

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 наноэлектроника.

Физика конденсированного состояния

Аналитическое приборостроение и технологии

Математическое моделирование

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных
предприятий и производств*

Мировоззренческие основы технологии и общества



Российский
технологический
университет



ISSN 2500-316X

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, № 1**

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, no. 1**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1>

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



**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2020, том 8, № 1**

Дата опубликования 31 января 2020 г.

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, no. 1**

Publication date January, 31 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., хабилитированный 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 Наталья 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., 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. of 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. of Sci. (Chemistry), Professor, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID 6602442002, buslaeva@mirea.ru.
Alexander A. Bush	Dr. of 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. of 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. of 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. of 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. of 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. of Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern University (IMBL), Rostov-on-Don, Russian Federation, Scopus Author ID 56638328000.
Elena D. Mishina	Dr. of 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. of 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. of 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. of 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. of 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. of 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. of 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. of 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. of 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

Зуев А.С., Зуева А.Н., Леонов Д.А.

Технологии дополненной реальности как новый источник конкурентных преимуществ продукции машиностроения 9

Петушков Г.В.

Оценка и прогнозирование надежности для высоконадежных программно-аппаратных систем на примере центров обработки данных 21

Томашевская В.С., Яковлев Д.А.

Условие аддитивности информационно-справочного киоска на основе времени загрузки страниц 27

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Третьяков В.А., Куликов Г.В., Лукьянец Ю.Ф.

Принципы построения больших территориально распределенных автоматизированных систем 34

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Каданцев В.Н., Гольцов А.Н., Кондаков М.А.

Динамика электросолитона в термализованной молекулярной цепи 43

Овчаренко С.В., Гапонов М.С., Ильин Н.А., Логунов М.В., Anhua Wu, Мишина Е.Д.

Лазерно-индуцированная спиновая динамика в пленке железо-иттриевого граната, легированного ионами Si 58

Фещенко В.С., Зяблюк К.Н., Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Киселев Д.А.

Особенности получения пьезоэлектрических тонких пленок методом плазменного напыления из порошкообразного AlN 67

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Битюков В.К., Михневич Н.Г., Петров В.А.

Моделирование пульсаций отрицательного напряжения
в системе накачки заряда и на выходе микросхемы двухполярного
DC–DC преобразователя LM27762 **80**

***Геча В.Я., Жилнев М.Ю., Федоров В.Б., Хрычев Д.А., Худак Ю.И.,
Шатина А.В.***

Поле скоростей движения точек изображения при орбитальной съемке
поверхности планеты **97**

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЩЕСТВА

Редькова И.С., Чернова Н.И., Катахова Н.В.

Академическая коммуникация в дискурсивных практиках
университетов Германии: гендерный аспект **110**

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS. COMPUTER SCIENCES. ISSUES OF INFORMATION SECURITY

- Zuev A.S., Zueva A.N., Leonov D.A.**
Augmented reality technology as a new source of competitive strengths
in engineering products 9
- Petushkov G.V.**
Evaluation and reliability prediction for highly reliable software and hardware
systems: The case of data processing centers 21
- Tomashevskaya V.S., Yakovlev D.A.**
Additivity condition for reference kiosk based on page load time 27

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

- Tretyakov V.A., Kulikov G.V., Lukyanets Y.F.**
Principles of creation of the big territorially distributed automated systems 34

MICRO- AND NANOELECTRONICS. CONDENSED MATTER PHYSICS

- Kadantsev V.N., Goltsov A.N., Kondakov M.A.**
Electrosoliton dynamics in a thermalized molecular chain 43
- Ovcharenko S.V., Gaponov M.S., Ilyin N.A., Logunov M.V., Anhua Wu,
Mishina E.D.**
Laser-induced spin dynamics in the iron-yttrium garnet film doped
with Si ions 58
- Feshchenko V.S., Zyablyuk K.N., Senokosov E.A., Chukita V.I., Kisilev D.A.**
Features of the receiving of piezoelectric thin films by plasma spraying
of powdery AlN 67

CONTENTS

MATHEMATIC MODELING

Bityukov V.K., Mikhnevich N.G., Petrov V.A.

Simulation of negative voltage ripples at the output of charge pump system and the microcircuit output of bipolar LM27762 DC–DC converter **80**

Gecha V.Ya., Zhilenev M.Yu., Fyodorov V.B., Khrychev D.A., Hudak Y.I., Shatina A.V.

Velocity field of image points in satellite imagery of planet's surface **97**

PHILOSOPHICAL FOUNDATIONS OF TECHNOLOGY AND SOCIETY

Redkova I.S., Chernova N.I., Katakhova N.V.

