкая цена, высокая плотность	малое энергопотребление, быстроедействие	наибольший срок службы, быстроедействие	высокая плотность, быстроедействие	высокая плотность
Недостатки	энергозависима, малое время хранения бита	медленная запись, высокое рабочее напряжение	разрушающее чтение, проблема масштабирования	большой ток записи, низкая плотность	большой ток записи, малый срок службы	большой ток записи, низкая скорость записи

Примечание: F – фактор площади ячейки; 1Т1С – 1 транзистор, 1 конденсатор; 1Т1Р – 1 транзистор, 1 резистор; TE – верхний электрод; BE – нижний электрод; D – диэлектрик; Si – кремний; G – затвор; FG – плавающий затвор; Heater – нагреватель; Ox – оксид; MTJ – magnetic tunnel junction (магнитный туннельный переход); RL – reference layer (фиксированный слой); BL – barrier layer (барьерный слой); FR – free layer (свободный слой); PL – pinned layer (опорный слой).

следовательских работ по интеграции. FRAM устройства на основе PZT разрабатывали фирмы Ramtron, Samsung, Toshiba, Texas Instruments, Fujitsu, IBM, а также зеленоградский Микрон [2, 3, 9, 10, 14, 19, 21].

После открытия Б.М. Вулом в 1944 году сегнетоэлектрических свойств у титаната бария BaTiO_3 данный материал служил одним из базовых модельных материалов кислороднооктаэдрических сегнетоэлектриков и сыграл значительную роль в развитии физики сегнетоэлектриков [16]. Несмотря на хорошо изученные свойства, материалы на основе титаната бария не нашли применения при создании FRAM, что связано с рядом физических и технологических ограничений (наличие в рабочем диапазоне фазовых переходов, высокие температуры кристаллизации и ее особенности и пр.). В то же время пленки твердых растворов титаната бария-стронция BST, находящиеся в парафазе, активно исследуются для использования в качестве материалов с высокой диэлектрической проницаемостью, прежде всего для применений в ячейках оперативной памяти (DRAM) в качестве high- k диэлектрика [26, 27], а также в СВЧ-устройствах с электрически управляемой емкостью [28, 29].

Большой интерес для FRAM применений вызывают так называемые слоистые перовскиты, прежде всего танталаты и ниобаты висмута-стронция $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) и его твердых растворов $\text{SrBi}_2(\text{Ta}_x\text{Nb}_{1-x})_2\text{O}_9$ (SBTN), в которых два перовскитоподобных слоя танталата (ниобата) стронция разделены слоем оксида висмута [20]. В данных материалах сегнетоэлектричество было открыто в 1961 г. Г.А. Смоленским [30], а в середине 90-х гг. фирма Symetrix анонсировала открытие нового материала (название которого было зашифровано аббревиатурой Y1), не обладающего эффектом усталости, состав которого впервые был опубликован в результате независимого исследования М. Клея [31]. Разработкой FRAM с использованием слоистых перовскитов SBT и SBTN занимались фирмы Symetrix, Matsushita, ROHM Semiconductor, а также консорциум IMEC, STMicroelectronics, Applied Materials. Несмотря на демонстрации успешной интеграции (например, [32, 33]), одной из основных проблем использования слоистых перовскитов явилась более высокая, чем у PZT, температура кристаллизации. Другие слоистые перовскиты на основе титаната висмута-лантана $(\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x)_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BLT) разрабатывала компания Hynix, которая является держателем патентов в данном направлении и производила FRAM объемом до 16 Мб [34].

Наконец в 2011 г. были обнаружены сегнетоэлектрические свойства в ультратонких пленках HfO_2 , легированных Si, сформированных методом ALD (Atomic Layer Deposition) [35], что привело к появлению большого числа исследовательских работ в данном направлении. После этого сегнетоэлектрические свойства были обнаружены в пленках чистого и легированного HfO_2 [36], $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_2$ [37, 38] и ZrO_2 [39, 40]. Обычно в данных составах реализуются неполярные фазовые состояния, а возникновение сегнетоэлектрического состояния связывают с существованием при определенных условиях полярной орторомбической фазы Pca_2 [28, 41]. Среди причин, вызывающих анизотропные напряжения, приводящие к стабилизации орторомбической фазы, называют легирование, влияние поверхности, островковую коалесценцию, рассогласование решеток при термическом расширении, влияние кислородных вакансий [42]. Пока материалы на основе бинарных сегнетоэлектриков не внедрены в промышленное производство, но ведутся активные исследования по их интеграции [43].

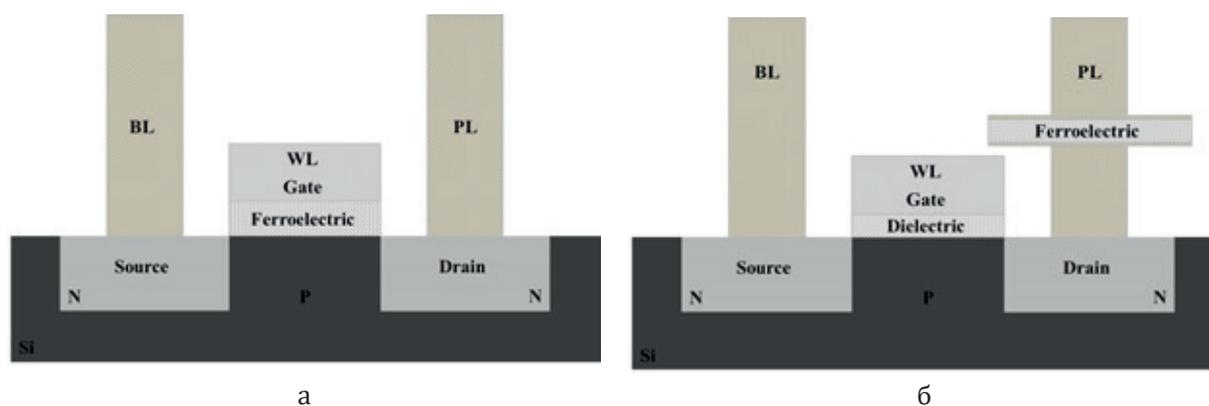


Рис. 1. Структура ячеек памяти FRAM 1Т (а) и 1Т1С (б).
 BL – битовая линия; WL – словарная линия; PL – линия подложки.

В процессе развития технологии FRAM было предложено множество конструкций ячеек памяти (ЯП) [3]. Наибольший интерес с точки зрения возможности масштабирования представляет ячейка 1Т, т.е. транзистор, в котором в качестве подзатворного диэлектрика используется слой сегнетоэлектрика (рис. 1а). Переключение вектора спонтанной поляризации приводит к изменению зарядового состояния на границе раздела сегнетоэлектрик-полупроводник и соответствующей модуляции поверхностного потенциала полупроводника [18]. Таким образом, в данном случае операция считывания не требует переключения поляризации. Сложностью реализации такой ЯП является необходимость максимально близкого расположения сегнетоэлектрика и полупроводника с минимально возможной толщиной подслоя между ними и обеспечение высокого качества границы раздела диэлектрик (сегнетоэлектрик) – полупроводник, включая низкую плотность поверхностных состояний [44]. Данный тип ЯП пока не был реализован в промышленном производстве. Поэтому наибольшее распространение получили ЯП, использующие для считывания информации регистрацию токового отклика при переключении вектора поляризации в сегнетоэлектрическом конденсаторе. Такие ячейки используют аналогичную DRAM и SRAM (Static RAM) архитектуру и состоят из одного или нескольких транзисторов и конденсаторов: 1Т1С, 2Т2С и 6Т4С. На рис. 1б показана типичная ЯП 1Т1С с вертикальным расположением сегнетоэлектрического конденсатора. ЯП 2Т2С и 6Т4С являются вариантом коммутации структур 1Т1С. При создании FRAM емкостью 128 Мб Toshiba использовала так называемую chain архитектуру, аналогичную NAND [45].

Интеграция в полупроводниковые технологии

На рис. 2 показаны прогнозы развития технологии FRAM согласно International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) [46] и уровень реального производства коммерческих FRAM. Первоначально отрасль чрезвычайно оптимистично смотрела на скейлинг параметров FRAM, как это видно из ITRS редакции 2001–2005 гг. Осознание сложностей интеграции произошло в ITRS редакции 2007 г., согласно которой предполагалось уменьшение топологических норм с 180 нм в 2007 г. до 65 нм к 2019 г. В более поздних редакциях доклада ITRS (2009–2013 гг.) прогноз внедрения меньших технологических норм производства сдвигался на более поздние сроки. Между тем, первые серийные образцы FRAM, выполненные по технологическим нормам 130 нм, появились на

рынке в 2007 году, опередив прогноз на 6 лет. На сегодняшний день коммерчески доступные ИС с FRAM предлагают 4 компании – Texas Instruments (TI), Cypress Semiconductor, Fujitsu Limited и Lapis Semiconductor, при этом наименьшие топологические нормы производства по-прежнему составляют 130 нм, что связано со сложностью освоения 3D технологии сегнетоэлектрического конденсатора.

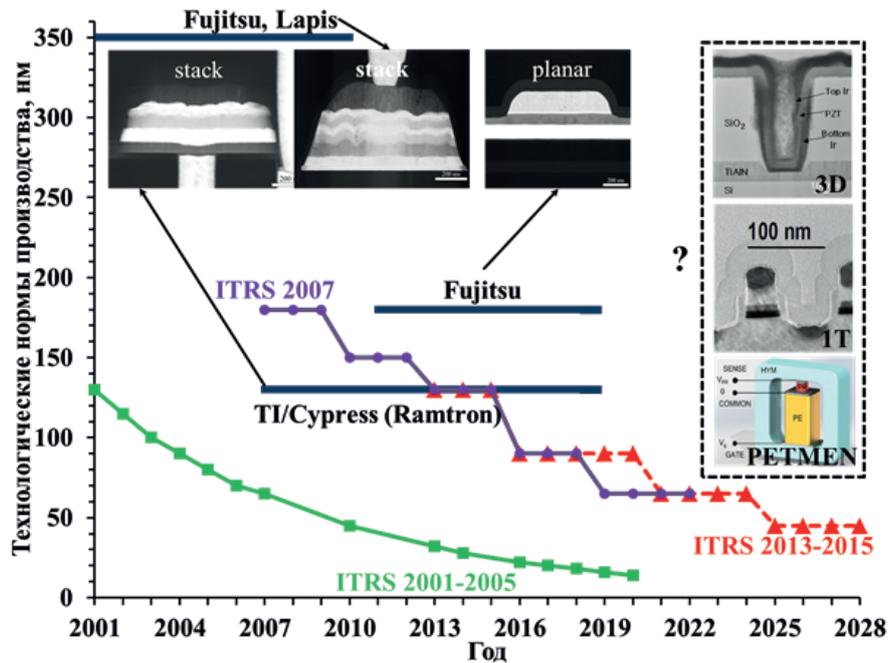


Рис. 2. Перспективные планы ITRS развития технологии FRAM и реальный уровень освоения проектных норм основными игроками на рынке FRAM (Fujitsu, Lapis, TI, Cypress) [3, 6–10, 46–52].

Основным идеологом развития FRAM технологий и держателем патентов являлась фирма Ramtron, которая лицензировала технологию FRAM таким крупным компаниям как Texas Instruments, Infineon, Fujitsu, Hitachi, Toshiba, Rohm, Samsung, Asahi Chemical, NEC.

Компания Fujitsu тесно сотрудничала с Ramtron, и в 1999 году на заводе в г. Ивата (Япония) выпустила серийные образцы 8-битных FRAM микрочипов по технологии 500 нм с объемом памяти 64 и 256 кб. В 2001 году компании Fujitsu и Ramtron разработали 350 нм FRAM техпроцесс, что обеспечило Fujitsu на тот момент лидирующие позиции в данной области. Дальнейшее сотрудничество с Ramtron прекратилось и 180 нм FRAM-техпроцесс фирма разрабатывала совместно с Seiko Epson, запуск производства предполагался в 2006–2007 гг., однако первые упоминания о старте продаж приходятся на 2011 год. В настоящее время Fujitsu предлагает 50 8-битных микрочипов входящих в 6 семейств ИС с FRAM памятью объемом от 4 кб до 8 Мб.

Компания TI начала активную работу в области FRAM в 2001 году после заключения соглашения с Ramtron. В 2004 году Ramtron и TI представили прототип 4 Мб FRAM, выполненную по технологии 130 нм, серийное производство кристаллов началось в 2007 году, значительно опередив, как уже отмечалось выше, планы отрасли. В настоящее время фирма TI обладает двумя специализированными фабрами DMOS5 и DMOS6 в Далласе (США), реализующими 130 нм КМОП процесс с 5-ти уровневой медной металлизацией

и изолирующим диэлектриком из фторсиликатного стекла. Компания предлагает 4 семейства из 138 наименований FRAM объемом от 0.5 кб до 256 кб с архитектурой 1Т1С.

В 2012 году компания Cypress Semiconductor поглотила фирму Ramtron с переходом прав производства на мощностях TI. На сегодняшний день компания Cypress Semiconductor занимает лидирующие позиции среди производителей FRAM и предлагает 244 наименования ИС объемом от 4 кб до 4 Мб с различной организацией памяти и интерфейсами, в том числе с 2017 г. – с архитектурой ЯП 2Т2С.

Lapis Semiconductor, являющаяся дочерней компанией ROHM Semiconductor, занимает особую нишу на рынке микрочипов для смарт-карт, RFID (Radio Frequency Identification) и UHF (ultra high frequency) меток благодаря малому энергопотреблению FRAM. Компания производит 10 ИС объемом от 32 кб до 1 Мб с рабочими частотами от 3.4 до 40 МГц. Отметим, что в группе компаний ROHM разработкой FRAM технологий занималась компания Oki Electric Industry, которая совместно с Symetrix разрабатывала FRAM память на SBT и анонсировала производство в 2011 году [2].

Анализ современного производства FRAM

Анализ современного производственного уровня проводился на примере коммерчески доступных схем различных производителей. Исследование вертикальных сечений выполняли методами растровой ионной (РИМ, Quanta 200 3D фирмы FEI) и электронной (РЭМ) микроскопии (Nova NanoSEM 230 фирмы FEI), просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ) с использованием локального рентгеноспектрального анализа (ЛРСА) – Titan Themis 200 фирмы FEI.

Для исследования конструктивно-технологического строения FRAM памяти компании Fujitsu был выбран программируемый микроконтроллер (МК) MB85R4M2T. На рис. 3а приведено РЭМ изображение вертикального сечения кристалла в области расположения ЯП FRAM, а на рис. 3б – изображение сегнетоэлектрических конденсаторов после удаления вышележащих слоёв проводников и диэлектрика. На них хорошо различимы сегнетоэлектрические конденсаторы (FCap), контактные столбики (plug) от транзисторов и верхних обкладок конденсаторов (top electrode) к вышележащим слоям проводников (M1).

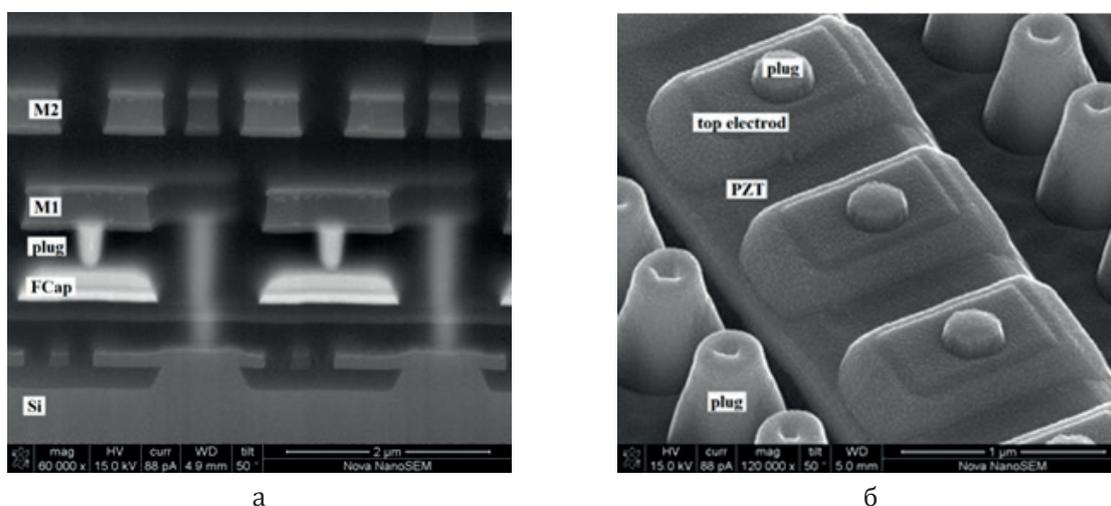


Рис. 3. РЭМ изображения вертикального сечения (а) и слоя сегнетоэлектрических конденсаторов (б) кристалла МК MB85R4M2T компании Fujitsu в области ЯП FRAM.

ЯП FRAM выполнены по архитектуре 1Т1С и имеют планарную структуру, в которой конденсатор смещен в сторону относительно транзистора и коммутирует с ним через первый уровень проводников (М1) (рис. 3а). Подобное расположение элементов соответствует технологическим процессам с топологическими нормами 500 и 350 нм [7]. Но учитывая результаты проведенных исследований (рис. 3), можно утверждать, что данная конструкция была распространена на нормы 180 нм, используемые в производстве ИС MB85R4M2T.

На рис. 4 приведены ПРЭМ изображение и результаты ЛРСА с распределением элементов в области расположения сегнетоэлектрического конденсатора. Нижний электрод выполнен в виде сплошной платиновой (Pt) балки с нанесенным на неё слоем PZT. В качестве верхней обкладки конденсатора используется слой IrO_x , а для диффузионно-барьерного слоя – оксид алюминия, покрывающий весь конденсатор и препятствующий диффузии свинца и водорода.

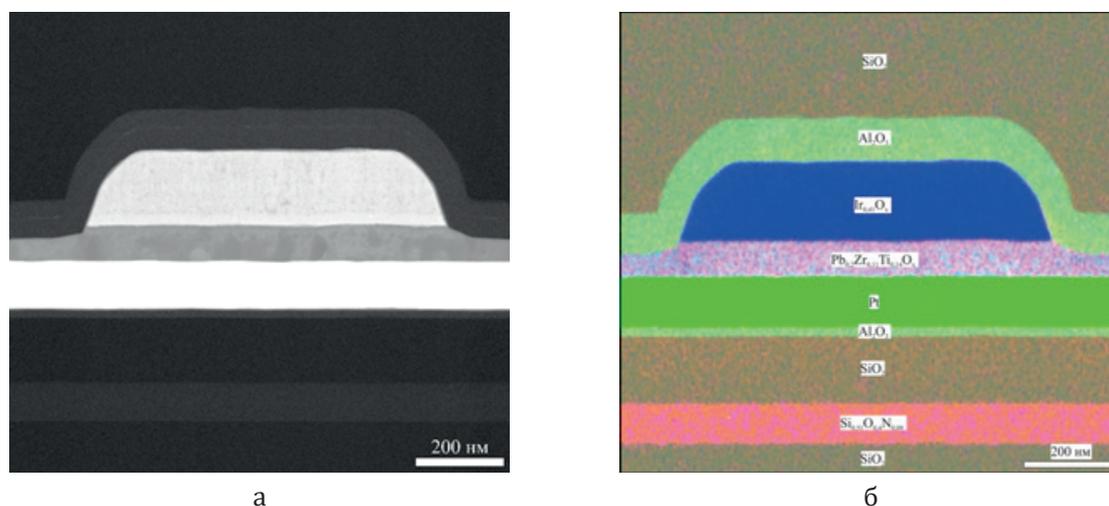


Рис. 4. ПРЭМ изображение структуры (а) и результаты ЛРСА (б) области сегнетоэлектрического конденсатора ИС MB85R4M2T компании Fujitsu.

На рис. 5 приведены РИМ и РЭМ изображения ортогональных вертикальных сечений кристалла ИС MSP430FR5988 фирмы TI в области расположения ЯП FRAM, созданных по архитектуре 1Т1С с вертикальной конструкцией ячейки. На рис. 6 показаны ПРЭМ изображение и результаты ЛРСА, демонстрирующие структуру и размеры сегнетоэлектрического конденсатора. Конденсатор имеет многослойную структуру и выполнен в форме усеченной пирамиды. Результаты ЛРСА (рис. 6б) соответствуют приведенным в литературе данным о его строении [3, 6, 49].

Производство кристаллов ИС с FRAM компании TI основано на стандартной 130 нм медной КМОП-технологии, а создание слоя сегнетоэлектрических конденсаторов требует дополнительного использования двух масок – для создания конденсатора и межуровневых контактов. После создания переходных вольфрамовых (W) контактов от транзисторов на поверхности кристалла создается диффузионно-барьерный слой из TiAlN и осаждаются Ir электроды. Далее методом металлоорганического химического осаждения из газовой фазы создается сегнетоэлектрический слой PZT толщиной 70 нм, позволяющий работать при низких напряжениях и токах переключения [6]. Пленка формируется

в поликристаллическом состоянии со столбчатой структурой зерен перовскита размером ~80 нм. Затем на сегнетоэлектрик осаждаются слои верхнего электрода IrO_x/Ir и слой TiAlN в качестве барьера и жесткой маски. Для создания нижнего барьера TiAlN , нижнего Ir электрода, PZT, верхнего IrO_x/Ir электрода и жесткой маски TiAlN используется одна литографическая маска. Конечная толщина всей структуры сегнетоэлектрического конденсатора составляет 250 нм. Боковые стенки конденсатора покрываются барьерным слоем AlO_x , препятствующим диффузии водорода в ходе последующих технологических операций. Завершающими операциями являются нанесение стоп-слоя Si_xN_y и межслойного SiO_2 . Дальнейшие операции проводят по стандартной технологии медной (Cu) металлизации [6, 49, 53]. Технология производства FRAM микрочипов под маркой компании Cypress не отличается от рассмотренной выше.

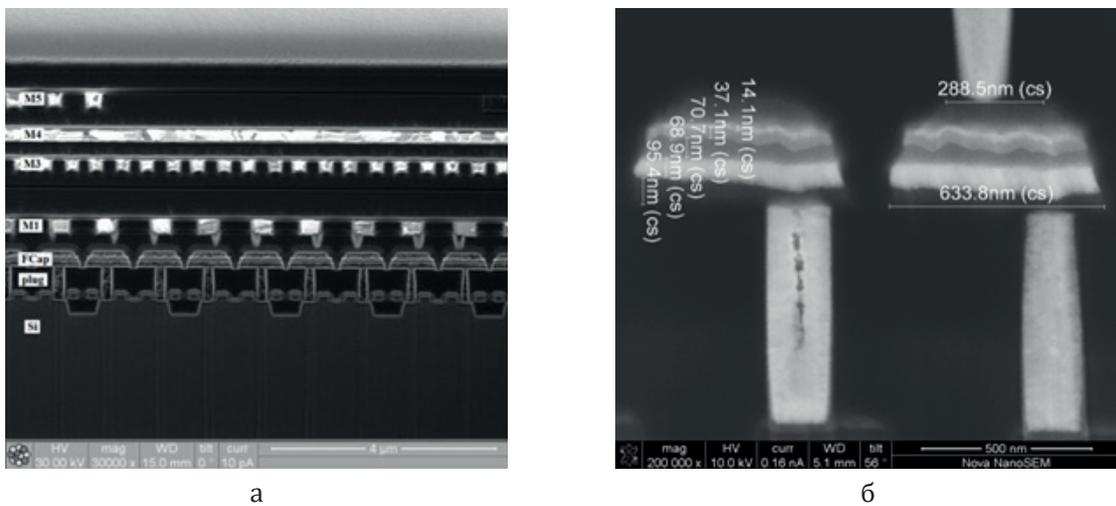


Рис. 5. РИМ (а) и РЭМ (б) изображения ортогональных вертикальных сечений кристалла ИС MSP430FR5988 фирмы TI в области ЯП FRAM (cs – поправка измерений на угол наклона образца).
Si – кремниевая подложка; plug – контактные столбики;
FCap – сегнетоэлектрические конденсаторы; M1 – M5 – слои проводников.

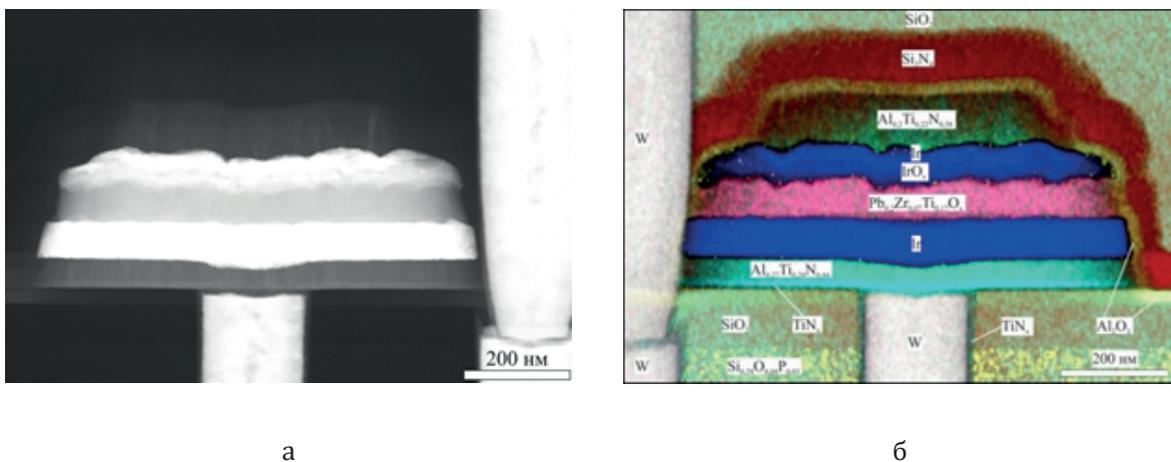


Рис. 6. ПРЭМ изображение структуры (а) и результаты ЛРСА (б) области сегнетоэлектрического конденсатора ИС MSP430FR5988 фирмы TI.

Для исследования конструктивно-технологического строения FRAM кристаллов компании Laris был выбран программируемый МК MR45V256A. На рис. 7 приведены РЭМ и ПРЭМ изображения с результатами ЛРСА, показывающие структуру сегнетоэлектрического конденсатора и применяемые материалы.

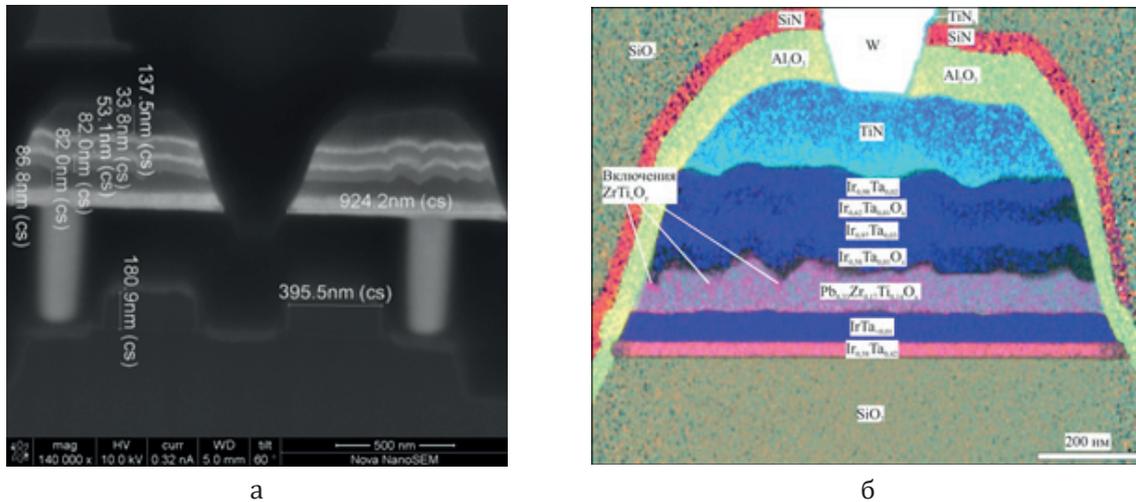


Рис. 7. РЭМ изображение структуры сегнетоэлектрического конденсатора (а) ИС MR45V256A компании Laris (cs – поправка измерений на угол наклона образца), результаты ЛРСА сегнетоэлектрического конденсатора (б).

ИС MR45V256A с FRAM произведена с технологическими нормами 180 нм, ЯП выполнена по архитектуре 1Т1С с вертикальной конструкцией. Сегнетоэлектрические конденсаторы имеют многослойную структуру, схожую со строением конденсаторов производства TI с характерной формой усеченной пирамиды, свидетельствующей о процессе травления с использованием одной маски [54]. В качестве сегнетоэлектрика, как и у большинства остальных производителей, используется PZT, что опровергает имеющуюся в литературе информацию о возможном использовании SBT. В отличие от TI, многослойная структура конденсаторов Laris включает слои Ir_xTa_y и $\text{Ir}_x\text{Ta}_y\text{O}_z$.

Исследования

С точки зрения современного уровня производства устройств памяти (NAND и DRAM) основной проблемой технологии FRAM является большой размер ЯП ($>20 F^2$) [10, 12, 52]. Проблема масштабируемости связана с уменьшением токового сигнала (переключаемого заряда) при уменьшении площади сегнетоэлектрического конденсатора. Переход на технологические нормы 90 нм и ниже связан с необходимостью использования 3D конструкций ЯП [3, 4, 46, 52, 54–56]. Одним из вариантов может стать технология создания щелевых конденсаторов по типу DRAM: в этом случае в слое диэлектрика, расположенного над транзисторными структурами, создаются отверстия (щели), на стенках которого послойным нанесением создаётся структура конденсатора с электродами и сегнетоэлектриком между ними, как это показано на рис. 8а [52]. На рис. 8б приведено ПРЭМ изображение щелевого конденсатора диаметром 180 нм с сегнетоэлектрическим слоем PZT (60 нм) и обкладками из иридия (20 нм). При данных параметрах конденсатора размер FRAM ЯП составит $8 F_2$ и позволит использовать технологические нормы производства 90 нм, а при увеличении глубины щели можно добиться минимального значения диа-

метра конденсатора (~100 нм) и достичь размера ЯП $6 F^2$ при технологических нормах производства 65 нм [52, 55, 56].

Сложностью осаждения тонкого сегнетоэлектрического слоя является не только конформность осаждения, но и обеспечение однородной кристаллической структуры. Так MOCVD слоев PZT зачастую приводит к потере столбчатой структуры перовскитных зерен на боковых стенках и проблемам роста слоя верхнего I_r электрода на поверхности поликристаллической пленки [54]. Интересным вариантом получения высокотекстурированных пленок на 3D рельефе может стать технология гидротермального синтеза, продемонстрированная недавно для титаната бария [57].

Однако наибольшим потенциалом скейлинга могут обладать упомянутые выше бинарные сегнетоэлектрики на основе оксида гафния. Технология ALD обеспечивает рост тонких нанометровых пленок с возможностью осаждения на рельефы с высоким аспектным соотношением, при этом технологии формирования оксидов гафния и циркония уже много лет используются в FEOL процессе.

Müller и др. продемонстрировали возможность формирования 3D конденсаторных структур в 1T1C FRAM ячейках путем осаждения 10 нм пленок HfO_2 , легированных Al, в щели с аспектным соотношением 13:1 [58–60] (рис. 8в). Важным обстоятельством является также то, что в качестве материала электродов используется хорошо отработанный в массовом производстве TiN [60, 61]. Компания IMEC продемонстрировала первые результаты по созданию вертикально интегрированных структур с пленками $HfO_2:Al$ для создания энергонезависимых массивов с аналогичной NAND архитектурой [62, 63] (рис. 8г).

Совместимость ALD процесса осаждения оксида гафния с FEOL транзисторным циклом открыла возможность создания 1T ЯП. GlobalFoundries, FMC, NaMLab и Fraunhofer продемонстрировали интеграцию сегнетоэлектрического транзистора по технологии 28 нм [60, 64, 65].

Несмотря на отличный потенциал к скейлингу и 3D-интеграции, технология создания FRAM памяти на основе бинарных сегнетоэлектриков пока находится на стадии исследований и перспективы ее внедрения зависят от решения вопросов надежного долговременного хранения информации в таких ЯП. Если FRAM на PZT обеспечивает практически неограниченное число циклов переключений 10^{16} , то переключение поляризации в HfO_2 -сегнетоэлектриках ограничено $\sim 10^9$ циклами [66]. При этом процесс переключения имеет ряд особенностей, в частности он сопровождается эффектами «пробуждения» (wake-up) – увеличения переключаемой поляризации на начальных циклах переключений, усталости (fatigue) – деградации поляризации при увеличении числа циклов переключений, «запечатления» (imprint) – наличия «встроенного» поля, не переключаемого внешним полем [66–68]. В отличие от PZT, HfO_2 -сегнетоэлектрики обладают на порядок более высоким коэрцитивным полем (~ 1 МВ/см), поэтому переключение поляризации происходит при напряжениях близких к пробивному, что может приводить к его деградации и пробую [66, 69]. В работе Черниковой и др. [70] продемонстрирована возможность увеличения числа циклов до 10^{11} при легировании $HfZrO_2$ лантаном, однако проблема флуктуации переключаемого заряда остается.

Среди возможных причин нестабильности называют существование на границах раздела повышенной концентрации несегнетоэлектрической тетрагональной фазы (пассивный deadlayer, вызывающий перераспределение поля внутри конденсаторной структуры),

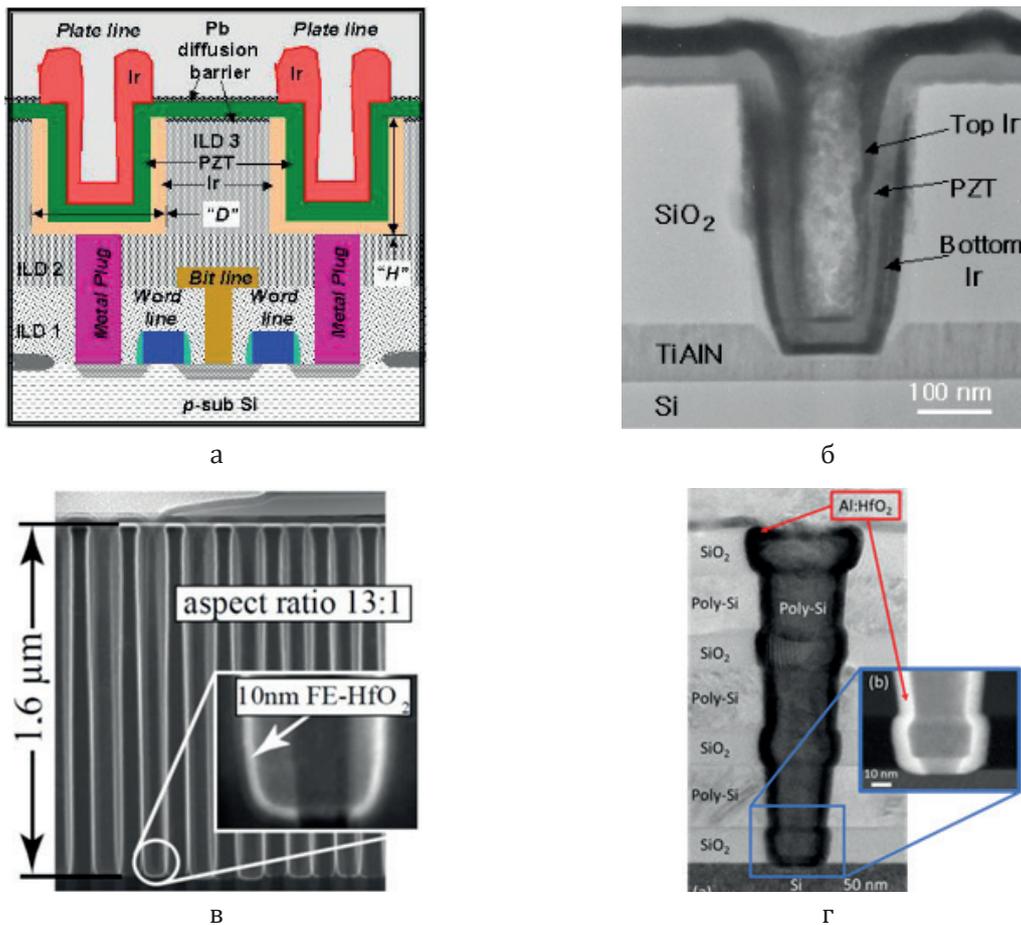


Рис. 8. 3D конструкции сегнетоэлектрического конденсатора в 1Т1С ЯП FRAM: на основе MOCVD PZT-слоя – конструкция ЯП (а) и ПРЭМ изображение щелевого конденсатора (б) [52]; щелевой конденсатор на основе ALD $\text{HfO}_2:\text{Al}$ (в) [58], вертикально интегрированная структура IMEC (г) [62].

неравномерное распределение дефектов и кислородных вакансий, проводимость по границам зерен кристаллитов и пр. (см. напр. [68]).

Вместе с этим продолжаются работы по поиску новых путей интеграции классических сегнетоэлектриков. Так, в работе [71] продемонстрирован новый способ кристаллизации PZT с использованием подслоя с дефицитом свинца, формирование перовскитных зерен с практически единственной текстурой в направлении (111), оптимальном для ЯП FRAM. Большой интерес представляют работы по созданию ячеек с 1Т архитектурой. Так, в работах [72, 73] была продемонстрирована мультибитовая ЯП на основе полевого транзистора с квазиэпитаксиальным слоем PZT в качестве подзатворного диэлектрика. Авторами был предложен метод обратной кристаллизации: на поверхности кремния формировали барьерный слой ZrTiO_4 толщиной 2 нм, на который наносили аморфный слой PZT и верхний Pt электрод, который служил затравкой в процессе кристаллизации сегнетоэлектрика. Изменения локальной поляризации обеспечивают различные пороговые напряжения, что позволяет хранить до 5 бит информации в одной ЯП. В связи с этим интерес представляют работы группы В.М. Мухортова по возможности осаждения сегнетоэлектрических пленок непосредственно на кремниевые подложки при особых режимах плазменного разряда в рабочей камере [74, 75].

Другим активно развивающимся направлением является использование пьезоэлектрических свойств сегнетоэлектрика для индуцирования изменения свойств прилегающих слоёв, например, намагниченности или проводимости (см. напр. [76, 77]). Особый интерес вызывает проект создания пьезоэлектронного транзистора PET (PiezoElectronic Transistor), продвигаемого фирмой IBM и проект создания соответствующих устройств пьезоэлектронной памяти PETMEM (Piezoelectronic Transduction Memory Device), выполняемый консорциумом европейских университетов и компаний при участии исследовательских отделов IBM в рамках европейской программы Horizon 2020 [77–82]. Принцип действия устройств основан на использовании фазового перехода диэлектрик-металл в пьезорезисторе в результате давления, создаваемого пьезоэлектриком. В качестве пьезоэлектрика используются сегнетоэлектрические материалы, обладающие наибольшим пьезокоэффициентом: PZT или релаксор PMN-PT, в качестве пьезорезистора могут быть использованы редкоземельные халькогениды типа моносulfида самария SmS [83], сплавы Гейслера типа LiMnAs [84], испытывающие фазовый переход при малых величинах внешнего давления. Расширение пьезоэлектрического слоя приводит к немедленной модуляции проводимости канала транзистора (рис. 9а). По оценкам при технологических нормах 5 нм PET обеспечит в 20 раз меньшее энергопотребление при напряжении $V_{DD} = 0.14$ В и в 50 раз меньшее – при $V_{DD} = 0.1$ В по сравнению с FinFET, работающим при напряжении 0.8 В [85]. Интеграция PET была продемонстрирована IBM с использованием PZT в качестве сегнетоэлектрика и SmSe в качестве пьезорезистора, при этом конструкция прибора подразумевает формирование воздушного зазора между ними (рис. 9б) [78]. Устройства памяти PETMEM и схемы обработки на PET являются, по мнению IBM, перспективным потенциальным решением в области создания нового поколения элементной базы с низким энергопотреблением и высоким быстродействием [82].

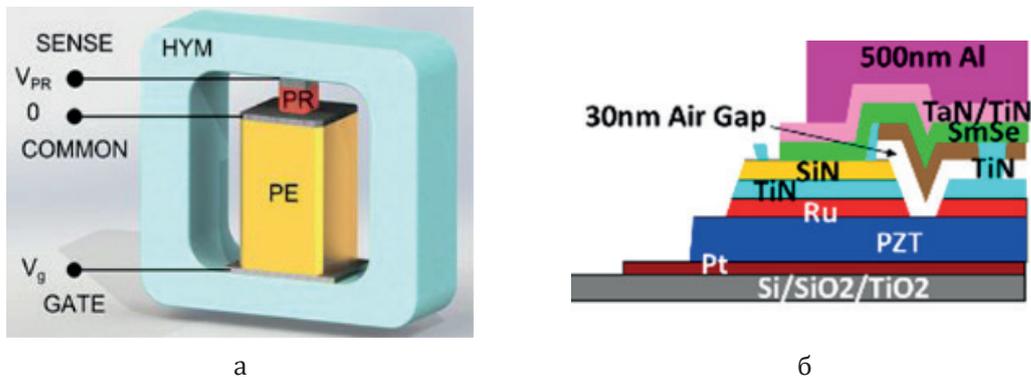


Рис. 9. Пьезоэлектронный транзистор IBM(а) [81] и пример технологической реализации (б) [78]. PE – пьезоэлектрик, PR – пьезорезистор

В последние годы получили развитие решения на основе интеграции сегнетоэлектрического слоя и двумерных полупроводников. Первые работы были выполнены с использованием органического сегнетоэлектрика и графена [86, 87]. Ясно, что использование органических сегнетоэлектриков и методов эксфолиации для осаждения 2D-полупроводника способно продемонстрировать лишь основные физические принципы работы модельного устройства и достаточно далеки от реальной интеграции. Однако впоследствии для создания гетероструктур сегнетоэлектрик/2D-полупроводник были исследованы различные комбинации неорганических сегнетоэлектриков на основе перовскитов и окси-

да гафния с использованием графена, черного фосфора (BP), дихалькогенидов металлов (см. напр. [88–91]). Примером такого решения является фотоэлектрическая память (с активацией считывания облучением), которую рассматривают в качестве элементов оптических систем, основанная на многослойной конструкции с использованием оксидного проводника LaNiO_3 , выращенного на нем слоя PZT и нескольких монослоев черного фосфора (BP, метод эксфолиации) [88]. В работе [89] при создании гетероструктуры $\text{HfZrO}_x/\text{MoS}_2$ для формирования наноразмерного слоя дихалькогенида применен CVD метод.

Интересно отметить, что подобная гетероструктура была использована для успешной демонстрации эффекта отрицательной емкости (NC-FET) [90]. Это явление активно обсуждается в последние годы в качестве возможного преодоления физических ограничений на пути скейлинга транзисторных элементов (так называемая «Больцмановская тирания» – ограничение переключения тепловым пределом) [91]. Экспериментальные работы по созданию подзатворных структур диэлектрик-сегнетоэлектрик выполнены с использованием различных материалов: титаната бария [92], PZT [93, 94], P(VDF-TrFE) [95], HfO [65, 96]. Исследование эффекта отрицательной емкости является интересной физической задачей, однако возможность приборной реализации данного явления остается предметом дискуссий [91].

Как уже отмечалось выше, важным параметром ЗУ является возможность реализации мультибитовой ячейки. Примером такой структуры может являться мультибитовая ячейка FRAM на основе PZT с использованием промежуточных слоев CoFeO_4 [97]. Отметим также совершенно неожиданную идею построения памяти на основе обратимого растрескивания в $\text{MnPt}/\text{PMN-PT}$ гетероструктурах [98]. Эффект многоуровневого энергонезависимого хранения информации позволяет рассматривать сегнетоэлектрические материалы в качестве кандидатов для создания синаптических элементов искусственных нейронных сетей [99]. Согласно известной модели переключения Ishibashi [100], приложение импульса с длительностью меньшей, чем время полного переключения домена, приводит к его частичному переключению. Основываясь на этом факте, Ishiwara исследовал процессы частичного переключения PZT в терминах адаптивного машинного обучения [101]. В настоящее время продемонстрирована реализация синаптических элементов с использованием как однобитовых элементов памяти, так и многобитовых ячеек на основе конденсаторных или транзисторных FRAM структур (см. напр. [102–104]). При этом показана возможность реализации процессов, регулирующих степень соединения, основываясь на относительной синхронизации выходных и входных потенциалов конкретного нейрона (STDP – spiketiming-dependent plasticity – биологический процесс, который регулирует силу связей между нейронами в мозге) [105]. Однако, как и в случае традиционных FRAM-применений, существующие в настоящее время ограничения связаны с проблемами трехмерной интеграции сегнетоэлектрических элементов при надежном хранении информации.

Помимо отмеченных выше потенциальных решений в области устройств памяти на сегнетоэлектриках, которые могут явиться магистральными для IT-индустрии, существует множество нишевых применений для решения определенного класса задач. В данной статье мы не рассматривали другие известные области применения интегрированных сегнетоэлектриков, такие как пьезоэлектрические МЭМС, устройства энергосбережения, пироприемники, фазовращатели, фильтры и другие устройства СВЧ диапазона, оптоэлектронные устройства, и многие другие, в основе которых лежит многообразие

нелинейных свойств этих материалов [3, 22, 23]. Так или иначе, активные диэлектрики все еще продолжают искать пути интеграции с технологиями микро- и нанoeлектроники.

Заключение

Сегнетоэлектрическая память FRAM использует зарядовый принцип записи, что обеспечивает высокую энергоэффективность, наряду с энергонезависимостью, высокими скоростями, большим числом циклов перезаписи (10^{12} – 10^{15}), длительным временем хранения (~10 лет), а также стойкостью к воздействию специальных факторов. Однако обладая высоким потенциалом, сегнетоэлектрическая память все еще не заняла значительной доли рынка энергонезависимых запоминающих устройств в связи с проблемами достижения высоких уровней интеграции.

На сегодняшний день коммерчески доступные FRAM микрочипы предлагают компании Texas Instruments, Cypress Semiconductor, Fujitsu Limited и Lapis Semiconductor. При этом компания Cypress производит свои FRAM на мощностях Texas Instruments, что подтверждается анализом литературы и конструктивно-технологического строения ИС данных производителей. ЯП FRAM всех производителей выполнены по архитектуре 1T1C, при этом Fujitsu использует конструкцию с планарным расположением сегнетоэлектрического конденсатора, а остальные производители реализуют более прогрессивную вертикальную структуру. Сам конденсатор представляет из себя многослойную структуру, в которой используется сегнетоэлектрический слой на основе PZT с толщиной около 70 нм, а электроды выполнены из IrO_x/Ir или Pt (нижний электрод у ИС Fujitsu). Передовым технологическим процессом производства FRAM устройств пока остается 130 нм КМОП процесс с пятиуровневой медной металлизацией, используемый на фабах Texas Instruments.

Для увеличения степени интеграции необходимо использование 3D-конструкций сегнетоэлектрического конденсатора. Большой потенциальный интерес представляют решения на основе бинарных сегнетоэлектриков в связи с возможностью осаждения сверхтонких слоев на рельефы с высоким аспектным соотношением методом ALD. Первые результаты по созданию вертикально интегрированных структур с пленками $\text{HfO}_2:\text{Al}$ для создания энергонезависимых NAND массивов продемонстрированы IMEC, а GlobalFoundries использовала конструкцию, в которой сегнетоэлектрик является подзатворным диэлектриком. Несмотря на хороший потенциал к скейлингу, технология создания FRAM памяти на основе оксида гафния пока не коммерциализирована в связи с нерешенными проблемами надежного хранения информации.

Среди новых направлений интеграции классических сегнетоэлектрических перовскитов необходимо отметить работы по созданию мультибитовой ЯП на основе полевого транзистора с квазиэпитаксиальным слоем PZT в качестве подзатворного диэлектрика, а также проект IBM по созданию пьезоэлектронного транзистора PET и устройств пьезоэлектронной памяти PETMEM, в которых пьезоэлектрик оказывает давление на канал транзистора, выполненного из материала, испытывающего фазовый переход диэлектрик-металл. Такое решение позволило бы повысить энергоэффективность до 50 раз по сравнению с 5 нм FinFET технологией. Реализация устройств памяти PETMEM и схем обработки на PET является потенциальным решением по созданию новой элементной базы с низким энергопотреблением и высоким быстродействием.

Среди поисковых работ, которые могли бы обеспечить прорывные FEOL-решения в эпоху пост-Мура, следует отметить работы по интеграции сегнетоэлектриков и двумерных полупроводников, а также исследование эффекта отрицательной емкости. Ячейки сегнетоэлектрических ЗУ могут быть использованы для создания синаптических элементов искусственных нейронных сетей, однако для этого предстоит преодолеть существующие ограничения их трехмерной интеграции и надежного хранения информации.

Так или иначе, прогресс в области исследований новых материалов и конструкций покажет, способна ли сегнетоэлектрическая память стать той универсальной памятью, поиск которой активно ведет IT-индустрия, стремящаяся преодолеть существующий барьер, обусловленный различиями в производительности быстрого процессора и относительно медленной памяти.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 19-29-03058 (Абдуллаев Д.А., Воротилов К.А., Сигов А.С.), а также Министерства науки и высшего образования РФ (0706-2020-0022).

Литература: / References:

1. Милованов Р.А., Келм Е.А. Структура ячеек энергонезависимой памяти типа EEPROM и Flash. *Нано- и Микросистемная техника*. 2015;4(177):45-59.
[Milovanov R.A., Kelm E.A. Structure of EEPROM and FLASH Memory Cells. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = J. NANO- and MICROSYSTEM Technique*. 2015;4(177):45-59 (in Russ.).]
2. Defaÿ E. Ferroelectric dielectrics integrated on silicon. N.Y.: John Wiley & Sons, 2013. 448 p.
3. Воротилов К.А., Мухортов В.М., Сигов А.С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства. М.: Энергоатомиздат, 2011. 175 с. ISBN 978-5-283-00872-1
[Vorotilov K.A., Mukhortov V.M., Sigov A.S. *Integrirovannye segnetoelektricheskie ustroystva* (Integrated ferroelectric devices). (Ed.) A.S. Sigov. Moscow: Energoatomizdat; 2011. 175 p. (in Russ.). ISBN 978-5-283-00872-1]
4. Воротилов К.А., Сигов А.С. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства. *Физика твердого тела*. 2012;54(5):843-848.
[Vorotilov K.A., Sigov A.S. Ferroelectric memory. *Phys. Solid State*. 2012;54(5):894-899.
<https://doi.org/10.1134/S1063783412050460>]
5. Воротилов К.А., Сигов А.С. Сегнетоэлектрические запоминающие устройства: перспективные технологии и материалы. *Нано- и Микросистемная техника*. 2008;10(99):30-42.
[Vorotilov K. A., Sigov A. S. Ferroelectric Random Access Memory: Prospect Technology and Materials. *Physics of the Solid State*. 2008;10(99):30-42 (in Russ.).]
6. Rodriguez J., Remack, K., Gertas, J., Wang L., Zhou C., Boku K., Rodriguez-Latorre J., Udayakuma, K.R., Summerfelt S., Moise T., Kim D., Groat J., Eliason J., Depner M., Chu F. Reliability of Ferroelectric Random Access memory embedded within 130nm CMOS. In: 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2010. P. 750-758.
<https://doi.org/10.1109/IRPS.2010.5488738>
7. FRAM Guide Book. 5th Edition. Fujitsu Lmted. Electronic Devices. 2005. 57 p.
8. Meena J.S., Sze S.M., Chand U.Ch., Tseng T.-Y. Overview of emerging nonvolatile memory technologies. *Nanoscale research letters*. 2014;9(526):1-33.
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-526>
9. Emerging Non-Volatile Memories. Yole Developpement SARL. 2013. 16 p.
10. Emerging Memory (STT-MRAM, PCRAM, ReRAM, 3D XPoint™) Technology/Products Roadmap. TechInsights Inc. 2017. 12 p.
11. Handbook of Nanomagnetism: Applications and Tools, R.A. Lukaszew (Ed.), New York, Taylor and Francis, 2015. 304 p.
<https://doi.org/10.1201/b18942>
12. DRAM Technology/Products Roadmap. TechInsights Inc. 2017. 15 p.
13. Non-Volatile Ferroelectric Random Access Memory (FRAM). Fujitsu Lmted. 2015. 5 p.
https://www.fujitsu.com/us/Images/SPBG_FRAM_Overview_BR.pdf (дата обращения 18.08.2020)
14. Sayyah R., Macleod T.C., Ho F.D. Radiation-hardened electronics and ferroelectric memory for space flight systems. *Ferroelectrics*. 2011;413(1):170-175.
<https://doi.org/10.1080/00150193.2011.554145>
15. Brewer S.J., Williams S.C., Griffin L.A., Cress C.D., Rivas M., Rudy R.Q., Polcawich R.G., Glaser E.R., Bassiri-Gharb N. Enhanced radiation tolerance in Mn-doped ferroelectric thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2017;111(2):022906.
<https://doi.org/10.1063/1.4992791>

16. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные материалы: пер. с англ.; под ред. В.В. Леманова и Г.А. Смоленского. М.: Мир, 1981. 736 с.
[Lains M., Glass A. *Segnetoelektriki i rodstvennyye materialy: per. s angl.; pod red. V.V. Lemanova i G.A. Smolenskogo* (Ferroelectrics and related materials: trans. from Engl.; (Eds.) V.V. Lemanov and G.A. Smolensky). Moscow: Mir; 1981. 736 p. (in Russ.).
[Lines M.E., Glass A.M. Principles and application of ferroelectrics and related materials. Oxford: Clarendon Press; 1977. 680 p.]
17. Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применения: пер. с англ.; под ред. Л.А. Шувалова. М.: Мир, 1970. 526 с.
[Burfoot J., Taylor J. *Polyarnye dielektriki i ikh primeneniya: per. s angl.; pod red. L.A. Shuvalova* (Polar dielectrics and their applications: trans. from English; (Ed.) L.A. Shuvalov. Moscow: Mir; 1981. 526 p. (in Russ.).
[Burfoot J., Taylor J. Polar dielectrics and their applications. London: Macmillan Press; 1979. 480 p.]
18. Wu S.Y. A new ferroelectric memory device, metal-ferroelectric-semiconductor transistor. *IEEE Trans. Electron Devices*. 1974;21(8):499-504.
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1974.17955>
19. Zhang K. Embedded memories for nano-scale VLSIs. N.Y.: Springer; 2009. 400 p. ISBN 978-0-387-88497-4
20. Izyumskaya N., Alivov Ya., Morkoç H. Oxides, oxides, and more oxides: high-κ oxides, ferroelectrics, ferromagnetics, and multiferroics. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2009;34(3-4):89-179.
<https://doi.org/10.1080/10408430903368401>
21. Izyumskaya N., Alivov Y-I., Cho S.-J., Morkoç H., Lee H., Kang Y.-S. Processing, Structure, Properties, and Applications of PZT Thin Films. *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* 2007;32(3):111-202.
<https://doi.org/10.1080/10408430701707347>
22. Setter N., Damjanovic D., Eng L., Fox G., Gevorgian S., Hong S., Kingon A., Kohlstedt H., Park N.Y., Stephenson G.B., Stolitchnov I., Taganstev A.K., Taylor D.V., Yamada T., Streiffer S. Ferroelectric thin films: Review of materials, properties, and applications. *J. Appl. Phys.* 2006;100(5):051606.
<https://doi.org/10.1063/1.2336999>
23. Eom C.B., Trolrier-McKinstry S. Thin-film piezoelectric MEMS. *MRS Bulletin*. 2012;37(11):1007-1021.
24. Panda P.K., Sahoo B. PZT to Lead Free Piezo Ceramics: A Review. *Ferroelectrics*. 2015;474(1):128-143.
<https://doi.org/10.1080/00150193.2015.997146>
25. Mousharraf A. Is PZT an environment friendly piezoelectric material? *Materials Today*;2012.
<https://www.materialstoday.com/characterization/comment/is-pzt-an-environment-friendly-piezoelectric-mater/>
26. Siddiqi M.A. Dynamic RAM: Technology Advancements. N.Y.: CRC Press; 2012. 382 p. ISBN 9781138077058
27. Kim S.K., Lee S.W., Han J.H., Lee B., Han S.W., Hwang C.S. Capacitors with an equivalent oxide thickness of <0.5 nm for nanoscale electronic semiconductor memory. *Adv. Funct. Mater.* 2010;20(18):2989-3003.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201000599>
28. Мироненко И.Г., Иванов А.А., Карманенко С.Ф., Семенов А.А., Назаров И.А. Сегнетоэлектрические пленки и устройства на сверх- и крайне высоких частотах. СПб.: Элмор., 2007. 162 с.
[Mironenko I.G., Ivanov A.A., Karmanenko S.F., Semenov A.A., Nazarov I.A. *Segnetoelektricheskie plenki i ustroystva na sverkh- i kraine vysokikh chastotakh* (Ferroelectric Films and Devices at Super- and Extremely High Frequencies). Sankt-Peterburg: Elmor; 2007. 162 p. (in Russ.).]
29. Мухортов В.М., Масычев С.И., Головки Ю.И., Чуб А.В., Мухортов Вл.М. Фазовращатель на щелевой линии, нагруженной варакторами на основе наноразмерных пленок титаната бария-стронция. *Радиотехника и электроника*. 2007;52(11):1402-1406.
[Mukhortov Vas.M., Masychev S.I., Golovko Yu.I., Chub A.V., Mukhortov Vl.M. A phase shifter on a slot line loaded with varactors designed on the basis on nanodimensional films of barium-strontium titanate. *J. Commun. Technol. El.* 2007;52(11):1300-1304.
<https://doi.org/10.1134/S1064226907110150>
30. Смоленский Г.А., Исупов В.А., Аграновская А.И. Новая группа сегнетоэлектриков (со слоистой структурой) I. *Физика твердого тела*. 1959;1(1):169-170.
[Smolensky G.A., Isupov V.A., Agranovskaya A.I. New group of ferroelectrics (with layered structure) Part I. *Fizika Tverdogo Tela = Solid state physics*. 1959;1(1):169-170. (in Russ.).]
31. Klee M., Mackens U., Pankert J., Brand W., Klee W. Science and technology of electroceramic thin films. O. Auciello and R. Waser (Eds.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1995. 99 p.
32. Fujii E.; Uchiyama K. First 0.18 μm SBT-based embedded FeRAM technology with hydrogen damage free stacked cell structure. *Integr. Ferroelectr.* 2003;53(1):317-323.
<https://doi.org/10.1080/10584580390258246>
33. Wouters D. J., Maes D., Goux L., Lisoni J. G., Paraschiv V., Johnson J. A., Schwitters M., Everaert J.-L., Boullart W., Schaekers M., Willekens M., Vander Meeren H., Haspelslagh L., Artoni C., Caputa C., Casella P., Corallo G., Russo G., Zambrano R., Monchoix H., Vecchio G., Van Auytrye L. Integration of SrBi₂Ta₂O₉ thin films for high density ferroelectric random access memory. *J. Appl. Phys.* 2006;100:051603.
<https://doi.org/10.1063/1.2337359>
-

34. Lee S.-S., Noh K.-H., Kang H.-B., Hong S.-K., Yeom S.-J., Park Y.-J. Characterization of Hynix 16M FERAM adopted novel sensing scheme. *Integr. Ferroelectr.* 2003;53(1):343-351.
<https://doi.org/10.1080/10584580390258264>
35. Börscke T.S., Müller J., Bräuhaus D., Schröder U., Böttger U. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2011;99:102903.
<https://doi.org/10.1063/1.3634052>
36. Polakowski P., Müller J. Ferroelectricity in undoped hafnium oxide. *Appl. Phys. Lett.* 2015;106(23):232905.
<https://doi.org/10.1063/1.4922272>
37. Mueller S., Mueller J., Singh A., Riedel S., Sundqvist J., Schroeder U., Mikolajick T. Incipient ferroelectricity in Al-doped HfO₂ thin films. *Adv. Funct. Mater.* 2012;22(11):2412-2417.
<https://doi.org/10.1002/adfm.201103119>
38. Chernikova A.G., Kuzmichev D.S., Negrov D.V., Kozodaev M.G., Polyakov S.N., Markeev A.M. Ferroelectric properties of full plasma-enhanced ALD TiN/La: HfO₂/TiN stacks. *Appl. Phys. Lett.* 2016;108(24):242905.
<https://doi.org/10.1063/1.4953787>
39. Müller J., Börscke T.S., Bräuhaus D., Schröder U., Böttger U., Sundqvist J., Kücher P., Mikolajick T., Frey L. Ferroelectric Zr_{0.5}Hf_{0.5}O₂ thin films for nonvolatile memory applications. *Appl. Phys. Lett.* 2011;99(11):112901.
<https://doi.org/10.1063/1.3636417>
40. Starschich S., Schenk T., Schroeder U., Boettger U. Ferroelectric and piezoelectric properties of Hf_{1-x}Zr_xO₂ and pure ZrO₂ films. *Appl. Phys. Lett.* 2017;110(18):182905.
<https://doi.org/10.1063/1.4983031>
41. Sang X., Grimley E.D., Schenk T., Schroeder U., LeBeau J.M. On the structural origins of ferroelectricity in HfO₂ thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2015;106(16):162905.
<https://doi.org/10.1063/1.4919135>
42. Fan Z., Chen J., Wang J. Ferroelectric HfO₂-based materials for next-generation ferroelectric memories. *J. Adv. Dielectrics.* 2016;6(2):1630003-11.
<https://doi.org/10.1142/S2010135X16300036>
43. Park M.H., Lee Y.H., Kim H.J., Kim Y.J., Moon T., Kim K.D., Müller J., Kerch A., Schroeder U., Mikolajick T., Hwang, C.S. Ferroelectricity and Antiferroelectricity of Doped Thin HfO₂-Based Films. *Adv. Mater.* 2015;27(11):1811-1831.
<https://doi.org/10.1002/adma.201404531>
44. Petrovsky V.I., Sigov A.S., Vorotilov K.A. Microelectronic applications of ferroelectric films. *Integr. Ferroelectr.* 1993;3(1):59-68.
<https://doi.org/10.1080/10584589308216700>
45. Kawashima S., Cross J.S. FeRAM. In: (Ed.) K. Zhang. *Embedded Memories for Nano-Scale VLSIs*. N.Y.: Springer; 2009. P. 279-328.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-88497-4_8
46. ITRS Reports – International Technology Roadmap for Semiconductors.
 URL: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/06/0_2015-ITRS-2.0-Executive-Report-1.pdf (date of the application 18.08.2020).
47. Arimoto Y., Ishiwara H. Current status of ferroelectric random-access memory. *MRS Bulletin.* 2004;29(11):823-828.
<https://doi.org/10.1557/mrs2004.235>
48. McAdams H.P., Acklin R., Blake T., Du X. H., Eliason J., Fong J., Kraus W.F., Liu D., Madan S., Moise T., Natarajan S., Qian N., Qiu Y., Ramack K.A., Rodriguez J., Roscher J., Seshadri A., Summerfelt S.R. A 64-Mb embedded FRAM utilizing a 130-nm 5LM Cu/FSG logic process. *IEEE J. Solid-State Circ.* 2004;39(4):667-677.
<https://doi.org/10.1109/JSSC.2004.825241>
49. Moise T.S., Summerfelt S.R., McAdams H., Aggarwal S., Udayakumar K.R., Celii F.G., Martin J.S., Xing G., Hall L., Taylor K.J., Hurd T., Rodriguez J., Remack K., Khan M.D., Boku K., Stacey G., Yao M., Albrecht M.G., Zielinski E., Thakre M., Kuchimanchi S., Thomas A., McKee B., Rickes J., Wang A., Grace J., Fong J., Lee D., Pietrzyk C., Lanham R., Gilbert S.R., Taylor D., Amano J., Bailey R., Chu F., Fox G., Sun S., Davenport T. Demonstration of a 4 Mb, high density ferroelectric memory embedded within a 130 nm, 5 LM Cu/FSG logic process. In: *International Electron Devices Meeting (IEDM'02)*. 2002. P. 535-538.
<https://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175897>
50. Müller J., Polakowski P., Mueller S., Mikolajick T. Ferroelectric hafnium oxide based materials and devices: Assessment of current status and future prospects. *J. Solid State Sci. Technol.* 2015;4(5):N30-N35.
<http://dx.doi.org/10.1149/2.0081505jss>
51. Muller J., Boscke T. S., Muller S., Yurchuk E., Polakowski P., Paul J., Martin D., Schenk T., Khullar K., Kersch A., Weinreich W., Riedel S., Seidel K., Kumar A., Arruda T. M., Kalinin S. V., Schlosser T., Boschke R., van Bentum R., Schroder U., Mikolajick T. Ferroelectric hafnium oxide: A CMOS-compatible and highly scalable approach to future ferroelectric memories. In: *Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2013 IEEE International. 2013. P. 10.8.1-10.8.4.
<https://doi.org/10.1109/IEDM.2013.6724605>

52. Koo J.M., Seo B.S., Kim S., Shin S., Lee J.H., Baik H., Lee J.H., Lee J.H., Bae B.J., Lim J.E., Yoo D. Ch., Park S.O., Kim H.S., Han H., Baik S., Choi Y.J., Park Y.J., Park Y. Fabrication of 3D trench PZT capacitors for 256Mbit FRAM device application. In: IEEE International Electron Devices Meeting-2005. IEDM Technical Digest. 4 p. <https://doi.org/10.1109/IEDM.2005.1609345>
53. Rodriguez J.A., Remack K., Boku K., Udayakumar K.R., Aggarwal S., Summerfelt S.R., Celii F.G., Martin S., Hall L., Taylor K., Moise T., McAdams H., McPherson J., Bailey R., Fox G., Depner M. Reliability properties of low-voltage ferroelectric capacitors and memory arrays. *IEEE T. Device Mat. Re.* 2004;4(3):436-449. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2004.837210>
54. Kim K., Lee S. Integration of lead zirconium titanate thin films for high density ferroelectric random access memory. *J. Appl. Phys.* 2006;100(5):051604. <https://doi.org/10.1063/1.2337361>
55. Park Y., Lee J.H., Koo J.M., Kim S.P., Shin S., Cho Ch. R., Lee J.K. Preparation of $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ films on trench structure for high-density ferroelectric random access memory. *Integr. Ferroelectr.* 2004;66(1):85-95. <https://doi.org/10.1080/10584580490894771>
56. Shin S., Han H., Park Y.J., Choi J.Y., Park Y., Baik S. Characterization of 3D Trench PZT Capacitors for High Density FRAM Devices by Synchrotron X-ray Micro-diffraction. In: AIP Conference Proceedings. 2007;879(1):1554-1556. <https://doi.org/10.1063/1.2436361>
57. Zhou Z., Bowland C.C., Patterson B.A., Malakooti M.H., Sodano H.A. Conformal BaTiO₃ films with high piezoelectric coupling through an optimized hydrothermal synthesis. *ACS Appl. Mater. Inter.* 2016;8(33):21446-21453. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b05700>
58. Polakowski P., Riedel S., Weinreich W., Rudolf M., Sundqvist J., Seidel K., Muller J. Ferroelectric deep trench capacitors based on Al:HfO₂ for 3D nonvolatile memory applications. In: 2014 IEEE 6th International Memory Workshop (IMW). 2014. 4 p. <https://doi.org/10.1109/IMW.2014.6849367>
59. Müller J., Böske T. S., Schröder U., Mueller S., Bräuhaus D., Böttger U., Frey L., Mikolajick T. Ferroelectricity in simple binary ZrO₂ and HfO₂. *Nano Lett.* 2012;12(8):4318-4323. <https://doi.org/10.1021/nl302049k>
60. Schroeder U., Yurchuk E., Müller J., Martin D., Schenk T., Polakowski P., Adelman C., Popovici M.I., Kalinin S.V., Mikolajick T. Impact of different dopants on the switching properties of ferroelectric hafniumoxide. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2014;53(8S1):08LE02. <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.08LE02>
61. Zarubin S., Suvorova E., Spiridonov M., Negrov D., Chernikova A., Markeev A., Zenkevich A. Fully ALD-grown TiN/Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂/TiN stacks: Ferroelectric and structural properties. *Appl. Phys. Lett.* 2016;109(19):192903. <https://doi.org/10.1063/1.4966219>
62. IMEC demonstrates breakthrough in CMOS-compatible Ferroelectric Memory. URL: <https://www.imec-int.com/en/articles/imec-demonstrates-breakthrough-in-cmos-compatible-ferroelectric-memory> (date of the application 03.05.2020).
63. Lapedus M. A New Memory Contender? Semiconductor Engineering. URL: <https://semiengineering.com/a-new-memory-contender/> (date of the application 16.05.2020).
64. Müller J., Yurchuk E., Schlösser T., Paul J., Hoffmann R., Müller S., Martin D., Slesazek S., Polakowski P., Sundqvist J., Czernohorsky M. Ferroelectricity in HfO₂ enables nonvolatile data storage in 28 nm HKMG. In: VLSI Technology (VLSIT) Symposium on IEEE. 2012. P. 25-26. <https://doi.org/10.1109/VLSIT.2012.6242443>
65. Yurchuk E., Müller J., Paul J., Schlösser T., Martin D., Hoffmann R., Müller S., Slesazek S., Schröder U., Boschke R., van Bentum R. Impact of scaling on the performance of HfO₂-based ferroelectric field effect transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices.* 2014;61(11):3699-3706. <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2354833>
66. Pešić M., Schroeder U., Mikolajick T. Ferroelectric One Transistor/One Capacitor Memory Cell. In book: (Eds.). Schroeder U., Hwang C., Funakubo H. Ferroelectricity in Doped Hafnium Oxide: Materials, Properties and Devices. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2019. P. 413-424. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102430-0.00019-X>
67. Zhou D., Xu J., Li Q., Guan Y., Cao F., Dong X., Müller J., Schenk T., Schröder U. Wake-up effects in Si-doped hafnium oxide ferroelectric thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2013;103(19):192904. <https://doi.org/10.1063/1.4829064>
68. Park M., Lee Y., Mikolajick T., Schroeder U., Hwang C. Review and perspective on ferroelectric HfO₂-based thin films for memory applications. *MRS Communications.* 2018;8(3):795-808. <https://doi.org/10.1557/mrc.2018.175>
69. Pešić M., Fengler F.P., Slesazek S., Schroeder U., Mikolajick T., Larcher L., Padovani A. Root cause of degradation in novel HfO₂-based ferroelectric memories. In: IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). 2016. P. MY-3-1-MY-3-5. <https://doi.org/10.1109/IRPS.2016.7574619>

70. Chernikova A.G., Kozodaev M.G., Negrov D.V., Korostylev E.V., Park M.H., Schroeder U., Hwang Ch.S., Markeev A.M. Improved ferroelectric switching endurance of La-doped Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ thin films. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2018;10(3):2701-2708.
<https://doi.org/10.1021/acsami.7b15110>
71. Delimova L., Guschina E., Zaitseva N., Pavlov S., Seregin D., Vorotilov K., Sigov A. Effect of seed layer with low lead content on electrical properties of PZT thin films. *J. Mater. Res.* 2017;32(9):1618-1627.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2017.156>
72. Park J.H., Kim H.Y., Seok K.H., Kiaee Z., Lee S.K., Joo S.K. Multibit ferroelectric field-effect transistor with epitaxial-like Pb(Zr, Ti)O₃. *J. Appl. Phys.* 2016;119(12):124108.
<https://doi.org/10.1063/1.4945002>
73. Park J.H., Joo S.K. A Novel Metal-Ferroelectric-Insulator-Silicon FET With Selectively Nucleated Lateral Crystallized Pb (Zr,Ti)O₃ and ZrTiO₄ Buffer for Long Retention and Good Fatigue. *IEEE Electron Device Letters*. 2015;36(10):1033-1036.
<https://doi.org/10.1109/LED.2015.2472987>
74. Pavlenko A.V., Stryukov D.V., Mukhortov V.M., Biryukov S.V. Structure and Polarization Relaxation of Ba_{0.5}Sr_{0.5}Nb₂O₆/(001)Si Films. *Tech. Phys. = Russ. J. Appl. Phys.* 2018;63(3):407-410.
<https://doi.org/10.1134/S1063784218030179>
75. Стрюков Д.В., Мухортов В.М., Бирюков С.В., Головки Ю.И. Эффект поля в структуре металл – сегнетоэлектрик – полупроводник с использованием многослойного сегнетоэлектрика. *Наука Юга России*. 2017;13(1):18-24.
<https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-13-1-18-24>
[Stryukov D.V., Mukhortov V.M., Biryukov S.V., Golovko Yu. I. Field effect in metal-ferroelectric-semiconductor structure with multilayer ferroelectric. *Nauka Yuga Rossii = Science in the South of Russia*. 2017;13(1):18-24 (in Russ.).
<https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-13-1-18-24>]
76. Hu J. M., Chen L. Q., Nan C.W. Multiferroic heterostructures integrating ferroelectric and magnetic materials. *Adv. Mater.* 2016;28(1):15-39.
<https://doi.org/10.1002/adma.201502824>
77. Magdău I.B., Liu X.-H., Kuroda M.A., Shaw T.M., Crain J., Solomon P.M., Newns D.M., Martyna G.J. The piezoelectronic stress transduction switch for very large-scale integration, low voltage sensor computation, and radio frequency applications. *Appl. Phys. Lett.* 2015;107(7):073505.
<https://doi.org/10.1063/1.4928681>
78. Chang J.B., Miyazoe H., Copel M., Solomon P.M., Liu X.-H., Shaw T.M., Schrott A.G., Gignac L.M., Martyna G.J., Newns D.M. First realization of the piezoelectronic stress-based transduction device. *Nanotechnology*. 2015;26(37):375201.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/37/375201>
79. Newns D., Elmegeen B., Liu X.H., Martyna G. A low-voltage high-speed electronic switch based on piezoelectric transduction. *J. Appl. Phys.* 2012;111(8):084509.
<https://doi.org/10.1063/1.4704391>
80. Newns D.M., Elmegeen B.G., Liu X.H., Martyna G.J. High response piezoelectric and piezoresistive materials for fast, low voltage switching: simulation and theory of transduction physics at the nanometer-scale. *Adv. Mater.* 2012;24(27):3672-3677.
<https://doi.org/10.1002/adma.201104617>
81. Newns D.M., Elmegeen B.G., Liu X.H., Martyna G.J. The piezoelectronic transistor: a nanoactuator-based post-CMOS digital switch with high speed and low power. *MRS Bull.* 2012;37(11):1071-1076.
<https://doi.org/10.1557/mrs.2012.267>
82. Demonstrating a new low-voltage memory element.
URL: <https://www.petmem.eu/the-technology> (date of the application 17.05.2020).
83. Sousanis A., Smet P.F., Poelman D. Samarium Monosulfide (SmS): Reviewing Properties and Applications. *Materials*. 2017;10(8):953.
<https://doi.org/10.3390/ma10080953>
84. Beleanu A., Kiss J., Kreiner G., Köhler C., Mühler L., Schnelle W., Burkhardt U., Chadov S., Medvediev S., Ebke D., Felser C., Cordier G., Albert B., Hoser A., Bernardi F., Larkin T.I., Pröpper D., Boris A.V., Keimer B. Large resistivity change and phase transition in the antiferromagnetic semiconductors LiMnAs and LaOMnAs. *Phys. Rev. B*. 2013;88(18):184429.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.184429>
85. Solomon P.M., Bryce B., Keech R., Shaw T.M., Copel M., Hung L. W., Schrott A., Theis T.N., Haensch W., Rossangel S.M., Miyazone H., Shetty S. The PiezoElectronic switch: A path to low energy electronics. In: 2013 Third Berkeley Symposium on Energy Efficient Electronic Systems (E3S). *IEEE*. 2013. P. 1-2.
<https://doi.org/10.1109/E3S.2013.6705880>
86. Zheng Y., Ni G.X., Toh C.T., Zeng M.G., Chen S.T., Yao, K., Özyilmaz B. Gate-controlled nonvolatile graphene-ferroelectric memory. *Appl. Phys. Lett.* 2009;94(16):163505.
<https://doi.org/10.1063/1.3119215>

87. Doh Y.J., Yi G.C. Nonvolatile memory devices based on few-layer graphene films. *Nanotechnology*. 2010;21(10):105204.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/10/105204>
88. Xie L., Chen X., Dong Z., Yu Q., Zhao X., Yuan G., Zeng Zh., Wang Y., Zhang, K. Nonvolatile Photoelectric Memory Induced by Interfacial Charge at a Ferroelectric PZT-Gated Black Phosphorus Transistor. *Adv. Electron. Mater.* 2019;5(8):1900458.
<https://doi.org/10.1002/aelm.201900458>
89. Shen P.C., Lin C., Wang H., Teo K.H., Kong J. Ferroelectric memory field-effect transistors using CVD monolayer MoS₂ as resistive switching channel. *Appl. Phys. Lett.* 2020;116(3):033501.
<https://doi.org/10.1063/1.5129963>
90. McGuire F.A., Lin Y.C., Price K., Rayner G.B., Khandelwal S., Salahuddin S., Franklin A.D. Sustained sub-60 mV/decade switching via the negative capacitance effect in MoS₂ transistors. *Nano Lett.* 2017;17(8):4801-4806.
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b01584>
91. Alam M.A., Si M., Ye P.D. A critical review of recent progress on negative capacitance field-effect transistors. *Appl. Phys. Lett.* 2019;114(9):090401.
<https://doi.org/10.1063/1.5092684>
92. Stadler H.L. Ferroelectric switching time of BaTiO₃ crystals at high voltages. *J. App. Phys.* 1958;29(10):1485-1487.
<https://doi.org/10.1063/1.1722973>
93. Scott J.F., McMillan L.D., Araujo C.A. Switching kinetics of lead zirconate titanate sub-micron thin-film memories. *Ferroelectrics*. 1989;93(1):31-36.
<https://doi.org/10.1080/00150198908017317>
94. Li J., Nagaraj B., Liang H., Cao W., Lee C.H., Ramesh R. Ultrafast polarization switching in thin-film ferroelectrics. *Appl. Phys. Lett.* 2004;84(7):1174-1176.
<https://doi.org/10.1063/1.1644917>
95. Ishii H., Nakajima T., Takahashi Y., Furukawa T. Ultrafast polarization switching in ferroelectric polymer thin films at extremely high electric fields. *Appl. Phys. Express*. 2011;4(3):031501.
<https://doi.org/10.1143/APEX.4.031501>
96. Mulaosmanovic H., Ocker J., Müller S., Schroeder U., Müller J., Polakowski P., Slesazeck S. Switching kinetics in nanoscale hafnium oxide based ferroelectric field-effect transistors. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017;9(4):3792-3798.
<https://doi.org/10.1021/acsami.6b13866>
97. Boni A.G., Chirila C., Pasuk I., Negrea R., Pintilie I., Pintilie L. Steplike Switching in Symmetric PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O₃/CoFeO₄/PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O₃ Heterostructures for Multistate Ferroelectric Memory. *Phys. Rev. Applied*. 2017;8(3):034035.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.034035>
98. Liu Z.Q., Liu J.H., Biegalski M.D., Hu J. M., Shang S.L., Ji Y., Wang J.M., Hsu S.L., Wong A.T., Cordill M.J., Gludovatz B. Electrically reversible cracks in an intermetallic film controlled by an electric field. *Nat. Commun*. 2018;9(1):41.
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02454-8>
99. Oh S., Hwang H., Yoo I. K. Ferroelectric materials for neuromorphic computing. *APL Materials*. 2019;7(9):091109-091109-14.
<https://doi.org/10.1063/1.5108562>
100. Ishibashi Y., Takagi Y. Note on ferroelectric domain switching. *J. Phys. Soc. JPN*. 1971;31(2):506-510.
<https://doi.org/10.1143/JPSJ.31.506>
101. Ishiwara H. Proposal of adaptive-learning neuron circuits with ferroelectric analog-memory weights. *JPN. J. Appl. Phys.* 1993;32(1S):442-446.
<https://doi.org/10.1143/JJAP.32.442>
102. Jerry M., Dutta S., Kazemi A., Ni K., Zhang J., Chen, P. Y., Datta, S. A ferroelectric field effect transistor based synaptic weight cell. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018;51(43):434001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad6f8>
103. Seo M., Kang M.H., Jeon S.B., Bae H., Hur J., Jang B.C., Hwang K.M. First demonstration of a logic-process compatible junctionless ferroelectric FinFET synapse for neuromorphic applications. *IEEE Electr. Device Letters*. 2018;39(9):1445-1448.
<https://doi.org/10.1109/LED.2018.2852698>
104. Kim M.K., Lee J.S. Ferroelectric analog synaptic transistors. *Nano Lett.* 2019;19(3):2044-2050.
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b00180>
105. Boyn S., Grollier J., Lecerf G., Xu B., Locatelli N., Fusil S., Girod S., Carretero C., Garcia K., Xavier S., Tomas J., Bellaiche L., Bibes M., Barthelemy A., Saïghi S., Garcia V. Learning through ferroelectric domain dynamics in solid-state synapses. *Nat. Commun*. 2017;8(1):1-7.
<https://doi.org/10.1038/ncomms14736>

Об авторах:

Абдуллаев Даниил Анатольевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 32А); стажер-исследователь НОЦ «Технологический центр» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: ААО-5932-2020; Scopus Author ID: 56741027200

Милованов Роман Александрович, кандидат технических наук, заместитель начальника физико-технологического отдела Института нанотехнологий микроэлектроники РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 32А); старший научный сотрудник УНО «Электроника» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 55794840600

Волков Роман Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии, старший преподаватель кафедры общей физики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Россия, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1). ResearcherID: С-8431-2017; Scopus Author ID: 52564796300

Боргардт Николай Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, начальник научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии, руководитель Центра коллективного пользования «Диагностика и модификация микроструктур и нанобъектов», заведующий кафедрой общей физики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (124498, Россия, Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1). ResearcherID: I-7869-2014; Scopus Author ID: 6603557021

Ланцев Андрей Николаевич, генеральный директор ЗАО «Скан» (119330, Россия, Москва, ул. Дружбы, д. 10Б).

Воротилов Константин Анатольевич, доктор технических наук, профессор, директор НОЦ «Технологический центр» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID А-3331-2011; Scopus Author ID: 7004711340; orcid.org/0000-0003-4675-2067. https://www.researchgate.net/profile/Konstantin_Vorotilov.

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID L-4103-2017; Scopus Author ID: 35557510600. https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

About the authors:

Daniil A. Abdullaev, Cand. Sci. (Engineering), Researcher of the Institute of Nanotechnology of Microelectronics RAS (32A, Leninsky pr., Moscow 119991, Russia), Researcher of REC “Technological Center”, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID: ААО-5932-2020; Scopus Author ID: 56741027200

Roman A. Milovanov, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of Physics and Technology Department Institute of Nanotechnology of Microelectronics RAS (32A, Leninsky pr., Moscow 119991, Russia), Senior Researcher ESU "Electronics", MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 55794840600

Roman L. Volkov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of Electron Microscopy Laboratory, Senior Lecturer of General Physics Chair of National Research University of Electronic Technology – MIET (1, Shokin pl., Zelenograd, Moscow 124498, Russia). ResearcherID: С-8431-2017; Scopus Author ID: 52564796300

Nikolay I. Borgardt, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Electron Microscopy Laboratory, Head of the Center for Collective Use "Diagnostics and Modification of Microstructures and Nano-Objects", Head of General Physics Chair of National Research University of Electronic Technology – MIET (1, Shokin pl., Zelenograd, Moscow 124498, Russia). ResearcherID: I-7869-2014; Scopus Author ID: 6603557021

Andrey N. Lantsev, General Director of CJSC «Scan» (10B, Druzhby ul., Moscow 119330, Russia).

Konstantin A. Vorotilov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director of REC “Technological Center”, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID А-3331-2011; Scopus Author ID: 7004711340; orcid.org/0000-0003-4675-2067. https://www.researchgate.net/profile/Konstantin_Vorotilov.

Alexander S. Sigov, Academician of RAS, President, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID L-4103-2017; Scopus Author ID: 35557510600. https://www.researchgate.net/profile/A_Sigov

Поступила: 22.06.2020; получена после доработки: 02.07.2020; принята к опубликованию: 31.07.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-68-77>



УДК 537.632.5

Методы эффективной среды как оптимальные методы моделирования физических свойств наноструктур

А.Н. Юрасов^{1,®},
М.М. Яшин^{1,2}

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

®Автор для переписки, e-mail: alexey_yurasov@mail.ru

В работе рассматриваются различные методы эффективной среды в качестве инструмента для исследования как оптических, так и магнитооптических свойств разных наноструктур, в первую очередь магнитных. В явном виде были получены формулы для нахождения диагональных и недиагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости для всех основных приближений эффективной среды. Данные формулы справедливы как для нанокompозитов, так и для гранулированных сплавов. Обсуждается возможность прогнозирования различных оптических и магнитооптических свойств подобных структур на примере экваториального эффекта Керра, как перспективного бесконтактного метода исследования наноструктур для ферромагнитного нанокompозита $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. Обсуждается возможное применение полученных формул. Различные методы эффективной среды открывают перспективы изучать наноструктуры в широкой области значений концентрации металлической (магнитной) компоненты X . В работе отмечается и обсуждается вклад различных механизмов, влияющих на физические свойства подобных структур, особенно в ИК области спектра, где наиболее ярко проявляется квазиклассический размерный эффект. Одним из таких вкладов может служить учёт форм-фактора частиц нанокompозита и средний размер частиц. В рамках модели Друде-Лоренца анализируется вклад квазиклассического размер-

ного эффекта в диагональные и недиагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости структуры. Решаемая в этой работе задача актуальна, так как в магнитных наноструктурах наблюдаются интересные и важные эффекты, такие как: эффект Керра, аномальное поглощение, гигантское магнетосопротивление, туннельное магнетосопротивление и многие другие. Эти эффекты играют важную роль в устройствах современной электроники, что делает данную работу особенно актуальной.

Ключевые слова: нанокompозиты, гранулированные сплавы, методы эффективной среды, квазиклассическое приближение, экваториальный эффект Керра, тензор диэлектрической проницаемости.

Для цитирования: Юрасов А.Н., Яшин М.М. Методы эффективной среды как оптимальные методы моделирования физических свойств наноструктур. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):68-77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-68-77>

Methods of effective media as optimal methods for modeling the physical properties of nanostructures

Alexey N. Yurasov^{1,@},
Maxim M. Yashin^{1,2}

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia

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

This paper considers various methods of effective media as a tool for studying both optical and magneto-optical properties of various nanostructures, primarily magnetic nanostructures. Formulas for finding diagonal and non-diagonal components of the permittivity tensor for all basic approximations of the effective medium were obtained explicitly. These formulas are valid for both nanocomposites and granular alloys. The possibility of predicting various optical and magneto-optical properties of such structures is discussed using the example of the transverse Kerr effect as a promising non-contact method for studying nanostructures for a ferromagnetic nanocomposite $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. A possible application of the obtained formulas is discussed. Various methods of effective media make it possible to study nanostructures in a wide range of values of the concentration of the metal (magnetic) component X . The paper notes and discusses the contribution of various mechanisms that affect the physical properties of such structures, especially in the IR region of the spectrum, where the quasi-classical dimensional effect is most pronounced. The form factor of nanocomposite particles and the average particle size are such contributions that can be taken into account. The contribution of the quasi-classical dimensional effect to the diagonal and non-diagonal components of the structure's permittivity tensor is analyzed within the framework of the Drude-Lorentz model. The problem being solved in this work is relevant, since interesting and important effects are observed in magnetic nanostructures, such as the Kerr effect, anomalous absorption, giant magnetoresistance, tunnel magnetoresistance, and many others. These effects play an important role in modern electronic devices, which makes this work particularly relevant.

Keywords: nanocomposites, granular alloys, methods of efficient processing, quasi-classical approximation, transverse Kerr effect, tensor of dielectric permittivity.

For citation: Yurasov A.N., Yashin M.M. Methods of effective media as optimal methods for modeling the physical properties of nanostructures. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):68-77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-68-77>

Введение

В настоящее время в электронике и наноэлектронике актуальными являются исследования в области наноразмерных структур [1–3]. Двумя важными примерами таких перспективных структур являются гранулированные сплавы (металлические гранулы помещены в металлическую матрицу) и наноккомпозиты (металлическая компонента помещена в полупроводниковую или диэлектрическую матрицу). Наибольший интерес представляют структуры со слабо магнитной матрицей (диамагнетики или парамагнетики), в которую помещены магнитные (ферромагнетики) гранулы с заданной концентрацией X , так как они могут иметь интересные и важные приложения [4]. Необходимо отметить, что рассматриваемые в этой работе подходы являются общими для любых подобных структур. В наноструктурах наблюдаются различные оптические и магнитооптические эффекты, например, такие как эффект Керра, аномальное поглощение, гигантское магнетосопротивление, туннельное магнетосопротивление и др. Эти эффекты играют важную роль в устройствах современной электроники, что делает данную работу особенно актуальной [5, 6].

Расчётная часть

Для описания оптических, электронных и магнитных свойств наноструктур удобно использовать теорию эффективной среды. Данная теория сводится к тому, что среда с диэлектрической проницаемостью заменяется эффективной средой с диэлектрической проницаемостью ϵ_{eff} , которая характеризует эту среду в целом. Исходя из этого, для получения уравнений эффективной среды воспользуемся уравнением непрерывности из теории электромагнетизма [7, 8]:

$$I = jS = \sigma_i E_{in} S \Rightarrow j = \sigma_i E_{in}. \quad (1)$$

Тогда для сферических частиц справедливо выражение:

$$\begin{aligned} \sigma_i \vec{E}_{in} = \sigma_{eff} \vec{E}_{out} = \sigma_i \left[\vec{E} - \frac{4}{3} \pi \vec{p} \right] &= \sigma_{eff} \left[\vec{E} + \frac{4}{3} \pi (3 [\vec{p}\vec{r}] \vec{r} - \vec{p}) \right], \\ \vec{E} (\sigma_i - \sigma_{eff}) = \sigma_{eff} 4\pi \vec{p} - \sigma_{eff} \frac{4}{3} \pi \vec{p} + \sigma_i \frac{4}{3} \pi \vec{p} &= \frac{4}{3} \pi \vec{p} (\sigma_i + 2\sigma_{eff}), \\ \frac{4}{3} \pi \vec{p} &= \frac{(\sigma_i - \sigma_{eff}) \vec{E}}{\sigma_i + 2\sigma_{eff}}, \end{aligned}$$

где I – сила электрического тока; j – плотность тока, S – площадь поверхности сферы; E_{in} и E_{out} – напряженность электрического поля внутри и вне сферы соответственно; \vec{p} – вектор поляризации; σ_i – удельная проводимость i -ой компоненты и σ_{eff} – эффективная проводимость.

При этом важно отметить, что в приближении среднего поля (эффективной среды) средняя поляризация равна нулю $\langle \vec{p} \rangle = 0$.

Таким образом,

$$\left\langle \frac{\sigma_i - \sigma_{eff}}{\sigma_i + 2\sigma_{eff}} \right\rangle = 0,$$

где $\sigma_{eff} = X\sigma_1 + (1-X)\sigma_0$.

Следовательно,

$$X \frac{\sigma_1 - \sigma_{eff}}{\sigma_1 + 2\sigma_{eff}} + (1-X) \frac{\sigma_0 - \sigma_{eff}}{\sigma_0 + 2\sigma_{eff}} = 0.$$

Отметим, что для диэлектрической проницаемости можно написать аналогичное соотношение:

$$X \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{eff}} + (1-X) \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{eff}} = 0, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{eff} = \varepsilon_\infty - \frac{4\pi i\sigma}{\omega}$.

Полученное выражение справедливо при средних значениях концентраций ($0.3 \leq X \leq 0.7$), данное приближение было названо приближением Бруггемана (ЕМА), при этом $\varepsilon_{eff} \equiv \varepsilon^{EMA}$. Таким образом, данное уравнение можно привести к квадратному:

$$-2(\varepsilon^{EMA})^2 + \varepsilon^{EMA}(\varepsilon_1(3X-1) + \varepsilon_0(2-3X)) - \varepsilon_1\varepsilon_0 = 0,$$

решая которое, получаем:

$$\varepsilon^{EMA} = \frac{-\varepsilon_1(3X-1) + \varepsilon_0(2-3X) \pm \sqrt{(\varepsilon_1(3X-1) + \varepsilon_0(2-3X))^2 - 8\varepsilon_0\varepsilon_1}}{-4}. \quad (3)$$

Рассматривая диэлектрическую проницаемость в виде $\varepsilon = \varepsilon_1' - i\varepsilon_0'$, получаем однозначный выбор корня уравнения (3), с учётом того, что $\varepsilon_2 > 0$ ($\varepsilon_2 = 2nk$), где n – индекс рефракции, k – индекс экстинкции.

Всё вышеизложенное решение справедливо для сферических частиц. Аналогично можно рассмотреть эллипсоидальные частицы. В этом случае формула для эффективной диэлектрической проницаемости в приближении Бруггемана имеет вид:

$$X \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^{EMA}}{\varepsilon^{EMA} + L_j(\varepsilon_1 - \varepsilon^{EMA})} + (1-X) \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon^{EMA}}{\varepsilon^{EMA} + L_j(\varepsilon_0 - \varepsilon^{EMA})} = 0, \quad (4)$$

где L_j – форм-фактор (мера эллиптичности частиц). По аналогии с предыдущими вычислениями (2)–(3), получаем новое квадратное уравнение:

$$(\varepsilon^{EMA})^2 (L_j - 1) + \varepsilon^{EMA} (X(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) - L_j(\varepsilon_1 + \varepsilon_0) + \varepsilon_0) + \varepsilon_1\varepsilon_0 L_j = 0,$$

решением которого является:

$$\varepsilon^{EMA} = \frac{-X(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) - L_j(\varepsilon_1 + \varepsilon_0) + \varepsilon_0 \pm \sqrt{(X(\varepsilon_1 - \varepsilon_0) - L_j(\varepsilon_1 + \varepsilon_0) + \varepsilon_0)^2 - 4(L_j - 1)\varepsilon_1\varepsilon_0L_j}}{2(L_j - 1)}. \quad (5)$$

Далее рассмотрим случай, когда $X \rightarrow 0$ (т.е. концентрация мала). При этом выражение (2) будет иметь вид:

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_0}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_0} - X \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} = 0. \quad (6)$$

Полученное выражение названо приближением Максвелла-Гарнетта (МГ), которое справедливо для относительно низкой концентрации металлических частиц в объеме нанокompозита, при этом $\varepsilon_{eff} = \varepsilon^{MG}$. В явном виде:

$$\varepsilon^{MG} = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0 + 2X(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0 - X(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}. \quad (7)$$

Тогда для эллипсоидальных частиц (6) принимает вид [24]:

$$\frac{\varepsilon^{MG} - \varepsilon_0}{\varepsilon_0 + (\varepsilon^{MG} - \varepsilon_0)L_j^0} - X \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)L_j^1} = 0, \quad (8)$$

в явном виде ε^{MG} выражается следующим образом:

$$\varepsilon^{MG} = \varepsilon_0 - X \frac{\varepsilon_0}{X \cdot L_j^0 - L_j^1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}}. \quad (9)$$

Формулы (2) и (8) способны описывать различные свойства наноструктур лишь в определенном диапазоне значений X : (2) – в диапазоне $0.3 < X < 0.7$, а (8) – при $X \leq 0.2$. Важной задачей в исследовании нанокompозитов является изучение перколяционного перехода [9, 10], который наблюдается при такой концентрации X , при которой в нанокompозите происходит переход: «диэлектрик (полупроводник) \rightarrow металл». Для описания оптических и электрических свойств в широком диапазоне концентраций магнитной компоненты используют симметризованное приближение Максвелла-Гарнетта (СМГ), опирающееся на вероятностную модель. При этом в данном приближении возможны два типа эллипсоидальных частиц (рис. 1).

Тогда, полагая вместо объемной концентрации вероятностные характеристики $\varepsilon_{eff} \equiv \varepsilon^{PS}$, получаем:

$$p_1 S_1(0) + p_2 S_2(0) = 0,$$

и для диэлектрической проницаемости:

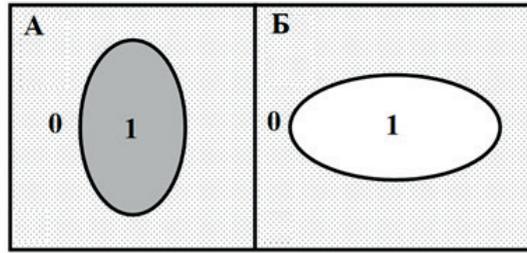


Рис. 1. Виды (А и Б) эллипсоидальных металлических (1) частиц и неметаллических частиц (0) при описании нанокомпозитов в рамках теории эффективной среды.

$$\begin{aligned}
 & p_A \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon^{PS})(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0) + X(2\varepsilon_0 + \varepsilon^{PS})(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)}{(\varepsilon_0 + 2\varepsilon^{PS})(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0) + 2X(\varepsilon_0 - \varepsilon^{PS})(\varepsilon_1 - \varepsilon_0)} + \\
 & + p_B \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon^{PS})(\varepsilon_0 + 2\varepsilon_1) + (1-X)(2\varepsilon_1 + \varepsilon^{PS})(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{(\varepsilon_1 + 2\varepsilon^{PS})(\varepsilon_0 + 2\varepsilon_1) + 2(1-X)(\varepsilon_1 - \varepsilon^{PS})(\varepsilon_0 - \varepsilon_1)} = 0,
 \end{aligned} \tag{10}$$

где p_A и p_B – вероятности присутствия частиц типа (А) и типа (Б) [11]:

$$p_A = \frac{u_1}{u_1 + u_2}; \quad p_B = \frac{u_2}{u_1 + u_2}; \quad u_1 = (1 - X^{\frac{1}{3}})^3; \quad u_2 = 1 - (1 - X^{\frac{1}{3}})^3.$$

Аналогично с учётом форм-фактора частиц L_j для двух типов частиц имеем:

$$p_A \frac{\varepsilon_A^{MG} - \varepsilon^{PS}}{\varepsilon^{PS} + \frac{1}{2}(1 - L_A)(\varepsilon_A^{MG} - \varepsilon^{PS})} + p_B \frac{\varepsilon_B^{MG} - \varepsilon^{PS}}{\varepsilon^{EMA} + \frac{1}{2}(1 - L_B)(\varepsilon_B^{MG} - \varepsilon^{PS})} = 0, \tag{11}$$

и полученное уравнение преобразуется в квадратное:

$$\varepsilon^{PS} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\theta}}{2\theta}. \tag{12}$$

При этом

$$\begin{aligned}
 \alpha &= -\frac{1}{2}(p_B(1 + L_A) + p_A(1 + L_B)), \\
 \beta &= \frac{1}{2}p_A(\varepsilon_A^{MG}(L_B + 1) + \varepsilon_B^{MG}(L_B - 1)) + \frac{1}{2}p_B(\varepsilon_A^{MG}(L_A + 1) + \varepsilon_B^{MG}(L_A - 1)), \\
 \theta &= \frac{1}{2}\varepsilon_A^{MG}\varepsilon_B^{MG}(p_A(1 - L_B) + p_B(1 - L_A)).
 \end{aligned}$$

В общем случае с учётом анизотропии диэлектрическая проницаемость является тензорной величиной. Тензор диэлектрической проницаемости (ТДП) эффективной среды представляется в виде:

$$\varepsilon_{eff} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^{eff} & i\gamma_{eff} & 0 \\ -i\gamma_{eff} & \varepsilon_{xx}^{eff} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{xx}^{eff} \end{pmatrix}.$$

Выше мы определили диагональные компоненты ТДП, которые отвечают за оптические и электрические свойства среды. Аналогично предыдущим вычислениям, недиагональные компоненты γ ТДП, которые отвечают за магнитооптические свойства, определяются как:

$$\gamma^{EMA} = \gamma \cdot X \frac{[\varepsilon^{EMA} + L_j(\varepsilon_0 - \varepsilon^{EMA})]^2}{X([\varepsilon^{EMA} + L_j(\varepsilon_0 - \varepsilon^{EMA})]^2 - [\varepsilon^{EMA} + L_j(\varepsilon_1 - \varepsilon^{EMA})]^2) + [\varepsilon^{EMA} + L_j(\varepsilon_1 - \varepsilon^{EMA})]^2}, \quad (13)$$

$$\gamma^{MG} = \frac{\gamma X}{[\varepsilon_0 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_0)(L^1 - XL^0)]^2}, \quad (14)$$

$$\gamma^{PS} = \frac{\gamma_A^{MG} P_A \cdot \left[\varepsilon^{PS} + \frac{1}{2}(1 - L_B)(\varepsilon_B^{MG} - \varepsilon^{PS}) \right]^2 - \gamma_B^{MG} P_B \cdot \left[\varepsilon^{PS} + \frac{1}{2}(1 - L_A)(\varepsilon_A^{MG} - \varepsilon^{PS}) \right]^2}{P_A \cdot \left[\varepsilon^{PS} + \frac{1}{2}(1 - L_B)(\varepsilon_B^{MG} - \varepsilon^{PS}) \right]^2 - P_B \cdot \left[\varepsilon^{PS} + \frac{1}{2}(1 - L_A)(\varepsilon_A^{MG} - \varepsilon^{PS}) \right]^2}. \quad (15)$$

Таким образом, в рамках различных методов эффективной среды были рассмотрены и получены в явном виде выражения для компонент тензора диэлектрической проницаемости, отвечающие за оптические и магнитооптические свойства наноструктур в приближениях МГ, Бруггемана и СМГ. Стоит отметить, что все вышеперечисленные методы эффективной среды хорошо работают для широкого класса наноструктур – это и нанокомпозиты, и гранулированные сплавы. Часто важно учитывать размеры частиц. Это удобно сделать в рамках модели Друде-Лоренца. Тогда вклад квазиклассического размерного эффекта в диагональные и недиагональные компоненты ТДП определяется как [12, 13]:

$$\varepsilon_{\text{mod}} = \varepsilon_{\text{eff}} + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})}, \quad (16)$$

$$\gamma_{\text{mod}} = \gamma_{\text{eff}} + \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{bulk}} / \tau_{\text{bulk}}^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{bulk}})^2} - \frac{4\pi\sigma_{xy}^{\text{gr}} / \tau_{\text{part}}^2}{\omega(\omega + i/\tau_{\text{part}})^2}. \quad (17)$$

Таким образом, с использованием полученных формул (5)–(17) возможно описывать различные свойства нанокомпозитных структур в широкой области значений концентрации металлической компоненты X с учётом размера частиц.

Проиллюстрируем результат для экваториального эффекта Керра (ЭЭК). В качестве исследуемого нанокомпозита был выбран $(\text{CoFeZr})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$. Для различных методов эффективной среды с использованием полученных ранее выражений для данного нанокомпозита были построены модельные спектральные зависимости ЭЭК (рис. 2) по следующим формулам:

$$\rho(\omega) = (C\gamma_1 + D\gamma_2) \frac{2 \sin 2\varphi}{C^2 + D^2}, \quad (18)$$

где $C = \varepsilon_2(2\varepsilon_1 \cos^2 \varphi - 1)$, $D = \cos^2 \varphi(\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2 + 1) + \varepsilon_1 - 1$; φ – угол падения света, $\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2$, $\gamma = \gamma_1 - i\gamma_2$ – диагональные и недиагональные компоненты тензора диэлектрической проницаемости, соответственно.

Расчёты проводились с учётом размерного эффекта по формулам (5)–(18). Величина объёмной концентрации была взята выше ($X = 0.47$) и ниже ($X = 0.2$) порога перколяции, который составляет $X = 0.4$. Были получены спектральные зависимости ЭЭК с использованием всех рассмотренных нами приближений (рис. 2). При этом полагалось $L_i = 0.33$, а средний размер частиц в каждом случае составлял 2 нм, что соответствует литературным данным [10]. Стоит отметить, что лучшее согласие достигается с [10] с помощью приближения СМГ, как при $X = 0.47$, так и при $X = 0.2$. Данное наблюдение и качественное сравнение модельных кривых с экспериментальными данными планируется обсудить в наших следующих работах. Полученные результаты открывают возможность прогнозировать различные оптические и магнитооптические свойства в разных наноструктурах.

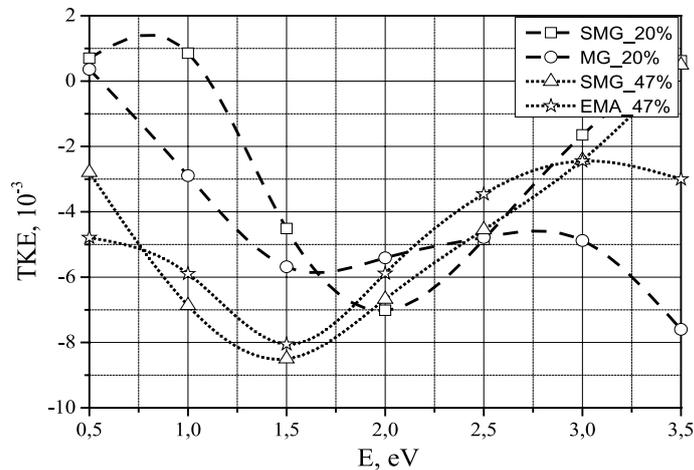


Рис. 2. Модельные спектральные зависимости экваториального эффекта Керра для наноконкомпозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ при различной концентрации X : выше (пунктирные линии – точки) и ниже (штриховые линии) порога перколяции (при $X = 0.47$ – звездочки (приближение ЕМА), треугольники (приближение СМГ); при $X = 0.2$ – кружки (приближение МГ) и квадратики (приближение СМГ).

Заключение

В данной работе в явном виде были получены формулы для нахождения диагональных и недиагональных компонент тензора диэлектрической проницаемости в рамках различных приближений эффективной среды. Данные формулы справедливы как для наноконкомпозитных структур, так и для гранулированных сплавов. При этом открывается возможность прогнозирования различных оптических и магнитооптических свойств подобных структур в зависимости от концентрации компонент и размеров частиц наноконкомпозита. Полученные формулы могут применяться в широкой области значений концентрации магнитной компоненты X , что важно для поиска перспективных материалов в современной электронике. Планируется сравнить экспериментальные данные с полученными модельными расчётами экваториального эффекта Керра, представленными на рис. 2, что является, несомненно, важным для изучения материалов с заданными свойствами. Таким

образом, полученные в работе результаты представляют как фундаментальный, так и практический интерес в широкой области применения [14, 15].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта «Университетский» по теме «Гетероструктура».

Литература: / References:

1. Yashin M.M., Yurasov A.N., Ganshina E.A., Garshin V. V. Simulation of the spectra of the transverse Kerr effect of magnetic nanocomposites $\text{CoFeZr-Al}_2\text{O}_3$. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. *Series Natural Sciences*. 2019;(5):63-72. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2019-5-63-72>
2. Hrabovský D., Caicedo J.M., Herranz G., Infante I.C., Sánchez F., Fontcuberta J. Jahn-Teller contribution to the magneto-optical effect in thin-film ferromagnetic manganites. *Phys. Rev. B*. 2009;79(5):052401-1–052401-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.052401>
3. Vyzulin S.A., Gorobinskii A.V., Kalinin Y.E., Sitnikov A.V., Lebedeva E.V., Syr'ev N.E., Tro-fimenko I.T., Chekrygina Y.I., Shipkova I.G. Ferromagnetic resonance, magnetic properties, and resistivity of $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$ multilayer nanostructures. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics*. 2010;74(10):1380-1382. <https://doi.org/10.3103/S1062873810100151>
4. Yurasov A. N., Yashin M. M. The effective medium as a tool for analyzing the optical properties of nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018; 6(2):56-66 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>
[Юрасов А.Н., Яшин М.М. Теория эффективной среды как инструмент анализа оптических свойств нанокмпозитов. *Российский технологический журнал*. 2018;6(2):56-66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>]
5. Gan'shina E., Garshin V., Perova N., Zykov G., Aleshnikov A., Kalinin Yu., Sitnikov A. Magneto-optical properties of nanocomposites ferromagnetic-carbon. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2019;(470):135-138. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.038>
6. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* (Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies). Moscow: Fizmatlit; 2009. 416 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-0582-8
[Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. 416 с. ISBN 978-5-9221-0582-8]
7. Sushko M.Y., Kriskiv S.K. Compact group method in the theory of permittivity of heterogeneous systems. Technical Physics. *The Russian Journal of Applied Physics*. 2009;54(3): 423-427. <https://doi.org/10.1134/S1063784209030165>
8. Landau L., Lifshits E. *Kurs teoreticheskoi fiziki*. (Course of theoretical physics). V. 8. Elektrodinamika sploshnykh sred (Electrodynamics of continuous media). Moscow: Phymathlit; 2016. 661 p. (in Russ.)
[Ландау Л., Лифшиц Е. Курс теоретической физики. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2016. Т. 8. 656 с.]
9. Khanikaev A., Granovsky A., Clerk J. P. Influence of the size distribution of granules and of their attractive interaction on the percolation threshold in granular alloys. *Physics of the Solid State*. 2002; 44(9): 1611-16123. <https://doi.org/10.1134/1.1507232>
10. Fadeev E., Blinov M., Garshin V., Tarasov, O., Ganshina E., Prudnikova M., Prudnikov V., Lahderanta E., Rylko, V., Granovsky A. Magnetic Properties of $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ nanocomposites near the percolation threshold. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys*. 2019; (83)7: 835-837. <https://doi.org/10.3103/S1062873819070153>
11. Yashin M.M., H.B. Mirzokulov Symmetrized Maxwell–Garnett approximation as an effective method for studying nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;(7)4:92-100 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>
[Яшин М.М., Мирзокулов Х.Б. Симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта как эффективный метод исследования нанокмпозитов. *Российский технологический журнал*. 2019;7(4):92-100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>]
12. Aleshnikov A. A., Kalinin Yu. E., Sitnikov A.V., Fedosov A. G. Magnetic properties of multi-layer structures based on nanocomposites $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$. *Perspektivnye Materialy*. 2012;(5):68-75 (in Russ.)
[Алешников А.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Федосов А.Г. Магнитные свойства многослойных структур на основе нанокмпозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$. *Перспективные материалы*. 2012;5:68-75.]

13. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites-semiconductor multilayers. *Solid State Phenomena*. 2011;168-169:533–536.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.168-169.533>

14. Hosseinifar A., Shariaty-Niassar M., Ebrahimi S., Moshref-Javadi M. Synthesis, characterization, and application of partially blocked amine-functionalized magnetic nanoparticles. *Langmuir*. 2017;33(51):14728-14737.
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b02093>

15. Domashevskaya E. P., Ivkov S. A., Sitnikov A.V., Stognei O. V., Kozakov A. T., Nikol'skii A.V. Influence of the relative content of a metal component in a dielectric matrix on the formation and dimensions of cobalt nanocrystals in $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ film composites. *Phys. Solid State*. 2019;61(2):71-29.
<https://doi.org/10.1134/S1063783419020112>

Об авторах:

Юрасов Алексей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор, заместитель заведующего кафедрой нанoeлектроники, заместитель директора Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 6602974416

Яшин Максим Михайлович, старший преподаватель кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78), ассистент кафедры «Физика» МГТУ им Н.Э. Баумана (105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5). Scopus Author ID: 57191628251.

About the authors:

Alexey N. Yurasov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Deputy Head of the Department of Nanoelectronics, Deputy Director of the Physico-Technological Institute, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 6602974416

Maxim M. Yashin, Senior teacher Department of Nanoelectronics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia); Assistant Lecturer, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (5, str. 1, 2-ya Baumanskaya ul., Moscow 105005, Russia). Scopus Author ID: 57191628251.

Поступила: 02.02.2020; получена после доработки: 26.05.2020; принята к опубликованию: 25.06.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-78-90>



УДК: 62-762.4; 303.094.7; 620.179.112

Герметизация неподвижных соединений

А.П. Кушнир[@],
Ю.С. Асадова

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

Статья посвящена исследованию работы уплотнений неподвижных соединений. Рассмотрены механизмы возникновения утечки при разных значениях шероховатости и давления на поверхностях стыка с учетом реальной площади контакта. Проведена оценка деформаций и усилий в зоне контакта с учетом профиля поверхностей, предельных отклонений формы и расположения поверхностей, а также физико-механических свойств материалов герметизируемого стыка. Получены теоретические зависимости, позволяющие оценить герметичность неподвижного соединения в зависимости от основных параметров уплотнения – шероховатости и погрешностей изготовления, а также расположения поверхностей стыка, их физико-механических свойств, характеристик герметизируемой жидкости, в том числе, внешнего перепада давления, и номинального давления в стыке. Применен новый закон распределения плотности вероятности для более адекватного описания рассматриваемых граничных условий. Проведена вероятностная оценка площади контакта и величины сближения поверхностей уплотнения с учетом физико-механических свойств материала. Для оценки фактической площади контакта и величины относительного смещения поверхностей получены инженерные зависимости. Проведено моделирование процесса возникновения утечки в зависимости от указанных условий. Показано, что полная герметичность жестких стыков недостаточна даже при низкой шероховатости, обеспечиваемой финишными способами обработки, и отсутствии отклонений формы поверхностей стыка. Проведенное сравнение экспериментальных данных с полученными теоретическими результатами показало, что предложенные инженерные зависимости обеспечивают хорошее совпадение с опытными данными.

Ключевые слова: моделирование, герметичность, неподвижное соединение, утечка, шероховатость, давление.

Для цитирования: Кушнир А.П., Асадова Ю.С. Герметизация неподвижных соединений. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):78-90. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-78-90>

The sealing of fixed joints

Alexander P. Kushnir[@],
Yulia S. Asadova

MIREA - Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

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

The article is devoted to the study of the seals of fixed joints. The mechanisms of leakage occurrence at different values of roughness and pressure on the joint surfaces are considered taking into account the real contact area. The estimation of deformations and forces in the contact zone was carried out taking into account the profile of surfaces, limit deviations of shape and location of surfaces, as well as physical and mechanical properties of materials of the sealed joint. The obtained theoretical dependence allows to evaluate the tightness of the fixed connection depending on the main parameters of the seal roughness, manufacturing errors and the location of the interfaces, their physical and mechanical properties and characteristics of sealed liquid, including differential pressure and the nominal pressure in the joint. A new law of probability density distribution is proposed, which more adequately describes the considered boundary conditions of the experiment. Relations for the probabilistic evaluation of the contact area and surface deformations taking into account the characteristics of the material are obtained. Simple engineering relations for the estimation of probability of contact of the projections and offset surfaces for the two profiles are obtained. The simulation of the process of leakage depending on these conditions is carried out. It is shown that the complete tightness of rigid joints is insufficient even with low roughness provided by the finishing methods of processing and in the absence of deviations in the shape of the joint surfaces. The comparison of experimental data with the obtained theoretical results showed that the proposed engineering dependences provide a good match with the experimental data.

Keywords: modeling, tightness, fixed connection, leakage, roughness, pressure.

For citation: Kushnir A.P., Asadova Yu.S. The sealing of fixed joints. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):78-90 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-78-90>

Проблема герметизации подвижных и неподвижных соединений деталей машин является крайне актуальной для всех отраслей техники, в которых присутствуют жидкие или газообразные фракции. Это и гидравлические машины, и подводные и надводные корабли, и химические и космические аппараты. Несмотря на общие задачи, только в недавнее время начала формироваться наука, изучающая механизмы возникновения и предотвращения утечек – герметология. Например, почти до конца XX века ученые и практики не могли объяснить механизм попадания загрязнений внутрь шпиндельного узла станка при отсутствии перепада давления на уплотнении, как в статике, так и в динамике [1, 2].

Исследованию процессов герметизации посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ, однако большинство из них связано с уплотнениями вращательного или поступательного движения [3–5]. При этом вопросы герметизации неподвижных соединений изучены недостаточно.

В качестве теоретической базы для описания рабочего процесса обычно принимают работы Дарси, Жуковского и других исследователей. Однако, в большей степени рассматриваемые проблемы относятся к теории фильтрации грунтовых вод, движению газа и нефти в пористой среде и т.п. [6].

Существенную роль в процессах герметизации уплотнений неподвижных соединений играет фактическая площадь контакта, которая существенно отличается от номинальной (до нескольких порядков) [7]. Трудности решения данной задачи определяются также наличием упругих и пластических деформаций, неравномерным распределением материала по высоте шероховатого слоя, температурой в зоне контакта и другими случайными факторами [8]. Этим объясняется тот факт, что наиболее часто в большинстве работ учитывают только наиболее высокие выступы, а не весь спектр профиля поверхности, что существенно снижает достоверность полученных результатов.

Для оценки степени герметичности применяют разные методики, например, метод электрогидравлической аналогии (ЭГДА) [9]. Однако данный метод не дает точной картины течения вследствие того, что в сечениях рассматриваются, как правило, осредненные скорости. В отличие от течения жидкости или газа в трубопроводе, ток принимают постоянным по всему сечению проводника, что может внести существенную погрешность вычислений. Метод ЭГДА не учитывает также местные потери, например, при переходе от меньшего сечения к большему, повороты трубопровода и т.п.

Для описания течения жидкой среды в неподвижном стыке воспользуемся теорией Козени-Кармана (*J. Kozeny, P.C. Carman*), согласно которой рассматриваемая среда имеет пористую структуру и представляет собой набор капиллярных трубок равной длины и произвольного сечения [10]. Такой метод позволяет провести аналитические исследования герметичности реальной герметичности устройства путем использования апробированных соотношений из механики жидкости. Так как скорости течения жидкости при фильтрации обычно невелики, следует предположить, что режим течения в стыке будет ламинарным. В этом случае для получения модели можно воспользоваться системой уравнений Навье – Стокса для вязких сред, зависимостями Бернулли или Дарси. Нетрудно показать, что для принятого набора капиллярных трубок и условий работы (пьезометрические высоты пренебрежимо малы по сравнению с пьезометрическим напором на уплотнении, местные потери на несколько порядков меньше потерь по длине) полученное решение не будет зависеть от первоначального выбора системы уравнений. Для принятых условий выражение для утечки (в системе СИ) можно представить (без учета эффектов облитерации, поверхностного натяжения и упругопластических свойств жидкости) в следующем виде:

$$Q = \sum \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \rho \nu l} = \frac{\pi \Delta p}{128 \rho \nu l} \sum d^4, \quad (1)$$

где Q – величина утечки через уплотнение; Δp – перепад давления на уплотнении; ρ – плотность жидкости; ν – кинематический коэффициент вязкости; l – длина капиллярных трубок; $d = 4F_K \cdot P_s^{-1}$ – гидравлический диаметр щелевого зазора; F_K – площадь капиллярной трубки; P_s – смоченный периметр.

Уравнение 1 может быть использовано для сечений произвольной формы (круглой, прямоугольной, овальной, треугольной и т.д.).

В рассматриваемом случае сечения стыкуемых поверхностей образуются как совокупность микронеровностей, которые могут быть описаны эквивалентным параметром шероховатости, называемым высотой неровностей профиля по десяти точкам R_z . В предположении, что микронеровности имеют треугольную форму, из уравнения (1), с учетом дополнительных отклонений зазора вследствие технологических погрешностей изготовления и расположения (монтажа) поверхностей, получаем выражение для оценки герметичности стыка:

$$Q = \frac{\pi \Delta p}{648 \rho \nu k L} \sum (R_z + h_r + h_s - \delta)^4, \quad (2)$$

где k – коэффициент извилистости; L – длина щели уплотнения; R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам; h_r – технологическая погрешность изготовления поверхностей стыка; h_s – погрешность расположения поверхностей стыка; δ – относительное смещение поверхностей под действием усилия сжатия.

Полученное уравнение показывает, что величина утечки пропорциональна приложенному к уплотнению перепаду давления, обратно пропорциональна вязкости жидкости, а также длине и извилистости щели уплотнения. При этом герметичность уплотнения существенно зависит от шероховатости и погрешности поверхностей, а также от их смещения под действием силы сжатия, приложенной к контактирующей паре.

Так как в общем виде задача не имеет решения, для оценки величины смещения поверхностей контакта необходимо сделать ряд дополнительных допущений. Примем, что отклонения сопрягаемых профилей относительно базовой линии BL как в направлении выступов y_b , так и в направлении впадин y_n близко к нормальному закону распределения (рис. 1).

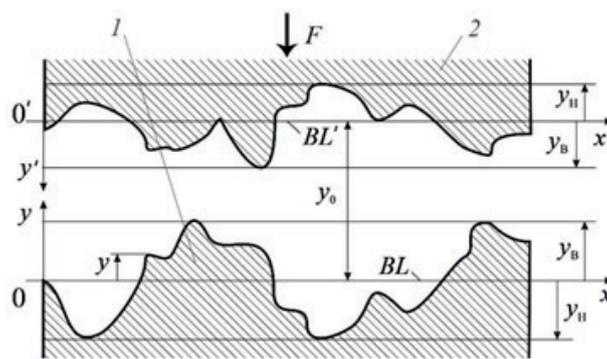


Рис. 1. Профили поверхностей уплотнения.

Применительно к поверхностям 1, 2 для нормального закона распределения будут справедливы следующие выражения, описывающие распределение плотностей вероятности:

$$f_1(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/(2\sigma^2)}; \quad f_2(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(z-z_0)^2/(2\sigma^2)}, \quad (3)$$

где $f_1(z), f_2(z)$ – плотности распределения вероятности для первой и второй поверхностей, соответственно; σ – средняя квадратическая ошибка; $z = y/y_{\max}$ – относительное отклонение профиля; y – текущее отклонение профиля относительно базовой линии; y_{\max} – максимальные значения отклонения профиля относительно базовой линии; $z_0 = y_0/y_{\max}$ – относительное расстояние между базовыми линиями двух поверхностей; y_0 – расстояние между базовыми линиями двух поверхностей.

Для оценки деформаций и усилий в зоне контакта воспользуемся соотношениями [11]. В качестве допущения примем, что контакт осуществляется по полусферическим поверхностям радиуса R

$$p_{\text{cp}} = \frac{2}{3} p_0 = \frac{2}{3} \left(\frac{6FE^2}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}}; \delta = y_{\max} \cdot (2 - z_0) = \left(\frac{9F^2}{16RE^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

где p_{cp} – среднее давление на площадке контакта; p_0 – давление в центре площадки контакта; F – сила сжатия, приложенная к контактирующей паре; E – приведенный модуль упругости материала уплотнения; R – приведенный радиус, δ – суммарное сближение поверхностей.

Так как деформации и усилия в зоне контакта могут быть весьма велики, необходимо оценить условия прочности. Опасные напряжения возникают как на поверхности, так и внутри материала. Расчетные напряжения для этих случаев [11]

$$\sigma_{p1} = 0.2p_0; \sigma_{p2} = 0.6p_0, \quad (5)$$

где σ_{p1} – расчетные напряжения в опасной точке на поверхности контактирующих материалов; σ_{p2} – расчетные напряжения в опасной точке внутри материала.

Из выражений (5) следует, что более опасными являются напряжения не на поверхности, а внутри материала. Очевидно, что средние (p_{cp}) и максимальные давления (давления в центре площадки p_0) на разных площадках контакта будут неодинаковыми. При этом по мере сближения полусфер контактные давления (средние и максимальные) будут возрастать. Предельным случаем будет максимальное давление, соответствующее пределу текучести материала. С учетом связи опасных напряжений в материале контактирующих полусфер с величиной максимального давления на площадке контакта $\sigma_p = 0.6p_0$, получаем выражение для предельного случая $\sigma_T = 0.6p_{0\max}$ откуда следует

$$p_{0\max} = \sigma_T / 0.6. \quad (6)$$

Таким образом, область изменения давлений в центре площадки контакта ограничена нижним и верхним пределами. Нижний предел – нулевое давление (так как отрицательные давления при сжатии материала отсутствуют). Верхний предел, как следует из выражения (6), обусловлен пределом текучести материала и также является конечной величиной.

В отличие от распределения величины зазора в уплотнении, давления на площадках контакта имеют, таким образом, четкие границы (нижний и верхний пределы), что обуславливает применение закона равномерного, а не нормального распределения. Плот-

ность распределения вероятности давлений в центре площадки (с учетом нормирования) в этом случае описывается, как

$$\begin{cases} \varphi(p_0) = 0, \text{ при } p_0 < 0; \\ \varphi(p_0) = 1/p_{0\max}, \text{ при } 0 < p_0 < p_{0\max}; \\ \varphi(p_0) = 0, \text{ при } p_0 > p_{0\max}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\varphi(p_0)$ – плотность распределения вероятностей изменения давления в центре площадок контакта.

Совместное решение уравнений (4), и (7) позволяет получить зависимость давления в центре площадки контакта от величины сближения поверхностей

$$p_0 = \frac{2E}{\pi} \sqrt{\frac{\delta}{R}} \text{ при } p_0 < \sigma_T/0.6; \quad (8)$$

$$p_0 = \sigma_T/0.6 \text{ при } \frac{2E}{\pi} \sqrt{\frac{\delta}{R}} > p_{0\max}.$$

Математическое ожидание давления в центре по всем площадкам контакта с учетом (8):

$$\langle p_0 \rangle = \int_0^{p_{0\max}} p_0 \varphi(p_0) dp_0 = \int_0^{p_{0\max}} \frac{p_0}{p_{0\max}} dp_0 = \frac{p_0^2}{2p_{0\max}} \Big|_0^{p_{0\max}} = \frac{p_{0\max}}{2},$$

откуда получаем приближенное соотношение

$$\langle p_0 \rangle = \frac{\sigma_T}{0.6 \cdot 2} \approx 0.8\sigma_T, \quad (9)$$

где $\langle p_0 \rangle$ – математическое ожидание давления в центре по всем площадкам контакта.

Приближенное выражение для ожидаемого среднего давления на всех площадках контакта следует из (4) и (9)

$$\langle p_{cp} \rangle = \frac{2}{3} \langle p_0 \rangle = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_T}{0.6 \cdot 0.2} \approx 0.5\sigma_T. \quad (10)$$

Зная среднее значение давления на площадках контакта, можно найти выражение для суммарной силы, приложенной ко всем поверхностям

$$F = p_n S_n = \langle p_{cp} \rangle S_k = 0.5\sigma_T P_k S_n, \quad (11)$$

где p_n – номинальное давление; S_n – номинальная площадь поверхности; S_k – проекция суммарной площади контакта; P_k – вероятность контакта поверхностей рассматриваемых профилей.

Вероятность контакта поверхностей рассматриваемых профилей определим на основе вероятностей выхода профилей за общую границу по теореме о независимых событиях:

$$P_K = P_1 P_2,$$

где P_1, P_2 – вероятность выхода выступов профиля за установленную границу для первой и второй поверхностей, соответственно.

Пусть поверхности прижимаются друг к другу под действием приложенной к образцам силы, действующей на номинальную площадь. В этом случае из выражения (11) следует

$$p_H = 0.5\sigma_T P_K. \quad (12)$$

Полученное выражение (12) позволяет рассчитать связь силовых факторов и деформаций контактирующих поверхностей.

Найдем площадь соприкосновения поверхностей для случая первоначального контакта, когда поверхности соприкасаются по верхним границам выступов, то есть при условии

$$y_0 = 2y_{\max} \quad \text{или} \quad z_0 = y_0 / y_{\max} = 2.$$

Вероятность выхода выступов профиля за установленную границу $z_0/2$ (то есть выполнение условия для обеих поверхностей одинаково и может быть рассчитана путем интегрирования выражений (3) в пределах от верхней границы до бесконечности, либо по табличным значениям интеграла вероятности

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\tau^2/2} d\tau = 0.5P(|z| < t\sigma), \quad (13)$$

где $P(z)$ – вероятность выхода выступов профиля за установленную границу; $t = z/\sigma$.

Заданной границе с 98%-ой доверительной вероятностью соответствует табличное значение аргумента интеграла вероятности $t = 2.327$. Для границы участка $z = 1$ значение средней квадратической ошибки будет составлять $\sigma = 1/t = 1/2.327 = 0.4297$.

Таким образом, получаем:

$$P_1 = P_2 = \Phi(t \rightarrow \infty) = \Phi(t = 2.327) = 0.5 - 0.49 = 0.01.$$

Данное выражение показывает, что при нормальном законе распределения погрешности 1.0% выступов профиля поверхности могут иметь высоту, превышающую максимальное значение y_{\max}

Вероятность контакта поверхностей рассматриваемых профилей определим на основе вероятностей выхода профилей за общую границу по теореме о независимых событиях:

$$P_K = P_1 P_2 = 0.01 \cdot 0.01 = 10^{-4}.$$

Таким образом, площадь первоначального контакта двух поверхностей, расположенных друг относительно друга на расстоянии максимальных выступов, ожидается на уровне 10⁻²⁰% от полной проекции площади поверхности. Это приводит к тому, что рас-

четная величина давления на поверхностях, выполненных, например, из Стали 50С2 (для которой предел текучести $\sigma_T = 1200$ МПа), должна равняться

$$p_H = 0.5\sigma_T P_K = 0.5 \cdot 1200 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4} = 6 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Для этих начальных условий силы, приложенные к герметизируемым поверхностям (имеющим номинальную площадь поверхности контакта $S_H = 0.1$ м²) теоретически могут быть весьма существенными

$$F = p_H S_H = 6 \cdot 10^4 \cdot 0.1 = 6000 \text{ Н.}$$

Здесь наблюдается явное противоречие, так как при первоначальном соприкосновении поверхностей (при отсутствии сжимающих напряжений) сила в уплотнении должна быть равна нулю.

Это противоречие можно объяснить следующим образом.

Дело в том, что при нормальном законе распределения профиль всегда может иметь отклонение, большее чем y_{\max} . Это приводит к тому, что величина давления при начальных условиях контакта ($z = 1$) теоретически больше нуля. Однако, при начальных условиях точка первоначального контакта всегда соответствует условию $z = 1$, при котором сила равна нулю, что также следует из выражений (4) и (7).

Для того чтобы устранить это противоречие, найдем новый закон распределения вероятности, лишенный этого недостатка. В качестве граничных условий рассмотрим следующие соотношения:

$$\psi(y = 0) = \psi_{\max}; \psi(|y| > y_{\max}) = 0.$$

Условие нормирования вероятности

$$P(|z| \leq 1) = 2\Phi(z) = 1.$$

Данным условиям соответствуют:

– плотность распределения

$$\psi(y) = \frac{15}{16y_{\max}^5} (y^2 - y_{\max}^2)^2; \quad (14)$$

– интеграл вероятности

$$\Phi(z) = \frac{15}{16} \left(\frac{1}{5} z^5 - \frac{2}{3} z^3 + z \right). \quad (15)$$

При относительном смещении поверхностей на величину δ вероятность контакта участков поверхности рассчитывается как

$$P_K = P(z > z_0) = \int_{z_0}^1 \psi(z) dz = 0.5 - \Phi(z_0), \quad (16)$$

где $z_0 = y_0 / y_{\max} = 1 - \delta / y_{\max}$, $z = y / y_{\max}$.

Таким образом, решая систему уравнений (12), (15) и (16), можно получить искомые величины площади контакта S_K и смещения поверхностей δ . Для удобства вычислений в системе Matlab-Simulink разработана программа, позволяющая провести расчет при различных законах распределения плотности вероятностей.

Для расчета в качестве исходных данных возьмем данные из работы [7] (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Наименование	Обозначение	Величина
Номинальное давление, МПа	P_n	1
Номинальная площадь поверхностей, мм ²	S_n	100
Высота выступов, мкм	y_{max}	0.5
Материал образцов	марка стали	сталь

Так как марка стали в примере не указана, то рассмотрим два граничных варианта: Сталь 5 и Сталь 60. Для этих марок сталей при отсутствии дополнительной термообработки (закалки) пределы текучести материалов составляют $\sigma_T = 270 \dots 350$ МПа [11].

Расчеты относительного сближения поверхностей для принятых марок стали применительно к нормальному закону распределения плотности вероятности показывают ошибку – расчетная величина начального сближения получается меньше нуля, что не соответствует условиям эксперимента, так как отрицательные значения сближения соответствуют гарантированному зазору между поверхностями. В рассматриваемых же условиях при отсутствии нагрузки имеет место первоначальный контакт поверхностей, то есть величина первоначального сближения всегда равна нулю.

В предлагаемой методике данное противоречие отсутствует.

Расчет с использованием распределения (14, 15), близкого к нормальному, дает для Сталей 5 ... 60 следующие значения (табл. 2).

Таблица 2. Результаты сравнительного расчета

Наименование	Обозначение	Расчет по методике [7]	Расчет по предлагаемой методике	
			Сталь 5	Сталь 60
Величина сближения поверхностей, мкм	δ	0.177	0.190	0.170
Вероятность контакта	P_K	–	0.0074	0.0054
Площадь контакта, мм ²	S_K	0.079	0.740	0.540

Из табл. 2 следует, что расчеты величин сближения поверхностей по обеим методикам дают близкие результаты. Однако площадь фактического контакта, рассчитанная по методике, описанной в работе [7], оказывается меньше в 7–9 раз.

Оценим достоверность полученных расчетных данных. По величине номинального давления в уплотнении рассчитаем среднее давление на площадках контакта. Применительно к расчетным данным, полученным по методике Н.Б. Демкина [7], имеем:

$$P_K = P_n S_n / S_K = 1 \cdot 100 / 0.079 = 1266 \text{ МПа.}$$

Как показывает анализ, данное расчетное значение выше предела прочности марок сталей Сталь 5 ... 60, что физически невозможно.

Расчетные значения, определенные по предлагаемой методике, составляют

$$p_K = p_H S_H / S_K = 1 \cdot 100 / 0.740 \dots 1 \cdot 100 / 0.540 = 135.1 \dots 185.2 \text{ МПа},$$

что вполне возможно, так как давление находится в допустимых пределах и не превышает предела прочности рассматриваемых материалов.

Для упрощенных расчетов можно принять гипотезу о равномерном распределении плотности вероятности. В этом случае, с учетом условия нормирования вероятности, следует

$$\psi(y) = \frac{1}{2y_{\max}} \quad \text{при } |y| < y_{\max}, \quad (17)$$

$$\psi(y) = 0 \quad \text{при } |y| > y_{\max}.$$

Примем в качестве параметра стандартное выражение для высоты неровностей профиля по десяти точкам

$$R_z = \left(\sum y_v + \sum y_n \right) / 5 = 2y_{\max}. \quad (18)$$

С учетом уравнений (15), (17), (18) получаем простое инженерное выражение для оценки величины относительного сближения поверхностей уплотнения

$$\delta = R_z \sqrt{\frac{8p_H}{\sigma_T}}, \quad (19)$$

где $p_H = F/S_H$ – величина номинального давления, Па.

Сопоставим полученный результат с известными данными. Теоретическая зависимость (19) хорошо соотносится с опытными данными [12], согласно которым смещение поверхностей контакта рассчитывается по формуле

$$\delta = c \sqrt{p_H}, \quad (20)$$

где δ – величина относительного сближения поверхностей, мкм, c – поправочный коэффициент, зависящий от единиц измерения и способа обработки.

Так, для шлифованных поверхностей

$$c = 0.15-0.2 \text{ – при } [p_H] = \text{кгс/см}^2; c = (0.47-0.63) \cdot 10^{-3} \text{ – при } [p_H] = \text{Па}.$$

Рассчитаем величины относительного сближения поверхностей уплотнения по двум зависимостям (19), и (20) для шлифованных поверхностей (параметр шероховатости $R_z = 6.3$ мкм) стальных (Сталь 40ХНВ, $\sigma_T = 1720$ МПа) закаленных деталей (табл. 3).

Результаты расчета, как следует из табл. 3, показали хорошую сходимость опытных данных и предложенной зависимости инженерных характеристик.

Таблица 3. Относительное смещение поверхностей в зависимости от номинальных давлений в зоне контакта

p_k , даН/см ²	0.1	0.5	1	5	10
δ , мкм, (опытные данные)	0.05–0.06	0.11–0.14	0.15–0.2	0.34–0.45	0.47–0.63
δ , мкм, (расчетные данные)	0.055	0.124	0.175	0.391	0.553

Проведение расчетов осложняется случайным характером изменения величины зазора в уплотнении (шероховатости поверхностей), поэтому для получения частных решений в системе Matlab-Simulink была разработана имитационная модель уплотнения (рис. 2).

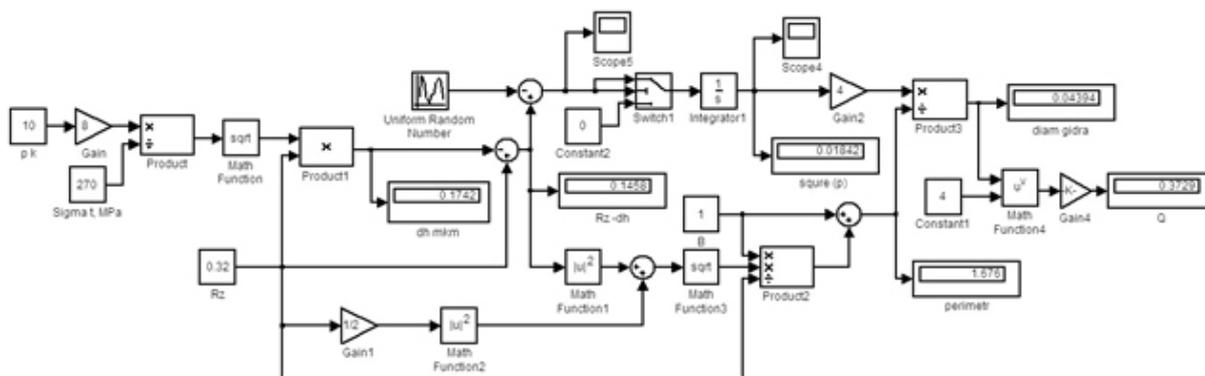


Рис. 2. Модель герметичности неподвижного соединения.

Особенностью модели является использование генератора случайных чисел, имитирующего вариацию значений параметра шероховатости поверхности. Результаты моделирования (без учета погрешностей изготовления и расположения поверхностей стыка) представлены на рис. 3 и 4.

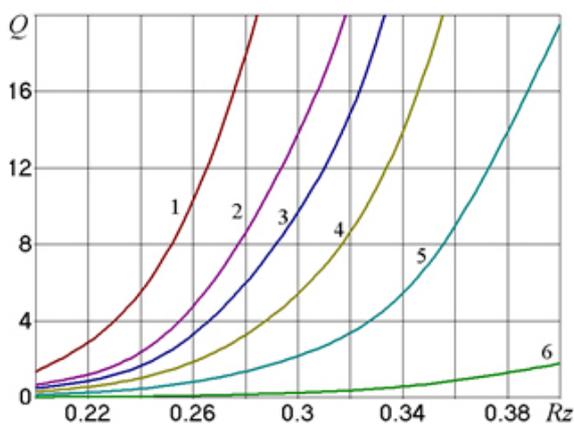


Рис. 3. Утечка Q (мл/с) через уплотнение в зависимости от шероховатости поверхностей R_z (мкм).

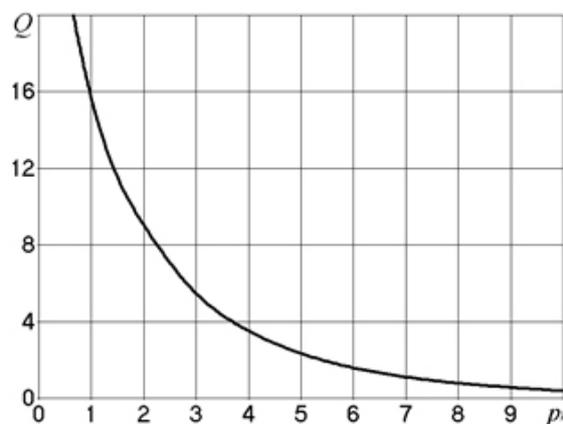


Рис. 4. Утечка Q (мл/с) через уплотнение в зависимости от контактного давления p_k (МПа).

Графики зависимости, представленные на рис. 3, построены при нескольких значениях контактного давления p_k в стыке (таблица 4), а на рис. 4 показана кривая зависимости от контактного давления для значения шероховатости $R_z = 0.32$ мкм.

Таблица 4. Расчетные значения контактного давления

Позиция	1	2	3	4	5	6
Давление, МПа	0	0.5	1	2	4	10

Исходя из полученных результатов, следует, что даже при низкой шероховатости обработанных поверхностей неподвижное соединение не может обеспечить высокую герметичность. Следовательно, для герметизации разъемных неподвижных соединений можно рекомендовать, кроме нагружения поверхностей стыка и точной пригонки контактирующих поверхностей уплотнения, обеспечивающих минимальные зазоры в соединении, использовать электромагнитные поля, взаимодействующие со средами в зазорах уплотнения, генерировать инерционные и вихревые поля для повышения герметичности стыка, создавать гидравлические затворы с избыточным давлением, использовать эффект сорбции (для поглощения жидкости/газа уплотняемой средой), применять дренажные системы внутри уплотнения для отвода утечек.

Выводы

1. Получены теоретические зависимости, позволяющие оценить герметичность неподвижного соединения в зависимости от основных параметров уплотнения – шероховатости и погрешностей изготовления и расположения поверхностей стыка, их физико-механических свойств, характеристик герметизируемой жидкости, в том числе перепада давления, а также номинального давления в стыке.
2. На герметичность уплотнения существенное значение влияют шероховатости, погрешности изготовления и расположения поверхностей стыка, а также величина смещения, создаваемая за счет номинального давления в стыке.
3. Разработана методика оценки площади контакта и величины относительного смещения поверхностей с учетом характеристик материала.
4. Предложенные зависимости инженерных характеристик обеспечивают хорошее совпадение (корреляцию) с опытными данными.

Литература:

1. Кушнир А.П. Исследование динамических процессов в уплотнительных устройствах мехатронных шпиндельных узлов. *Мехатроника, Автоматизация, Управление*. 2012;5:64-68.
2. Кушнир А.П. Моделирование течения вокруг вращающегося диска. *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2010;7:3-8.
3. Захаров Б.С. Новые типы уплотнений гидравлических машин. Серия Современные нефтегазовые технологии. Москва-Ижевск: Издательство «ИКИ», 2017. 112 с. ISBN 978-5-4344-0438-9
4. Новиков Д.К., Фалалеев С.В. Опоры и уплотнения авиационных двигателей и энергетических установок: электрон. учебное пособие. Самара: Изд-во Самарского гос. аэрокосмического ун-та, 2011. 122 с.
5. Мельник В.А. Торцовые уплотнения валов. М.: Машиностроение, 2008. 320 с. ISBN 978-5-217-03383-6
6. Jiao J., Post V. Coastal Hydrogeology. Cambridge University Press, 2019. 426 p. <https://doi.org/10.1017/9781139344142>
7. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. Трение, износ и смазка, под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 575 с. ISBN 521703193X
8. Албагачиев А.Ю., Кушнир А.П. Теоретическая оценка податливости контакта реальных поверхностей. *Тяжелое машиностроение*. 2010;12:32-33.

9. Макаров В.А., Асадова Ю.С., Тютяев Р.Е. Определение параметров течения газов в дефектах изделий методом электрогидравлической аналогии. В сб.: Научные труды IV Междунар. науч. конф. «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». Москва, 24-25 ноября 2015. М.: Изд. Дом «Спектр», 2015. С. 151-155.
10. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации: учебное пособие. 2-е изд. М.: МАКС Пресс, 2017. 88 с.
11. Беляев Н.М. Сопротивление материалов: учебное пособие. Изд. 15-е. М.: Альянс, 2014. 607 с. ISBN 978-5-91872-043-1
12. Детали и механизмы металлорежущих станков: в 2-х т., под ред. Д.Н. Решетова. Т. 1. М.: Машиностроение, 1975. 663 с.

References:

1. Kushnir A.P. Research of Self-Oscillatory Processes in Sealing Devices of Mechatronic Spindles. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*. 2012; 5:64-68 (in Russ.).
2. Kushnir A.P. Simulation of flow around a rotating free disk. *Trenie i smazka v mashinax i mexanizmax = Friction & lubrication in machines and mechanisms*. 2010;7:3-8 (in Russ.).
3. Zakharov B.S. *Novye tipy uplotnenii gidravlicheskih mashin. Seriya Sovremennye neftegazovye tekhnologii* (New types of seals hydraulic machines. A series of modern oil and gas technology. Moscow-Izhevsk: IKI Publishing House; 2017. 112 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4344-0438-9
4. Novikov D.K., Falaleev S.V. *Opory i uplotneniya aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok [elektronik resurs]: elektron. uchebnoe posobie* (Supports and seals of aircraft engines and power plants). Samara: Publishing House of Samara State Aerospace University; 2011. 122 p. (in Russ.).
5. Mel'nik V.A. *Tortsovye uplotneniya valov* (Face seals shaft). Moscow: Mashinostroenie; 2008. 320 p. (in Russ.). ISBN 978-5-217-03383-6
6. Jiao J., Post V. *Coastal Hydrogeology*. Cambridge University Press; 2019. 426 p. <https://doi.org/10.1017/9781139344142>
7. Chichinadze A.V., Berliner E.M., Brown E.D. *Trenie, iznos i smazka* (Friction, wear and lubrication); A.V. Chichinadze (Ed.). Moscow: Mashinostroenie; 2003. 575 p. (in Russ.). ISBN 521703193X
8. Albagachiev A.Yu., Kushnir A.P. Theoretical research of real surfaces contact. *Tyazheloe mashinostroenie = Russ. J. Heavy Machinery*. 2010;12:32-33 (in Russ.).
9. Makarov V.A., Asadova Yu.S., Tyutyayev R.E. Determination of the parameters of the flow of gases in defects products using electro-hydraulic analogy In: Proc. 4th International scientific conference «Fundamental research and innovative engineering technologies». Moscow, 24–25 November 2015. Moscow: Spektr Publishing House; 2015. P. 151-155 (in Russ.).
10. Leont'ev N.E. *Osnovy teorii fil'tratsii: uchebnoe posobie* (Fundamentals of Filtration Theory). 2nd ed. Moscow: MAX Press; 2017. 88 p. (in Russ.).
11. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov: uchebnoe posobie* (Resistance of materials). Ed. 15th. Moscow: Al'yans; 2014. 607 p. (in Russ.). ISBN 978-5-91872-043-1
12. *Detali i mekhanizmy metallorazhushchikh stankov* (Details and mechanisms of machine tools): in 2 v., D.N. Reshetov (Ed.). V. 1. Moscow: Mashinostroenie; 1975. 663 p. (in Russ.).

Об авторах:

Кушнир Александр Петрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной информатики Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Асадова Юлия Сергеевна, старший преподаватель кафедры промышленной информатики Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Alexander P. Kushnir, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Informatics of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Yulia S. Asadova, Senior Lecturer, Department of Industrial Informatics of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 28.12.2019; получена после доработки: 07.06.2020; принята к опубликованию: 25.06.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-91-102>



УДК 51-77

Оптимизационные процедуры в задаче маркетинга образовательных услуг на этапе формирования политики набора абитуриентов в вузы

**В.А. Рогова,
Р.В. Шамин[@]**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

В статье рассмотрены оптимизационные процедуры в маркетинге образовательных услуг при формировании маркетинговой стратегии нового набора в вузе. Рассмотрена математическая модель для формализации целевой функции при оценке результатов нового набора в вузе, которая является основой для создания оптимизационных процедур. Результаты нового набора характеризуются количественными и качественными показателями, которые включают в себя численность абитуриентов, а также средний балл ЕГЭ.

Предложена экономико-математическая модель для оптимального определения параметров нового набора, обеспечивающая сбалансированную политику его осуществления. При этом показана важность минимального порога баллов ЕГЭ, которые должен набрать абитуриент для зачисления в вуз. Увеличение этого параметра способствует тому, что увеличивается средний балл ЕГЭ у зачисленных студентов, но при этом уменьшается количество студентов, зачисленных на места с полным возмещением затрат. Рассмотрена оптимизационная задача, с помощью которой возможно вычислить оптимальное значение этого параметра.

Предложена теоретико-игровая математическая модель для моделирования влияния маркетинговых мероприятий и случайных факторов на результат нового набора, с помощью которой можно формировать ранжированный перечень мероприятий и оптимальное распределение ресурсов. Использование теоретико-игрового подхода позволяет эффективно учитывать факторы неопределенности, которые влияют на результаты нового набора. При этом предложен максиминный подход, с помощью которого определяется оптимальная стратегия маркетинговых мероприятий при организации нового набора в вузе. Предложена общая схема использования оптимизационной модели и приведен алгоритм,

с помощью которого получается оптимальная маркетинговая стратегия нового набора и оптимальное распределение ресурсов на обеспечение этих мероприятий.

Ключевые слова: маркетинг образовательных услуг, оптимизационная задача, новый набор, теоретико-игровая модель, оптимальная стратегия, оптимальное распределение ресурсов.

Для цитирования: Рогова В.А., Шамин Р.В. Оптимизационные процедуры в задаче маркетинга образовательных услуг на этапе формирования политики набора абитуриентов в вузы. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):91-102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-91-102>

Optimization procedures in the problem of marketing educational services at the stage of forming a policy for recruiting applicants to universities

Vera A. Rogova,
Roman V. Shamin[@]

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

The article discusses the optimization procedures in the marketing of educational services in the formation of a marketing strategy for a new recruitment in a university. A mathematical model for formalizing the objective function when evaluating the results of a new recruitment at a university is considered, which is the basis for creating optimization procedures. The results of the new recruitment are characterized by quantitative and qualitative indicators, which include the number of applicants, as well as the average USE score.

An economic and mathematical model is proposed for the optimal determination of the parameters of a new set, which provides a balanced policy for implementing a new set. At the same time, the importance of the minimum threshold of USE scores that an applicant must collect for admission to a university is shown. An increase in this parameter contributes to the fact that the average USE score of enrolled students increases, but at the same time the number of students enrolled in places with full cost recovery decreases. An optimization problem is considered, with the help of which it is possible to calculate the optimal value of this parameter.

A game-theoretic mathematical model is proposed for modeling the influence of marketing activities and random factors on the result of a new set, with the help of which it is possible to form a ranked list of activities and the optimal allocation of resources. Using the game-theoretic approach allows you to effectively take into account the uncertainties that affect the results of the new set. At the same time, a maximin approach is proposed, with the help of which we calculate the optimal strategy of marketing activities when organizing a new recruitment at a university. At the same time, a general scheme for using the optimization model is proposed and an algorithm is presented with the help of which we obtain a calculated optimal marketing strategy for implementing a new recruitment at a university and an optimal allocation of resources to ensure these activities.

Keywords: marketing of educational services, optimization problem, new set, game-theoretic model, optimal strategy, optimal resource allocation.

For citation: Rogova V.A., Shamin R.V. Optimization procedures in the problem of marketing educational services at the stage of forming a policy for recruiting applicants to universities. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):91-102 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-91-102>

Введение

Для большинства образовательных организаций высшего образования России в современных условиях их функционирования все большую значимость приобретает вопрос результативного проведения кампании нового набора и формирования контингента первокурсников, отвечающего целям развития самой образовательной организации. Поэтому успешно проведенный новый набор – это залог возможности осуществления образовательной деятельности не только в краткосрочной, но и в среднесрочной перспективе.

Однако практика показывает, что с каждым годом решать задачи нового набора вузам становится все труднее. Среди основных внешних (относительно системы высшего образования) факторов справедливо выделяется ухудшающаяся демографическая ситуация. По данным демографической статистики, за период с 2015 г. по 2019 г. численность населения страны в референтной возрастной группе (18 – 25 лет) сократилась на 19.5% [1]. Среди внутрисистемных факторов следует выделить сокращение количества бюджетных мест, а также повышающуюся ежегодно нормативную стоимость обучения, которая непосредственно влияет на устанавливаемую вузами стоимость обучения, и в силу невысокого уровня и тенденции снижения реальных доходов населения делает недоступным получение высшего образования на платной основе для определенной части молодых людей. В результате, динамика приема имеет тенденцию снижения: численность приема в вузы за период 2015 – 2019 гг. сократилась на 7.6%; прием на бюджетные места в государственных вузах за рассматриваемый период сократился на 2.8%, а на места с полным возмещением затрат – на 1.5% [2]. Если принять во внимание появление в системе высшего образования образовательных организаций, обладающих определенным статусом (федеральные университеты, национальные исследовательские университеты и, конечно, МГУ и СПбГУ, обладающие особым узаконенным статусом), становится совершенно очевидной тенденция дифференциации вузов, которая в совокупности с указанными выше факторами приводит к усилению конкуренции между образовательными организациями за привлечение абитуриентов.

Организуя новый набор, вузы стремятся не только к тому, чтобы привлечь как можно больше абитуриентов, но и к тому, чтобы эти абитуриенты обладали высокими «качественными» характеристиками: средний балл ЕГЭ, высокий балл по профильному предмету, наличие индивидуальных достижений и пр. И дело не только в том, что более подготовленные абитуриенты – это в последующем фактор повышения качества образовательного процесса, но и в том, что показатели качества нового набора являются показателями мониторинга деятельности вузов и используются в различных оценочных процедурах, по результатам которых принимаются многие важные для вузов решения, в том числе, выделение контрольных цифр приема.

Таким образом, современные условия функционирования образовательных организаций высшего образования требуют от вузов, с одной стороны, усилий по увеличению количества принятых на первый курс обучающихся; с другой стороны, желательно, чтобы это количество было достаточно высокого качества [3].

В своем стремлении повысить результативность нового набора образовательные организации все активнее используют маркетинговые инструменты, способствующие

щие информированию абитуриентов, повышению их интереса к вузу, продвижению образовательных программ, реализуемых вузом, воздействию на увлеченность абитуриентов определенной профессиональной деятельностью. Организуя маркетинговую деятельность, образовательная организация должна четко понимать, в рамках какой стратегии нового набора она собирается действовать, какие из задач нового набора являются приоритетными. От этого зависит планирование маркетинговых мероприятий, их направленность, выбор соответствующих маркетинговых инструментов. Предлагаемая статья – это попытка привлечь для решения обозначенных задач математический инструментарий, позволяющий формализовать целевую функцию нового набора, наложить на нее существующие ограничения (условия приема и интересы образовательной организации) и сформулировать оптимизационную задачу в соответствии с заданными критериями.

1. Математическая оптимизационная модель

Рассмотрим математическую модель для формализации целевой функции для оценки результатов нового набора в вузе, которая ляжет в основу создания оптимизационных процедур.

Результаты нового набора характеризуется количественными и качественными показателями, основными из которых являются:

- численность абитуриентов, зачисленных на бюджетные места;
- численность абитуриентов, зачисленных на места с полным возмещением затрат;
- средний балл ЕГЭ.

Достижение определенных значений в финансово-экономическом отношении дает доход вуза в виде субсидии на выполнение государственного задания и доход от внебюджетной образовательной деятельности в части основных образовательных программ высшего образования.

Рассмотрим математическую модель целевой функции нового набора. В результате нового набора, без разделения уровней образования¹, осуществляется зачисление на бюджетные и платные места. Пусть количество бюджетных студентов равно N , а количество студентов, зачисленных на места с полным возмещением затрат, равно M . Введем обозначения: b_n – суммарное количество баллов ЕГЭ у студента с номером n , где $n = 1, 2, \dots, N$. Соответственно, c_m – суммарное количество баллов ЕГЭ у студента, зачисленного на место с полным возмещением затрат, с номером m , где $m = 1, 2, \dots, M$.

Каждый студент, зачисленный на бюджетное место, приносит доход, который мы обозначим через r_n для студента с номером n , в зависимости от выбранного направления подготовки или специальности. При этом студент, зачисленный на место с полным возмещением затрат, приносит доход, который мы обозначим через q_m для студента с номером m .

Таким образом, экономический результат нового набора выражается с помощью функции

$$F(B, C) = r_1 + r_2 + \dots + r_N + q_1 + q_2 + \dots + q_M$$

¹ Модель целевой функции нового набора рассматривается применительно к приему на основные образовательные программы бакалавриата и специалитета ввиду отсутствия при поступлении на образовательные программы магистратуры учета баллов ЕГЭ.

где через C и B обозначены множества студентов, зачисленных на бюджетные места и места с полным возмещением расходов.

С другой стороны, результат нового набора может быть оценен с помощью среднего балла ЕГЭ у поступивших на первый курс студентов. Для этого введем функцию

$$G(B, C) = (b_1 + b_2 + \dots + b_N + c_1 + c_2 + \dots + c_M)/(N + M).$$

В итоге мы получаем следующую целевую функцию

$$H(B, C) = \alpha \cdot F(B, C) + \beta \cdot G(B, C),$$

где α и β суть положительные коэффициенты, с помощью которых мы приводим слагаемые, включающие значения функций F и G , к безразмерному виду. Другая роль этих коэффициентов состоит в том, чтобы указать приоритет задачи при оптимизации функций F и G .

Итоговая оптимизационная задача может быть сформулирована в следующем виде

$$H(B, C) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где максимум берется по множествам B и C . С задачей (1) необходимо связать ограничения:

$$N \leq K, M \leq P, \quad (2)$$

где K – это количество бюджетных мест, выделенных вузу в рамках контрольных цифр приема (КЦП), а P – это максимальное количество студентов, которые могут быть зачислены в рамках платного набора.

2. Анализ оптимизационной задачи

С математической точки зрения оптимизационная задача (1), (2) имеет тривиальное решение, когда $N = K$ и $M = P$. Однако вуз не в полной мере может управлять числами N и M , а также множествами B и C , поскольку эти величины представляют собой случайные множества.

Маркетинговые мероприятия, реализуемые в рамках приемной компании вуза, могут изменить статистические характеристики этих случайных параметров.

В реальности, как правило, для нормально функционирующих вузов, имеет место равенство $N = K$, что означает, что на все бюджетные места произведен 100% набор студентов. Однако ситуация $M = P$ в технических вузах бывает крайне редкой.

Для множества B принципиальное значение имеет решение оптимизационной задачи

$$b_n \rightarrow \max, n = 1, 2, \dots, N.$$

Заметим, что эта задача имеет ограничение – суммарный балл не может быть более 310, но для ее математической постановки это не существенно.

Величины b_n определяются конкурсом на соответствующие специальности, который в свою очередь определяет проходной балл, т.е. минимальное значение для величин b_n .

Для множества C принципиальное значение имеет величина M , которая определяет количество студентов, обучающихся на платных местах. При этом величины c_m определяются минимальным количеством баллов, при котором абитуриент может быть зачислен

на первый курс. Эта величина определяется руководством вуза с учетом минимальных баллов, установленных нормативными документами. Обозначим эту величину через γ , тогда мы можем следующим образом конкретизировать условия для оптимизационной задачи:

$$c_m \geq \gamma, m = 1, 2, \dots, M.$$

Величина γ играет принципиально важную роль при формировании приемной политики в вузе.

Имеют место следующие зависимости функций B и C от значения γ при прочих равных условиях

$$F(C(\gamma')) > F(C(\gamma'')), \text{ если } \gamma' < \gamma''$$

и

$$G(B(\gamma'), C(\gamma')) < G(B(\gamma''), C(\gamma'')), \text{ если } \gamma' < \gamma''.$$

Из этих соотношений мы видим, что функция F является убывающей, а функция G возрастающей в зависимости от параметра γ . Если предположить, что имеет место непрерывная зависимость этих функций относительно параметра γ , то тогда должно существовать значение γ^* , которое будет оптимальным для следующей оптимизационной задачи

$$H(B(\gamma), C(\gamma)) \rightarrow \max,$$

где максимум берется по величине γ . Таким образом, оптимальная величина определяется из следующего соотношения

$$\max \{ H(B(\gamma), C(\gamma)) : \gamma \} = H(B(\gamma^*), C(\gamma^*)).$$

Проблема при определении величины γ^* связана с тем, что на значения функции H большое влияние оказывают многие факторы, которые могут быть разделены на следующие группы:

- фундаментальные факторы;
- факторы управления;
- конъюнктурные факторы;
- случайные факторы.

Фундаментальные факторы определяются собственно образовательными программами вуза и качеством образовательных услуг, но главным образом – имиджем вуза в глазах абитуриентов и традиционным отношением к вузу.

Факторы управления – это те факторы, которые определяются действием вуза в рамках разворачивающейся приемной компании, рекламными действиями, а также различными мероприятиями, проводимыми вузом в рамках привлечения абитуриентов.

Конъюнктурные факторы – это факторы, которые связаны с конкретной ситуацией, возникающей в рамках данной приемной компании. Например, резкое падение или повышение спроса на определенные образовательные программы, социальные и экономические факторы, влияющие на ход приемной компании и т.д.

Наконец, случайные факторы – это факторы, которые складываются в результате различных факторов неопределенности, присущих любым социальным и экономическим процессам [4].

3. Математическая модель оптимизации маркетинговой стратегии

Для решения поставленных задач перед новым набором студентов вузы могут использовать различные маркетинговые стратегии в зависимости от поставленных целей. Маркетинговую стратегию можно представить как набор маркетинговых мероприятий. При этом разнообразные маркетинговые мероприятия могут быть направлены на достижение различных целей, которые ставятся перед новым набором.

Мы рассмотрим математическую модель для ранжирования маркетинговых мероприятий с целью оптимизации результатов нового набора и выработки оптимальной маркетинговой стратегии [5].

Пусть мы рассматриваем K различных маркетинговых мероприятий. Тогда через вектор $X = (x_1, x_2, \dots, x_K)$ обозначим приоритеты каждого мероприятия, которые будем выражать следующими значениями:

$$x_k \in [0, 1], k = 1, 2, \dots, K,$$

$$x_1 + x_2 + \dots + x_K = 1.$$

При этом полагаем, что нулевое значение величины x_k означает неприменимость данного мероприятия. Заметим, что если какое-либо значение $x_k = 1$, то это будет означать, что мы применяем только данное мероприятие. Разумеется, что случаи, когда $x_k \in \{0, 1\}$, являются вырожденными.

При моделировании процессов нового набора мы должны учитывать не только применяемые вузом маркетинговые мероприятия, но и случайные факторы. Обозначим через Y набор реализовавшихся случайных факторов, а все возможные случайные факторы – через Ω , поэтому будем писать $Y \in \Omega$.

Сохраняя обозначения п. 1, запишем целевую функцию следующим образом

$$H(X, Y) = H(B(X), C(Y)) = \alpha \cdot F(B(X), C(Y)) + \beta \cdot G(B(X), C(Y)),$$

где рассматриваем, что результат нового набора B и C зависит от маркетинговых мероприятий X , а также от случайных факторов Y , поэтому в итоге мы рассматриваем только зависимость от переменных X, Y .

Оптимизационная задача состоит в максимизации значения функции $H(X, Y)$, но в отличие от ситуации п. 2, когда рассматривалась зависимость целевой функции только от результатов набора, сейчас мы имеем дело с ситуацией, когда контролируется только переменная X . В зависимости от реализации случайных факторов Y оптимальный «ответ» – выбор стратегии маркетинга X – будет различной. Однако рассматривая процесс нового набора, мы не можем выбрать значение вектора X по результатам случайных факторов Y , поскольку выбор маркетинговой стратегии необходимо делать до того, как будет реализовываться новый набор.

Если нам известны вероятности реализации случайных факторов $P(Y)$, то можно свести стохастическую оптимизационную задачу к классической задаче математического

программирования с помощью процедуры усреднения, используя математическое ожидание

$$E_Y[H(X, Y)] = \sum H(X, Y) \cdot P(Y) \rightarrow \max,$$

где суммирование ведется по всем реализациям Y (в случае, когда Y – не дискретная величина, вместо суммы следует записать интеграл Лебега).

Однако при практическом использовании данной модели вероятности случайных факторов никогда не могут быть известны. При этом исторические данные набора предыдущих лет, вообще говоря, не в полной мере могут быть использованы в виду нестационарности случайных процессов, которые определяют реализацию Y [6].

Для решения оптимизационной задачи рассмотрим теоретико-игровую трактовку оптимизационной процедуры. Следуя подходу, развитому в теоретической математической статистике, мы будем рассматривать двух игроков: вуз и «природу». При этом у вуза есть стратегии X , а у «природы» – Y . Задача вуза состоит в том, чтобы максимизировать значение функции $H(X, Y)$, которая в теории игр называется функцией выигрыша, а задача «природы» – минимизировать значение этой функции [7]. Разумеется, что у нас нет оснований полагать, что «природа» имеет какие-либо цели, но для выбора оптимальной стратегии следует предполагать наихудший вариант развития событий [8].

Таким образом, мы имеем теоретико-игровую задачу с двумя игроками с противоположными функциями выигрыша. Такие игры называются антагонистичными играми. Хорошо известно, что антагонистичные игры имеют решения в смешанных стратегиях [9, 10]. Смешанными стратегиями называются распределения вероятностей среди возможных стратегий, когда стратегия выбирается случайным образом на основании выбранных распределений. Пара смешанных стратегий X^* и Y^* называется равновесными стратегиями, если для любых X и Y имеет место

$$H(X, Y^*) \leq H(X^*, Y^*) \leq H(X^*, Y).$$

Поиск равновесных смешанных стратегий представляет собой сложную вычислительную процедуру, поэтому на практике следует использовать максиминную процедуру для нахождения максиминного решения. Максиминное решение X^* – это такая стратегия, которая удовлетворяет следующему условию

$$\max_{(X)} \min_{(Y)} H(X, Y) = \min_{(Y)} H(X^*, Y).$$

При этом величина

$$V = \min_{(Y)} H(X^*, Y)$$

называется ценой игры. Величина цены игры показывает теоретический минимум, который будет достигнут при любой реализации случайных факторов.

Выбор максиминной стратегии – это довольно осторожная линия поведения, но в случае планирования маркетинговой стратегии нового набора использование максиминных стратегий является разумным, поскольку позволяет минимизировать риски, связанные с негативным воздействием случайных факторов [11, 12].

4. Интерпретация теоретико-игровой модели оптимизации

В предыдущем пункте мы построили теоретико-игровую модель поиска оптимальной стратегии выбора маркетинговых мероприятий с учетом случайных факторов, которые влияют на результат нового набора. Рассмотрим, каким образом следует интерпретировать полученный результат. Пусть в результате вычисления максиминной стратегии в рассматриваемой модели мы получили оптимальную стратегию

$$X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_K^*).$$

Поскольку компоненты вектора X^* – это числа из отрезка $[0, 1]$, то можно получить упорядоченный набор компонент этого вектора по убыванию

$$x_{i_1}^* \geq x_{i_2}^* \geq \dots \geq x_{i_K}^*,$$

где номера i_1, i_2, \dots, i_K соответствуют ранжированному перечню маркетинговых мероприятий для достижения целей нового набора.

Кроме того, полученный результат представляет собой не только ранжированный перечень маркетинговых мероприятий, но и дает возможность оптимального распределения ресурсов для обеспечения соответствующих маркетинговых мероприятий. Пусть на обеспечение маркетинговых мероприятий в вузе выделены ресурсы (финансовые, материальные, кадровые, организационные), которые мы будем измерять величиной R . Тогда для обеспечения k -го мероприятия целесообразно выделить ресурс

$$r_k = x_k \cdot R, k = 1, 2, \dots, K.$$

При этом имеет место полное распределение ресурсов

$$r_1 + r_2 + \dots + r_K = R.$$

Разумеется, что план распределения ресурсов, который получается в результате расчетов по предложенной модели, является лишь примерным, поскольку при реальном распределении ресурсов для обеспечения маркетинговых мероприятий, необходимо учитывать различные ограничения, связанные с ресурсным обеспечением нового набора.

5. Схема использования оптимизационной модели

Предложенная теоретико-игровая модель расчета оптимальной стратегии маркетинговых мероприятий для достижения заданных целей нового набора позволяет получать ранжированный перечень маркетинговых мероприятий и оптимальное распределение ресурсов. На практике для использования этой модели в вузах при оптимизации маркетинговых ресурсов, следует использовать схему, которую мы приводим на рисунке.

Приведем методику применения этой оптимизационной модели для проведения расчетов в виде алгоритма, состоящего из 9 шагов.

Шаг 1.

Определение списка возможных маркетинговых мероприятий. Примерный список этих мероприятий:

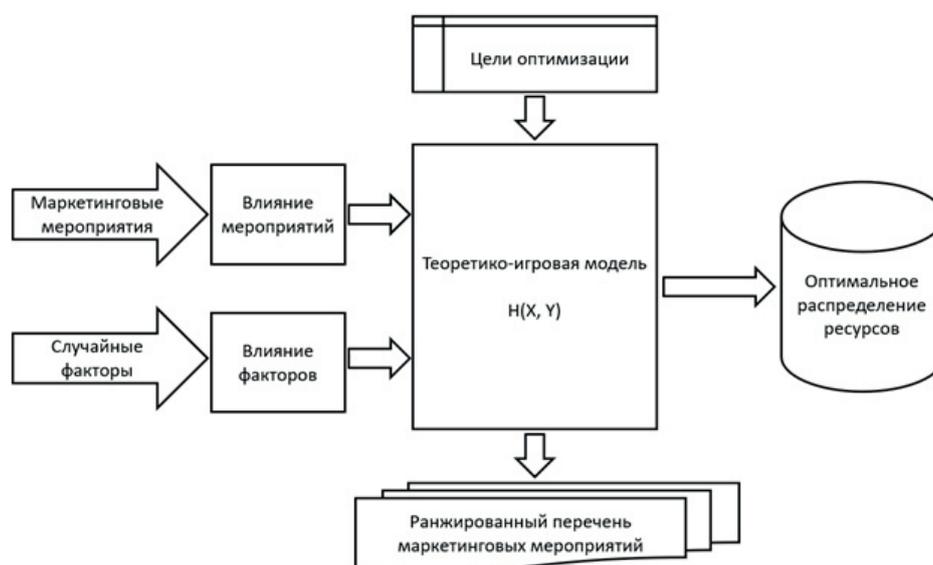


Рисунок. Схема применения оптимизационной модели.

- создание/модернизация образовательных программ с целью приближения их к популярным направлениям подготовки;
- выбор постоянных предприятий-партнеров;
- создание «интересных» лабораторий для студентов;
- проведение дополнительных занятий со школьниками (университетские субботы, инженерные каникулы, инженерные классы, программы Технопарка);
- система скидок;
- целевые места;
- реклама (стендовая, бумажная, интернет, ТВ и радио, популярные блогеры, социальные сети);
- PR и создание имиджа;
- «сарафанное радио»;
- реклама через студентов;
- создание отдельных технопарков;
- работа со школьниками в школах;
- организация летних каникул со школьниками.

Шаг 2.

Определение возможных случайных факторов, влияющих на новый набор. Эти факторы могут включать в себя:

- популярность различных направлений и специальностей подготовки;
- общий уровень баллов ЕГЭ;
- случайные социально-экономические факторы (инфляция, рост безработицы, форс-мажорные обстоятельства: стихийные бедствия, пандемия заболеваний и т.д.);
- изменение числа бюджетных мест;
- изменение нормативной и правовой базы.

Шаг 3.

Построение функциональной зависимости количества и качества (с точки зрения баллов ЕГЭ) студентов, обучающихся на бюджетной основе и с условием полного воз-

мещения расходов на обучение, от примененных маркетинговых мероприятий и оценки случайных факторов.

Шаг 4.

Определение эмпирических коэффициентов α , β , которые задаются, исходя из политики вуза в отношении к целевым параметрам набора.

Шаг 5.

Расчет оптимального значения минимального порога баллов ЕГЭ для поступления в вуз величины γ^* .

Шаг 6.

На основании шагов 3–5 построение целевой функции (функции выигрыша) $H(X, Y)$.

Шаг 7.

Нахождение максиминного решения игровой задачи, определение оптимального вектора X^* и цены V .

Шаг 8.

Ранжирование перечня маркетинговых мероприятий по приоритетному влиянию на целевые показатели нового набора.

Шаг 9.

Расчет оптимального распределения ресурсов по ранжированному перечню мероприятий.

В результате применения этой схемы получаем рассчитанную оптимальную маркетинговую стратегию для осуществления нового набора в вузе и оптимальное распределение ресурсов.

Заключение

В статье предложена новая экономико-математическая модель для оптимизации маркетинговой стратегии вузов при проведении нового набора абитуриентов с учетом возможных случайных факторов, влияющих на результат набора.

Предложенная оптимизационная модель позволяет сформировать ранжированный перечень маркетинговых мероприятий по степени их влияния на целевые показатели планируемого нового набора, а также оптимальное распределение ресурсов для обеспечения маркетинговых мероприятий.

Дано теоретическое обоснование теоретико-игровой модели, а также приведены практическая схема и алгоритм для использования этой модели на практике.

Предложенный подход может быть использован при формировании маркетинговой стратегии и политики проведения нового набора вузами в современных условиях с учетом различных факторов неопределенности.

Литература:

1. Образование в России – 2016. Статистический бюллетень. М.: МИРЭА, 2016. 630 с.
2. Образование в России – 2020. Статистический бюллетень. М.: МИРЭА., 2020. 480 с.
3. Рогова В.А. Проблемы нового набора в вузы на инженерно-технические направления подготовки и специальности. *Экономика и предпринимательство*. 2018;8(97):1259-1266.
4. Шамин Р.В. Машинное обучение в задачах экономики. М: "Трин Принт", 2019. 140 с. ISBN 978-5-6042765-9-4

5. Shamin R.V., Uryngaliyeva A.A., Shermadini M.V., Filippov P.G. The model of evolutionary optimization of production processes at advanced technological enterprises. *Espacios*. 2019;40(20):26.
6. Shamin R.V., Chursin A.A., Kokuytseva T.V., Ostrovskaya A.A., Semenov A.S. Modeling of growth-collapse processes and their applications to pricing management. *Int. J. Pure Appl. Math.* 2018;118(Special Iss. 18D):3741-3745.
7. Боровков А.А. Математическая статистика. Новосибирск: Наука, 1997. 771с. ISBN 5-86134-024-2
8. Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. М.: Наука, 1970. 707 с.
9. Захаров А.В. Теория игр в общественных науках. М.: Изд. дом Высшей школы экономики. 2019. 304 с. ISBN 978-5-7598-1941-7
10. Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Шевкопляс Е.В. Теория игр. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 432 с. ISBN 978-5-9775-0484-3
11. Hurwicz L. The design of mechanisms for resource allocation. *Am. Econ. Rev.* 1973;63(2):1-30.
12. Демьянов В. Ф., Малоземов В. Н. Введение в минимакс. М.: Наука, 1972. 368 с.

References:

1. Obrazovanie v Rossii – 2016. *Statisticheskii byulleten'* (Education in Russia – 2016. Statistical Bulletin). Moscow: MIREA Publishing House; 2016. 630 p. (in Russ.).
2. Obrazovanie v Rossii – 2020. *Statisticheskii byulleten'* (Education in Russia – 2020. Statistical Bulletin). Moscow: MIREA Publishing House; 2016. 480 p. (in Russ.).
3. Rogova V.A. Problems of a new kit for higher education institutions for engineering and technical directions of training and specialty. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Journal of Economy and entrepreneurship*. 2018;8(97):1259-1266 (in Russ.).
4. Shamin R.V. *Mashinnoe obuchenie v zadachakh ekonomiki* (Machine learning in problems of economics). Moscow: "Grin Print"; 2019. 140 p. (in Russ.). ISBN 978-5-6042765-9-4
5. Shamin R.V., Uryngaliyeva A.A., Shermadini M.V., Filippov P.G. The model of evolutionary optimization of production processes at advanced technological enterprises. *Espacios*. 2019;40(20):26.
6. Shamin R.V., Chursin A.A., Kokuytseva T.V., Ostrovskaya A.A., Semenov A.S. Modeling of growth-collapse processes and their applications to pricing management. *Int. J. Pure Appl. Math.* 2018;118(Special Iss. 18D):3741-3745.
7. Borovkov A.A. *Matematicheskaya statistika* (Mathematical statistics). Novosibirsk: Nauka; 771 p. (in Russ.). ISBN 5-86134-024-2
8. Nejman Dzh., Morgenshern O. *Teorija igr i jekonomicheskoe povedenie* (Game theory and economic behavior). Moscow: Nauka; 1970. 707 p. (in Russ.).
[Neumann D., Morgenstern O. Theory of games and economic behavior. Princeton: Princeton University Press; 1953. 739 p.]
9. Zaharov A.V. *Teorija igr v obshhestvennykh naukakh* (Game theory in the social sciences). Moscow: HSE's press; 2019. 304 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7598-1941-7
10. Petrosjan L.A., Zenkevich N.A., Shevkoptyas E.V. *Teorija igr* (Game theory). Sankt Peterburg: BHV-Peterburg; 2012. 432 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9775-0484-3
11. Hurwicz L. The design of mechanisms for resource allocation. *Am. Econ. Rev.* 1973;63(2):1-30.
12. Dem'janov V. F., Malozemov V. N. *Vvedenie v minimaks* (Introduction to minimax). Moscow: Nauka; 1972. 368 p. (in Russ.).

Об авторах:

Рогова Вера Александровна, начальник Управления по работе с абитуриентами ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Шамин Роман Вячеславович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой информатики Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID:6506250832

About the authors:

Vera A. Rogova, Head of the Department for Work with Applicants, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Roman V. Shamin, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Information of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID:6506250832

Поступила: 30.06.2020; получена после доработки: 09.07.2020; принята к опубликованию: 31.07.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-103-114>



УДК 535

Использование профилирующих функций для постановки задач синтеза слоистых диэлектрических фильтров

**Ю.И. Худак[@],
Д.В. Парфенов,
Н.В. Музылев,
Т.С. Хачлаев**

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

Разработан математический аппарат, позволивший сформулировать и обосновать новый подход к математической постановке задачи синтеза полосовых слоистых диэлектрических фильтров (СДФ). Для произвольных диэлектрических систем с кусочно-непрерывными физическими параметрами среды, определяемыми функциями диэлектрической и магнитной проницаемости материала слоистой системы в зависимости от координаты, измеряемой вдоль направления нормали к слоям, с фиксированными точками разрыва хотя бы одной из указанных функций в отдельных точках, доказано важное тождество сохранения разности квадратов модулей амплитуд плоских волн, распространяющихся в данной слоистой среде влево и вправо, которое порождает традиционную запись закона сохранения энергии для слоистых сред. Указанное тождество позволяет перейти от постановок задач синтеза для дробно-рациональных энергетических коэффициентов отражения или пропускания слоистых систем к эквивалентным постановкам задач для вводимых в работе профилирующих функций, представляющих только числитель или только знаменатель обычно рассматриваемых при синтезе величин. Введено новое понятие правильного идеала для энергетических коэффициентов отражения и пропускания слоистых систем. Показано, что правильность энергетических коэффициентов отражения и пропускания слоистых систем эквивалентна правильности профилирующих функций подобных систем, что в совокупности с основным тождеством позволяет существенно изменить подход

к задачам синтеза СДФ. Указано правило для пересчета идеала коэффициента отражения или пропускания в идеал профилирующей функции. Предлагаемая в работе постановка задачи синтеза приводит к значительно более экономным вычислительным процедурам.

Ключевые слова: слоистые диэлектрические системы, полосовые диэлектрические фильтры, коэффициенты отражения и пропускания, оптимальный чебышёвский синтез, кусочно-непрерывные параметры системы.

Для цитирования: Худак Ю.И., Парфенов Д.В., Музылев Н.В., Хачлаев Т.С. Использование профилирующих функций для постановки задач синтеза слоистых диэлектрических фильтров. *Российский технологический журнал*. 2020;8(5):103-114. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-103-114>

Profiling functions application for layered dielectric filter synthesys problem statement

Yury I. Hudak[@],
Denis V. Parfenov,
Nikolay V. Muzylev,
Timur S. Khachlaev

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

A novel mathematical apparatus allowing formulation and justification of a new approach towards the setting of the mathematical problem of band-pass layered dielectric filters (LDF) synthesis is developed. Arbitrary layered dielectric systems with piecewise continuous physical media parameters given by the functions of dielectric permittivity and of magnetic permeability, both depending on the coordinate along the normal to the layer pile, with fixed discontinuity points of at least one of the mentioned functions are examined. For such systems, an important conservation law for the difference of the squares of absolute amplitude values of plane waves propagating left and right in given layered medium is stated, which further leads to the traditional energy conservation law in lossless layered media. This new identity law allows turning from synthesis problems in terms of fractional rational energy reflectivity and transmittance of layered systems to equivalent tasks for profiling functions introduced in the work, representing only the numerator or only the denominator of the expressions usually considered in the synthesis. A new concept of the feasible ideal is introduced for the energy coefficients of reflection and transmission of layered systems. It is shown that the feasibility of the energy coefficients of reflection and transmission of layered systems is equivalent to the feasibility of the profiling functions of such systems, which together with the main identity allows a significant change of the existing LDF synthesis approach. The rule for converting the ideal of the reflection or transmission coefficient into the ideal of the profiling function is given. The proposed synthesis problem statement leads to considerably less intensive computational procedures.

Keywords: layered dielectric systems, band-pass dielectric filters, reflectivity and transmittance, optimal Chebyshev synthesis, piecewise continuous system parameters.

For citation: Hudak Yu.I., Parfenov D.V., Muzylev N.V., Khachlaev T.S. Profiling functions application for layered dielectric filter synthesys problem statement. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(5):103-114 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-5-103-114>

Введение

Построению слоистых диэлектрических фильтров (СДФ) посвящена обширная литература, например, [1–12]. В тех работах, где приводится математическая постановка задачи синтеза, обычно используется сильно нелинейный по основным параметрам задачи функционал качества синтезируемой системы:

$$\Phi_R \stackrel{\text{def}}{=} \|R(\kappa) - \tilde{R}(\kappa)\|_{\mathbb{L}[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]}, \quad \left(\Phi_T \stackrel{\text{def}}{=} \|T(\kappa) - \tilde{T}(\kappa)\|_{\mathbb{L}[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]} \right),$$

где κ – волновое число, $R(\kappa)$ и $T(\kappa)$ – энергетические коэффициенты, соответственно, отражения и пропускания слоистой диэлектрической системы (СДС), реализующей фильтр. Желаемое поведение энергетического коэффициента отражения или пропускания в заданной полосе волновых чисел $[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$ задаётся спектральными характеристиками¹ этого фильтра $\tilde{R}(\kappa)$ и $\tilde{T}(\kappa)$. Качество проектируемой системы оценивается величиной разности между функциями $R(\kappa)$ и $\tilde{R}(\kappa)$ [$T(\kappa)$ и $\tilde{T}(\kappa)$] по норме линейного нормированного пространства $\mathbb{L}[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$.

В данной работе в качестве пространства сравнения с **идеальными** спектральными характеристиками фильтра $\tilde{R}(\kappa) \cdot [\tilde{T}(\kappa)]$ выбрано пространство $\mathbb{C}[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$ всех непрерывных на фиксированном отрезке $[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$ функций с нормой $\|f(\kappa)\|_{\mathbb{C}[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]} = \max_{\mathcal{K}_1 \leq \kappa \leq \mathcal{K}_2} |f(\kappa)|$.

Математическая постановка задачи оптимального синтеза СДФ в смысле **Чебышёва** состоит в том, чтобы для заданного интервала волновых чисел $[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$ и заданного идеала энергетического коэффициента отражения $\tilde{R}(\kappa)$ минимизировать функционал:

$$\max_{\mathcal{K}_1 \leq \kappa \leq \mathcal{K}_2} |R(\kappa, \vec{p}, \vec{v}) - \tilde{R}(\kappa)| \xrightarrow{\vec{p}, \vec{v}} \min \quad (1)$$

по электрическим толщинам \vec{v} и импедансам \vec{p} всех слоёв СДС.

Определение. Идеал фильтра будем называть **правильным** на заданном интервале волновых чисел $[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$, если он может быть на этом интервале сколь угодно точно равномерно приближен $R(\kappa) \cdot [T(\kappa)]$, реализуемыми СДС в классе рассматриваемых².

Тогда, как будет показано ниже, вычислительная сложность функционала качества определяется **дробно-рациональной** структурой энергетического коэффициента отражения от любой СДС данного класса и может быть существенно уменьшена при помощи эффективной процедуры построения **идеала** не для сложных коэффициентов отражения или пропускания $R(\kappa) \cdot [T(\kappa)]$, а для квадратичных **профилирующих функций**, введённых в [13–16], что существенно упрощает анализ и решение соответствующих оптимизационных задач.

Проведён представляющий самостоятельный интерес анализ прямой задачи об описании всех возможных в СДС с кусочно-непрерывными физическими параметрами пло-

¹ Функции типа $\tilde{R}(\kappa)$, $\tilde{T}(\kappa)$ в данной работе будем называть идеалами для соответствующих физически реализуемых конкретным фильтром спектральных характеристик.

² Это естественное требование **корректности идеальных** характеристик формализуется в виде предположения о том, что $\tilde{R}(\kappa) \cdot [\tilde{T}(\kappa)]$ принадлежит замыканию в метрике $\mathbb{C}[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$ множества всех возможных коэффициентов отражения (пропускания) СДС рассматриваемого класса: для **идеальной** характеристики $\tilde{R}(\kappa) \cdot [\tilde{T}(\kappa)]$ существует последовательность СДС данного класса, коэффициенты отражения (пропускания) которых $R^{(n)}(\kappa) \cdot [T^{(n)}(\kappa)]$ сходятся при $n \rightarrow \infty$ к идеальным характеристикам $\tilde{R}(\kappa) \cdot [\tilde{T}(\kappa)]$ в метрике $\mathbb{C}[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$.

ских электромагнитных полей с плоскостями постоянной фазы, параллельными слоям СДС³.

В этой части работы особенно важен факт доказательства основного энергетического тождества для СДС без потерь [13, 15], в отличие от обычно постулируемой формы закона сохранения энергии⁴:

$$R(\kappa) + T(\kappa) \equiv 1. \quad (2)$$

1. Постановка прямой задачи

Пусть часть пространства \mathbb{R}^3 между двумя параллельными плоскостями π и π' , расстояние между которыми d , $d > 0$, заполнена диэлектрической средой, параметры которой – диэлектрическая и магнитная проницаемости – являются кусочно-непрерывными функциями от координаты x оси OX декартовой системы координат, направленной по нормали от π к π' . Начало координат находится на плоскости π : $\varepsilon = \varepsilon(x)$ и $\mu = \mu(x)$, $0 \leq x \leq d$ с конечным, общим для обеих функций, числом точек разрыва первого рода, которые будем обозначать $a_0 = 0 < a_1 < \dots < a_N = d$, не заботясь о том, какая из двух функций $\varepsilon(x)$ или терпит разрыв в точке a_j . Интервалы непрерывности обеих функций $\varepsilon(x)$ и $\mu(x)$ будем обозначать

$$\Delta_j \stackrel{\text{def}}{=} (a_{j-1}, a_j), (j = 1, \dots, N).$$

Пусть полупространство \mathbb{R}_-^3 слева от π заполнено однородной средой с диэлектрической и магнитной проницаемостями, соответственно, ε_- и μ_- , а полупространство \mathbb{R}_+^3 справа от π' – однородной средой с проницаемостями ε_+ и μ_+ .

Прямая задача о распространении плоских электромагнитных волн в пространстве \mathbb{R}^3 , заполненном слоистым диэлектриком, состоит в описании класса **всех возможных** плоских электромагнитных полей в определённой выше СДС.

Требуется, во-первых, указать количество свободных параметров, определяющих все возможные в указанной системе электромагнитные поля, и, во-вторых, определить коэффициенты отражения и пропускания от СДС $[0, d]$ слева и справа от неё.

Известно (см., например, [5]), что комплексные амплитуды векторов электрической $\vec{E} \stackrel{\text{def}}{=} u(x) \vec{y}_0$ и магнитной $\vec{H} \stackrel{\text{def}}{=} v(x) \vec{z}_0$ напряжённостей плоского электромагнитного поля (зависимость от времени – $\exp(-i\omega t)$) с волновым вектором \vec{k} , параллельным оси OX внутри каждого интервала непрерывности Δ_j функций $\varepsilon(x)$ и $\mu(x)$ удовлетворяют системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} u'_j &= i\kappa\mu_j(x)v_j, \\ v'_j &= i\kappa\varepsilon_j(x)u_j, \end{aligned} \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

которые получаются для плоских волн из общих уравнений Максвелла. Уравнения (3) в матричной записи имеют вид:

$$\vec{u}'_j = \mathbf{P}_j(x)\vec{u}_j(x), \quad \text{где } \vec{u}_j = \begin{pmatrix} u_j(x) \\ v_j(x) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_j(x) = \begin{pmatrix} 0 & i\kappa\mu_j(x) \\ i\kappa\varepsilon_j(x) & 0 \end{pmatrix}.$$

³Ранее в [13–16] подобный анализ был проведен **только** для сред с кусочно-постоянными параметрами.

⁴Распространение результатов данной работы на анализ, например, «наклонного» распространения плоских волн в СДС, как в [14], не представляет трудностей.

Кроме (3), на каждой плоскости $\pi_j: x = a_j$ из разрыва коэффициентов $\varepsilon(x)$ или $\mu(x)$ должны выполняться вытекающие из уравнений Максвелла электродинамические граничные условия, которые в нашем случае совпадают с условиями непрерывности амплитуд электрического и магнитного полей:

$$\bar{\mathbf{u}}(a_j - 0) = \bar{\mathbf{u}}(a_j + 0): \quad \begin{aligned} u(a_j - 0) &= u(a_j + 0) \\ v(a_j - 0) &= v(a_j + 0) \end{aligned} \quad (4)$$

где $(a_j - 0)$ и $(a_j + 0)$ – пределы слева и справа в точках разрыва $a_j, j = 0, 1, 2, \dots, N$, коэффициентов $\varepsilon(x)$ или $\mu(x)$ уравнений (3).

Всевозможные плоские электромагнитные поля рассматриваемого выше типа слева и справа от СДС $[d, 0]$ (в полупространствах \mathbb{R}_{\mp}^3) определяются уравнением (3) с постоянными коэффициентами $\varepsilon_{\pm}, \mu_{\pm}$ слева от плоскости π и $\varepsilon_{\pm}, \mu_{\pm}$ – справа от π' .

Поэтому в полупространствах \mathbb{R}_{\mp}^3 общее решение системы (3) имеет вид:

$$\bar{\mathbf{u}}_{\mp}(x - x_0^{\mp}) = C_0^{\mp} \begin{pmatrix} 1 \\ p_{\mp} \end{pmatrix} e^{ikn_{\mp}(x-x_0^{\mp})} + C_1^{\mp} \begin{pmatrix} 1 \\ -p_{\mp} \end{pmatrix} e^{-ikn_{\mp}(x-x_0^{\mp})},$$

где величины, помеченные индексами « \rightarrow » и « 0 », относятся к плоской волне, распространяющейся в \mathbb{R}_{\pm}^3 к плоскости π , а с индексами « \leftarrow » и « 1 » относятся к плоской волне, распространяющейся в \mathbb{R}_{\pm}^3 от плоскости π' .

Аналогично этому в (3) все величины, помеченные индексами « $+$ » и « 0 », относятся к плоской волне, распространяющейся в \mathbb{R}_{\pm}^3 от плоскости π' а с индексами « $+$ » и « 1 » относятся к плоской волне, распространяющейся в \mathbb{R}_{\pm}^3 к плоскости π' .

Замечание. Вектор Пойнтинга $\vec{\mathbf{W}} = [\vec{\mathbf{E}}, \vec{\mathbf{H}}^*]$ для волны в \mathbb{R}_{\pm}^3 , распространяющейся к плоскости π равен $p_{\pm} |C_0^{\pm}|^2 \vec{\mathbf{x}}_0$, а для распространяющейся от π равен $-p_{\pm} |C_1^{\pm}|^2 \vec{\mathbf{x}}_0$. Аналогично, вектор Пойнтинга для волны в \mathbb{R}_{\pm}^3 , распространяющейся к плоскости π' равен $-p_{\pm} |C_1^{\pm}|^2 \vec{\mathbf{x}}_0$, а для распространяющейся от π' равен $p_{\pm} |C_0^{\pm}|^2 \vec{\mathbf{x}}_0$.

Общее решение уравнений (3) в \mathbb{R}_{\mp}^3 в векторно-матричной записи имеет вид:

$$\bar{\mathbf{u}}_{\mp}(x - x_0^{\mp}) = \mathbf{B}_{\mp} \mathbf{S}_{\mp}(x - x_0^{\mp}) \bar{\mathbf{C}}_{\mp}, \quad \bar{\mathbf{C}}_{\mp} = \begin{pmatrix} C_0^{\mp} \\ C_1^{\mp} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где далее будет принято $x_0^- = 0, x_0^+ = d$. При этом:

$$\mathbf{B}_{\mp} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ p_{\mp} & -p_{\mp} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_{\mp}(x - x_0^{\mp}) = \begin{pmatrix} e^{ikn_{\mp}(x-x_0^{\mp})} & 0 \\ 0 & e^{-ikn_{\mp}(x-x_0^{\mp})} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Величины, использованные в (5) и (6): λ_s^{\mp} – собственные значения и $\vec{\mathbf{I}}_s^{\mp}, (s = 0, 1)$ – собственные векторы матриц \mathbf{P}_{\mp} для полупространств \mathbb{R}_{\mp}^3 , имеют вид:

⁵ В физической и технической литературе для волны, распространяющейся к какой-либо плоскости, обычно применяется термин «падающая» (на эту плоскость) волна, а для волны, распространяющейся от плоскости – термин «отраженная» (от этой плоскости) волна.

$$\lambda_s^\mp = (-1)^s i k n_\mp, \quad \bar{\mathbf{I}}_s^\mp = \begin{pmatrix} 1 \\ (-1)^s p_\mp \end{pmatrix}, \quad (s = 0, 1),$$

где $n_\mp = (\varepsilon_\mp \mu_\mp)^{1/2}$, $p_\mp = \left(\frac{\varepsilon_\mp}{\mu_\mp}\right)^{1/2}$. Таким образом, в соответствии с (4) на плоскостях и имеют место равенства:

$$\mathbf{V}_- \bar{\mathbf{C}}_- = \bar{\mathbf{u}}_1(0), \quad \text{и} \quad \bar{\mathbf{u}}_N(d) = \mathbf{V}_+ \bar{\mathbf{C}}_+.$$

2. Основные свойства прямой задачи

Лемма. Матрицы \mathbf{V}_\mp обладают свойством:

$$\mathbf{V}_+^* \mathbf{J}_0 \mathbf{V}_+ = 2 p_+ \mathbf{J}_1, \quad \text{где} \quad \mathbf{J}_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{J}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} - \text{матрицы Паули.} \quad (7)$$

Доказательство леммы проводится перемножением нужных матриц. Для произвольного решения $\bar{\mathbf{u}}(x)$ (3) рассмотрим квадратичную форму:

$$(\bar{\mathbf{u}}^* \mathbf{J}_0 \bar{\mathbf{u}})(x) \equiv u(x) v^*(x) + u^*(x) v(x) \equiv 2 \operatorname{Re} [u(x) v^*(x)]. \quad (8)$$

Лемма (основная). Для произвольного решения $\bar{\mathbf{u}}(x)$ системы уравнений (3) на всяком интервале непрерывности её коэффициентов $\Delta_j, j = 1, \dots, N$ квадратичная форма (8) сохраняет постоянное значение:

$$(\bar{\mathbf{u}}^* \mathbf{J}_0 \bar{\mathbf{u}})(x) \equiv \text{const}, \quad \text{где} \quad \mathbf{J}_0 - \text{матрица Паули.} \quad (9)$$

Доказательство. Производная от квадратичной формы (8) с учётом уравнений (3) тождественно равна нулю на всяком интервале непрерывности Δ_j коэффициентов системы уравнений (3) в силу тождества: $\mathbf{P}^*(x) \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_0 \mathbf{P}(x) \equiv 0$.

3. Амплитудная параметризация прямой задачи

Для решения прямой задачи используем представление решения (3) с начальным условием $\bar{\mathbf{u}}_j(a_j) = \bar{\mathbf{u}}_j^0$ на всяком интервале $\Delta_j, j = 1, 2, \dots, N$:

$$\bar{\mathbf{u}}_j(x) = \mathbf{M}_j(x) \bar{\mathbf{C}}_j, \quad (10)$$

где $\mathbf{M}_j(x) = \begin{pmatrix} m_{00}(x) & m_{01}(x) \\ m_{10}(x) & m_{11}(x) \end{pmatrix}$ – фундаментальная матрица (3), столбцы которой $\bar{\mathbf{m}}_0$ и $\bar{\mathbf{m}}_1$ образуют фундаментальную систему решений (3) на Δ_j ; $\bar{\mathbf{C}}_j = \begin{pmatrix} C_0^{(j)} \\ C_1^{(j)} \end{pmatrix}$ – постоянный на $\Delta_j, j = 1, 2, \dots, N$ вектор коэффициентов – комплексных амплитуд «волн» $\bar{\mathbf{m}}_0$ и $\bar{\mathbf{m}}_1$.

Чтобы получить представление (10), достаточно решить матричное дифференциальное уравнение:

$$\mathbf{M}_j' = \mathbf{P}_j(x) \mathbf{M}_j(x) \quad (11)$$

с начальным условием:

$$\mathbf{M}_j(a_j) = \mathbf{M}_j^0, \quad \det(\mathbf{M}_j^0) \neq 0. \quad (12)$$

Далее будем рассматривать два разных представления фундаментальных матриц $\mathbf{M}_j(x)$ в (11), $\Delta_j, j = 1, 2, \dots, N$, отвечающих разным начальным условиям (12). Во-первых, будем говорить про «тригонометрическое» представление (**t**-представление)⁶, когда

$$\mathbf{M}_j(a_j) = \mathbf{I}, \quad \text{где } \mathbf{I} \text{ – единичная матрица,}$$

и, во-вторых, про «экспоненциальное» представление (**e**-представление), когда

$$\mathbf{M}_j(a_j) = \mathbf{B}_j, \quad \text{где } \mathbf{B}_j = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ p_j(a_j) & -p_j(a_j) \end{pmatrix}, \quad (13)$$

а $p_j(a_j)$ – величина импеданса в правом конце $\Delta_j, j = 1, 2, \dots, N$.

В силу тождества (9) и нужного начального условия (12) на интервале Δ_j :

$$\begin{aligned} ((\mathbf{M}^{(t)})^* \mathbf{J}_0 \mathbf{M}^{(t)})(x) &\equiv \mathbf{J}_0, \quad \text{где } \mathbf{J}_0 \text{ – матрица Паули в t – представлении,} \\ ((\mathbf{M}^{(e)})^* \mathbf{J}_0 \mathbf{M}^{(e)})(x) &\equiv 2p(a_j) \mathbf{J}_1, \quad \text{где } \mathbf{J}_1 \text{ – матрица Паули в e – представлении.} \end{aligned} \quad (14)$$

Из этих тождеств следует невырожденность матриц $\mathbf{M}_j^{(e)}(x), \mathbf{M}_j^{(t)}(x)$ для всякого x из $\Delta_j, j = 1, 2, \dots, N$, а также выражения для постоянных векторов $\vec{\mathbf{C}}_j$:

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{C}}_j^{(t)} &= \vec{\mathbf{u}}_j^{(0)}, \quad \text{в t – представлении,} \\ \vec{\mathbf{C}}_j^{(e)} &= \mathbf{B}_j^{-1} \vec{\mathbf{u}}_j^{(0)} \text{ – в e – представлении.} \end{aligned} \quad (15)$$

Представления (14) аналогичны представлению (7) для всякого x из Δ_j .

Используя первое из тождеств (12) и непрерывность электромагнитного поля в каждой точке разрыва коэффициентов уравнений (3), получаем **основное** энергетическое тождество, показывающее сохранение **направления** и **величины** потока энергии электромагнитного поля слева от СДС $[0, d]$ и справа от неё:

$$p_- (|C_0^-|^2 - |C_1^-|^2) \equiv p_+ (|C_0^+|^2 - |C_1^+|^2). \quad (16)$$

Последнее тождество показывает, что решение прямой задачи для \mathbb{R}^3 зависит от **двух произвольных постоянных**, в качестве которых можно взять $\vec{\mathbf{C}}_-$ или $\vec{\mathbf{C}}_+$.

При интерпретации решения прямой задачи, как задачи о распространении плоской электромагнитной волны через слоистую систему \mathbb{R}^3 **слева направо**, удобно выбрать произвольные постоянные в виде:

$$C_0^+ = 1, \quad C_1^+ = 0, \quad (17)$$

⁶ Фундаментальная матрица для t-представления была названа Абеле [5, с. 85] **характеристической** матрицей j -го слоя.

где второе условие – отсутствие отражения на $+\infty$, а первое – нормировка «по прохождению» волны, прошедшей через СДС $[0, d]$ с кусочно-непрерывными параметрами.

С учётом указанного выбора свободных параметров тождество (16) примет вид:

$$|C_0^-|^2 - |C_1^-|^2 \equiv \theta, \quad \text{где } \theta = \frac{p_+}{p_-}, \quad (18)$$

из которого вытекает ряд важных следствий для рассматриваемых полей: $|C_0^-|^2 = |C_1^-|^2 + \theta \geq \theta$, т.е. оценка величины $|C_0^-|^2$ снизу: $|C_0^-|^2 \geq \theta > 0$, в силу которой для всех κ обязательна конечность энергетических коэффициентов отражения слева от СДС и пропускания справа от СДС с кусочно-непрерывными физическими параметрами:

$$R_-(\kappa) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{|C_1^-(\kappa)|^2}{|C_0^-(\kappa)|^2}, \quad T_+(\kappa) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\theta}{|C_0^-(\kappa)|^2}, \quad (19)$$

и, как следствие этого и (16), оказывается обоснованным тождество (2).

Подстановка решений (11) в условия непрерывности (4) приводит к основной системе уравнений [13–16] относительно амплитуд прямой и обратной волн $\vec{C}_j = \begin{pmatrix} C_0^{(j)} \\ C_1^{(j)} \end{pmatrix}$ в j -ом слое ($j = 0, 1, \dots, N+1$):

$$\mathbf{M}_j \vec{C}_j = \mathbf{M}_{j+1} \vec{C}_{j+1},$$

где $j = 0$ отвечает индексу «–», а $j = N + 1$ – индексу «+» в предыдущем тексте работы.

Определение. При распространении волны слева направо будем называть **профилирующими** функциями следующие функции⁷ от волнового числа κ : $F_0(\kappa) \stackrel{\text{def}}{=} |C_0^-(\kappa)|^2$ и $F_1(\kappa) \stackrel{\text{def}}{=} |C_1^-(\kappa)|^2$.

Тогда, в силу (16), будет справедливо тождество:

$$F_0(\kappa) - F_1(\kappa) = \theta, \quad \text{где } \theta = \frac{p_+}{p_-}, \quad R_-(\kappa) = \frac{F_1(\kappa)}{F_0(\kappa)}, \quad T_+(\kappa) = \frac{\theta}{F_0(\kappa)}.$$

Замечание. При интерпретации решения прямой задачи как задачи о распространении плоской электромагнитной волны через слоистую систему **справа налево** удобно выбрать произвольные постоянные в (13) в виде $C_0^- = 0$, $C_1^- = 1$, где первое условие означает отсутствие отражения на $-\infty$, а второе – нормировку «по прохождению» волны, прошедшей через кусочно-непрерывную СДС.

С учётом указанного выбора свободных параметров и изменения знаков тождество (16) примет вид:

$$|C_1^+|^2 - |C_0^+|^2 \equiv \theta^{-1}, \quad (20)$$

из которого, как и выше, вытекает ряд следствий для рассматриваемых полей: $|C_1^+|^2 = |C_0^+|^2 + \theta^{-1} \geq \theta^{-1}$, т.е. оценка величины $|C_1^+|^2$ снизу: $|C_1^+|^2 \geq \theta^{-1} > 0$, в силу которой для всех κ следует конечность энергетических коэффициентов отражения справа от СДС и

⁷ Эти функции, а также аналогичные им при распространении волны справа налево, являются функционалами от кусочно-непрерывных параметров СДС $[0, d]$.

пропускания слева от СДС с кусочно-непрерывными физическими параметрами:

$$R_+(\kappa) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{|C_0^+(\kappa)|^2}{|C_1^+(\kappa)|^2}, \quad T_-(\kappa) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\theta^{-1}}{|C_1^+(\kappa)|^2},$$

и, как следствие этих обозначений и (16), обосновано тождество (2), которое позволяет для **правильных** идеалов для коэффициентов отражения (пропускания) обосновать переход от стандартных постановок задач синтеза к их эффективным постановкам.

4. Обоснование перехода к эффективным постановкам задач синтеза

Лемма. Если **идеальные** спектральные характеристики $\tilde{R}(\kappa)$ и $\tilde{T}(\kappa)$ связаны между собой соотношением $\tilde{R}(\kappa) + \tilde{T}(\kappa) \equiv 1$, то оба идеала могут быть **правильными** только одновременно.

Доказательство. В силу (17) имеет место представление: $\tilde{T}(\kappa) \equiv 1 - \tilde{R}(\kappa)$.

Покажем, что из правильности идеала $\tilde{R}(\kappa)$ вытекает правильность $\tilde{T}(\kappa)$. Если последовательность коэффициентов отражения различных СДС $R^{(n)}(\kappa)$ равномерно на заданном интервале $[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$ сходится к заданному идеалу $\tilde{R}(\kappa)$ то в силу тождества (2) последовательность коэффициентов пропускания тех же СДС $T^{(n)}(\kappa) \stackrel{\text{def}}{=} 1 - R^{(n)}(\kappa)$ будет равномерно на интервале $[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$ сходиться к идеалу $\tilde{T}(\kappa) = 1 - \tilde{R}(\kappa)$. Аналогично доказывается, что из правильности идеала $\tilde{T}(\kappa)$ вытекает правильность идеала $\tilde{R}(\kappa)$.

Если же какой-то из идеалов $\tilde{R}(\kappa)$ или $\tilde{T}(\kappa)$ не является правильным, то и другой идеал не будет правильным.

Лемма. Если хотя бы один из идеалов $\tilde{R}_-(\kappa)$ или $\tilde{T}_+(\kappa)$ имеет представление:

$$\tilde{R}_-(\kappa) = \frac{\tilde{F}_1(\kappa)}{\tilde{F}_0(\kappa)} \left[\tilde{T}_+(\kappa) = \frac{\theta}{\tilde{F}_0(\kappa)} \right],$$

где $\tilde{F}_1(\kappa)$ – идеал для профилирующей функции $F_1(\kappa)$, а $\tilde{F}_0(\kappa)$ – идеал для профилирующей функции $F_0(\kappa)$, то правильность любого из идеалов $\tilde{R}_-(\kappa)$, $\tilde{T}_+(\kappa)$, $\tilde{F}_0(\kappa)$ или $\tilde{F}_1(\kappa)$ влечёт правильность остальных идеалов из перечисленных.

Доказательство. Прежде всего, ввиду тождества (15) из правильности идеала $\tilde{F}_1(\kappa)$ очевидно, вытекает правильность идеала $\tilde{F}_0(\kappa)$ и наоборот. Покажем, что из правильности идеала $\tilde{T}_+(\kappa)$ вытекает правильность $\tilde{F}_0(\kappa)$.

Если $T_+^{(n)}(\kappa)$ – последовательность коэффициентов пропускания различных СДС, равномерно на заданном интервале $[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$ сходящаяся к заданному идеалу $\tilde{T}_+(\kappa)$, то в силу представления (16) для коэффициента пропускания $T_+(\kappa)$ (19), последовательность профилирующих функций тех же СДС $F_0^{(n)}(\kappa) \stackrel{\text{def}}{=} |C_0^-(\kappa)|_{(n)}^2$ будет равномерно сходиться к идеалу $\tilde{F}_0(\kappa)$ на интервале $[\kappa_1, \kappa_2]$. Идея доказательства остальной части утверждения леммы – та же самая.

Приведём теперь формулы пересчёта идеала для стандартного коэффициента отражения $\tilde{R}_-(\kappa)$ в идеалы для профилирующих функций $\tilde{F}_1(\kappa)$ и $\tilde{F}_0(\kappa)$.

$$\tilde{R}_-(\kappa) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\tilde{F}_1(\kappa)}{\tilde{F}_0(\kappa)}, \quad \tilde{F}_0(\kappa) - \tilde{F}_1(\kappa) = \theta. \quad (21)$$

Из первой формулы следует: $\tilde{F}_1(\kappa) = \tilde{R}_-(\kappa) \tilde{F}_0(\kappa)$ и, подставляя это соотношение во вторую формулу, получим: $\tilde{F}_0(\kappa) = \frac{\theta}{1 - \tilde{R}_-(\kappa)}$ и $\tilde{F}_1(\kappa) = \frac{\tilde{R}_-(\kappa)}{1 - \tilde{R}_-(\kappa)} \theta$.

В приведённых формулах для оценки точности замены на интервале $[\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2]$ исходного неравенства $|R_-(\kappa) - \tilde{R}_-(\kappa)| < \varepsilon$ на $|F_1(\kappa) - \tilde{F}_1(\kappa)| < \delta(\varepsilon)$, нужно использовать модуль непрерывности положительной выпуклой во всём интервале её определения $(0, +\infty)$ функции $y = \frac{x}{x + \theta}$, производная которой в указанном интервале монотонно спадает от $y'(0) = \frac{1}{\theta}$ до нуля, с заменой её аргумента x на $F_1(\kappa)$, а её значений y – на $R(\kappa)$.

5. Формальная запись постановки задачи синтеза СДФ

Задача оптимального синтеза СДФ в смысле Чебышёва (1) для энергетического коэффициента отражения в силу тождества (2) полностью эквивалентна такой же задаче для энергетического коэффициента пропускания, если $\tilde{T}(\kappa) = 1 - \tilde{R}(\kappa)$.

Аналогично в силу (13) эквивалентны между собой задачи оптимального синтеза для каждой из профилирующих функций $F_0(\kappa), F_1(\kappa)$.

Тождество

$$|R_-(\kappa) - \tilde{R}_-(\kappa)| \equiv |T_+(\kappa) - \tilde{T}_+(\kappa)| \equiv \frac{\theta}{F_0(\kappa)\tilde{F}_0(\kappa)} |F_0(\kappa) - \tilde{F}_0(\kappa)| \quad (22)$$

позволяет дать простую двухстороннюю оценку для функционала задачи (1) через аналогичные функционалы для профилирующих функций:

$$\frac{\theta}{\alpha\beta} |F_0(\kappa) - \tilde{F}_0(\kappa)| \leq |R_-(\kappa) - \tilde{R}_-(\kappa)| \leq \frac{1}{\theta} |F_0(\kappa) - \tilde{F}_0(\kappa)|, \quad (23)$$

где $\theta \leq F_0(\kappa) \leq \alpha$, $\theta \leq \tilde{F}_0(\kappa) \leq \beta$, что позволяет говорить об эквивалентности (1) и существенно более простой задачи:

$$\max_{\mathcal{K}_1 \leq \kappa \leq \mathcal{K}_2} |F_0(\kappa, \vec{p}, \vec{v}) - \tilde{F}_0(\kappa)| \rightarrow \min_{\vec{p}, \vec{v}}$$

Аналогичный переход от (22) к аналогу (23):

$$\frac{\theta}{\alpha} \nu(\kappa) |F_0(\kappa) - \tilde{F}_0(\kappa)| \leq |R(\kappa) - \tilde{R}(\kappa)| \leq \nu(\kappa) |F_0(\kappa) - \tilde{F}_0(\kappa)|,$$

где $\nu(\kappa) = \frac{1}{\tilde{F}_0(\kappa)}$ – фиксированная весовая функция для равномерной метрики, позволяет говорить об асимптотической (при $n \rightarrow +\infty$) эквивалентности задачи (1) аналогичной «весовой» задаче для профилирующей функции $\tilde{F}_0(\kappa)$:

$$\max_{\mathcal{K}_1 \leq \kappa \leq \mathcal{K}_2} \nu(\kappa) |F_0(\kappa, \vec{p}, \vec{v}) - \tilde{F}_0(\kappa)| \rightarrow \min_{\vec{p}, \vec{v}}$$

Выводы

1. Проведён анализ прямой задачи о распространении плоских электромагнитных волн в слоистой среде в \mathbb{R}^3 , являющийся единственно надёжной основой для постановки и решения всех возможных оптимизационных и обратных задач, связанных с этой тематикой. Получены основные для всей теории слоистых сред тождества (18) и (20).

2. Получены явные формулы пересчёта для «идеалов» энергетических коэффициентов отражения и пропускания в «идеалы» для профилирующих функций.

3. Обоснована эквивалентность традиционных постановок задач синтеза слоистых диэлектрических фильтров по их «желаемым» спектральным характеристикам типа энергетических коэффициентов отражения и пропускания, названных в работе «идеалами» для соответствующих спектральных характеристик, значительно более простым по структуре функционалам – задачам синтеза по «идеалу» для профилирующих функций.

Литература:

1. Macleod H.A. Thin-Film Optical Filters. Fifth edition. CRC Press, 2018. 696 p. ISBN: 978-1-13-819824-1
2. Seshan K., Schepis D. Handbook of Thin Film Deposition. Fourth edition. Elsevier, 2018. 470 p. ISBN: 978-0-12-812311-9.
3. Baumeister P.W. Optical coating technology. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2004, 840 p. ISBN 978-0-8194-5313-6.
4. Современная теория фильтров и их проектирование, под ред. Г. Темеша и С. Митра: пер. с англ. М.: Мир, 1977. 560 с.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. Изд. 2-е. М.: Наука, 1973. 722 с.
6. Кард П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных плёнок. Таллин: Валгус, 1971. 233 с.
7. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырёхполосников и восьмиполосников на СВЧ. М.: Связь, 1971. 388 с.
8. Furman Sh.A. and Tikhonravov A.V. Basics of optics of multilayer systems. Editions Frontiers. Gif-sur Yvette, 1992. 242 p.
9. Винер Н. Интеграл Фурье и некоторые его приложения: пер. с англ. М.: Физматгиз, 1963. 256 с.
10. Левитан Б.М. Почти-периодические функции. М.: ГИТТЛ, 1953. 396 с.
11. Akshaya and Nagendra N.N. Thin Film Optical Filters: Bandpass Characteristics of VIBGYOR Wavelengths. In: 2018 4th International Conference for Convergence in Technology (I2CT). Mangalore, India, 2018. 4 p.
12. Аткинсон Ф. Дискретные и непрерывные граничные задачи: пер. с англ. М.: Мир, 1968. 750 с.
13. Худак Ю.И. О задаче просветления в классической постановке. Доклады РАН. 2013;448(5):520–523.
14. Худак Ю.И. Составные электромагнитные волны в магнитоэлектрических системах. Доклады РАН. 2015;467(2):149–153.
<https://doi.org/10.7868/S0869565216080053>
15. Худак Ю.И., Ахмедов И.А., Музылев Н.В., Парфенов Д.В. Структура пространства параметров двухслойных магнитоэлектрических систем. Электромагнитные волны и электронные системы. 2016;2:24–32.
16. Худак Ю.И., Ахмедов И.А., Музылев Н.В., Парфенов Д.В. О решении задачи просветления Чебышева для двухслойных магнитоэлектрических систем. Нелинейный мир. 2016;14(2):38–48.

References:

1. Macleod H.A. Thin-Film Optical Filters. Fifth edition. CRC Press; 2018. 696 p. ISBN: 978-1-13-819824-1
2. Seshan K., Schepis D. Handbook of Thin Film Deposition. Fourth edition. Elsevier; 2018. 470 p. ISBN: 978-0-12-812311-9.
3. Baumeister P.W. Optical coating technology. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2004, 840 p. ISBN 978-0-8194-5313-6.
4. *Sovremennaya teoriya fil'trov i ikh proektirovanie; pod red. G. Temesha i S. Mitra* (Modern filter theory and design; (Eds.) G. Temesh and S. Mitra). Moscow: Mir; 1977. 560 p. (in Russ.).
[Temes G.C., Mitra S. (Eds.). Modern Filter Theory and Design. John Wiley & Sons; 1973. 566 p.]
5. *Born M., Wolf E. Osnovy optiki* (Born M., Wolf E. Fundamentals of Optics). Moscow: Nauka; 1973. 722 p. (in Russ.).
[Born M., Wolf E. Principles of optics. Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 7th ed. Cambridge University Press; 2005, 952 p.]
6. Kard P.G. *Analiz i sintez mnogosloynnykh interferentsionnykh plenok* (Analysis and Synthesis of Multilayered Interference Films). Tallinn: Valgus; 1971. 233 p. (in Russ.).
7. Fel'dshtein A.L., Yavich L.R. *Sintez chetyrekhpolysnikov i vos'mipolysnikov na SVCh* (SHF Four- and Eight-pole Terminal Network Synthesis). Moscow: Svyaz'; 1971. 388 p. (in Russ.).

Использование профилирующих функций для постановки задач синтеза слоистых диэлектрических фильтров

8. Furman Sh.A. and Tikhonravov A.V. Basics of optics of multilayer systems. Editions Frontiers. Gif-sur Yvette, 1992. 242 p.
9. Viner N. *Integral Fur'e i nekotorye ego prilozheniya* (Fourier Integral and Some of Its Applications). Moscow: Fizmatgiz; 1963. 256 p. (in Russ.).
[Wiener N. The Fourier Integral and Certain of its Applications. NY: Dover publ.; 1933. 201 p.]
10. Levitan B.M. *Pochti-periodicheskie funktsii* (Almost Periodic Functions). Moscow: GITTL Publ.; 1953. 396 p. (in Russ.).
11. Akshaya and Nagendra N.N. Thin Film Optical Filters: Bandpass Characteristics of VIBGYOR Wavelengths. In: 2018 4th International Conference for Convergence in Technology (I2CT). Mangalore, India, 2018. 4 p.
12. Atkinson F. *Diskretnye i nepreryvnye granichnye zadachi* (Discrete and Continuous Boundary Problems). Moscow: Mir; 1968. 750 p. (in Russ.).
[Atkinson F.V. Discrete and Continuous Boundary Problems. NY: Academic Press; 1964. 770 p.]
13. Khudak Yu.I. Antireflective Coating in Classic Problem Definition. *Doklady RAN*. 2013;448(5): 520–523 (in Russ.).
14. Khudak Yu.I. Composite Electromagnetic Waves in Magnetodielectric Systems. *Doklady RAN*. 2015;467(2):149–153 (in Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S0869565216080053>
15. Khudak Yu.I., Akhmedov I.A., Muzylev N.V., Parfenov D.V. The Structure of the Parameters Area of Two-layer Magnetodielectric Systems. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2016;2:24–32 (in Russ.).
16. Khudak Yu.I., Akhmedov I.A., Muzylev N.V., Parfenov D.V. The Solution on the Problem of Anti-Reflective coating for Two-layered Magnetodielectric Systems in the sense of Chebyshev. *Nelineyniy mir = Nonlinear World*. 2016;14(2):38–48 (in Russ.).

Об авторах:

Худак Юрий Иосифович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Парфенов Денис Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Музылев Николай Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Хачлаев Тимур Султанович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Yury I. Hudak, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Denis V. Parfenov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Nikolay V. Muzylev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Timur S. Khachlaev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 02.04.2020; получена после доработки: 12.07.2020; принята к опубликованию: 20.07.2020.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578 от 14 декабря 2018 г.

Дата опубликования 30 сентября 2020 г.

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

<http://rtj-mirea.ru>