German academic communication in discourse practices: gender policy **110**

Технологии дополненной реальности как новый источник конкурентных преимуществ продукции машиностроения

**А.С. Зуев[@],
А.Н. Зуева,
Д.А. Леонов**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

Анализируются возможности формирования дополнительных конкурентных преимуществ продукции машиностроения, открывающихся в результате применения технологий дополненной реальности для интерактивного информационного обеспечения и информационной поддержки задач сборки, настройки, обслуживания, эксплуатации и ремонта как самих изделий, так и задействованных в перечисленных процессах единиц оборудования и компонентов производственных систем. Приводится краткий обзор имеющихся на рынке устройств дополненной реальности, которые могут рассматриваться в качестве прототипов программно-аппаратных комплексов, обеспечивающих информационную поддержку технического персонала в процессе выполнения его трудовых функций. Рассматриваются перспективы внедрения в этапы жизненного цикла, в процессы производства, обслуживания и эксплуатации продукции и оборудования машиностроения, специализированных приложений, обеспечивающих получение оператором и визуализацию необходимого ему вспомогательного контента в режиме реального времени с применением устройств дополненной реальности. Анализ требующихся функциональных возможностей и сценариев применения данных приложений обосновывает целесообразность их реализации не в виде обособленных программных продуктов, ориентированных на отдельные единицы продукции и оборудования, а в контексте единого информационного сервиса поддержки производственного процесса, фактически позволяющего сформировать новый инструмент производственной инженерии, соответствующий концепции четвертой технологической революции, – справочно-информационные системы дополненной реальности, концепция применения которых фактически универсальна для всех отраслей и потребительского сектора национальной экономики. Выполняется анализ основных ограничений широкого применения справочно-информационных систем, основанных на технологиях дополненной реальности, и обосновывается значительное ослабление их влияния в среднесрочной перспективе, обусловленное, в том числе, возможностями реализации новых архитектурных решений, обеспечиваемых развитием технологий беспроводной передачи

информации (стандарт 5G) и стандартов сжатия и передачи видеoinформации (MPEG-I). На основании анализа изложенного материала обосновываются целесообразность внедрения технологий дополненной реальности в этапы жизненного цикла продукции и обслуживания машиностроения, новые возможности формирования их дополнительных конкурентных преимуществ, а также актуальность вопросов обеспечения информационной безопасности соответствующих справочно-информационных систем.

Ключевые слова: машиностроение, конкурентоспособность, дополненная реальность, информационное обеспечение, информационная поддержка.

Для цитирования: Зуев А.С., Зуева А.Н., Леонов Д.А. Технологии дополненной реальности как новый источник конкурентных преимуществ продукции машиностроения. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):9-20. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-9-20>

Augmented reality technology as a new source of competitive strengths in engineering products

**Andrey S. Zuev[@],
Anna N. Zueva,
Dmitriy A. Leonov**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

^{@Corresponding author, e-mail: zuev_a@mirea.ru}

The article analyzes opportunities for obtaining additional competitive strengths in engineering products due to the use of augmented reality technology for interactive information provision and support in terms of assembly, operation and maintenance for the products themselves as well as machinery units and production system components employed in the processes listed. The article also provides a short overview of equipment available on the market that can be viewed as a prototype for hardware and software complexes that provide informational support for technical personnel while the latter performs its job functions. It covers prospects of implementing informational systems that provide the operator with visualized supporting content online through the use of AR technology into the life cycle stages, processes of production, maintenance and operation of products and machinery equipment, as well as specialized applications. It also analyzes the necessary functional options and scenarios of using these applications, thus explaining the point of implementing them not as separate software products oriented on separate product units and equipment, but in the context of a unified information service of support for the production process, basically allowing the formation of a new production engineering instrument that goes along with the concept of the fourth technological revolution - reference-informational AR systems, the concept of use for which is universal to all industries and the consumer sector of the national economy. It analyzes the main limitations of the wide use of informational systems based on AR technology and gives grounds for its lessening midterm influence, based on, including but not limited to, the options for implementing new architectural solutions that are supported by the developing wireless data transfer technology (5G standard) as well as video compressing and transfer standards (MPEG-I). Based on the analysis of materials provided, rationale for implementing AR technology into the stages of machinery production and equipment life cycle is given, as well as new opportunities for obtaining their additional competitive strengths and relevance of information security of the corresponding reference-informational systems based on AR technology.

Keywords: machinery, competitiveness, augmented reality, information provision, information support.

For citation: Zuev A.S., Zueva A.N., Leonov D.A. Augmented reality technology as a new source of competitive strengths in engineering products. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):9-20 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-9-20>

Введение

Конкуренция является одним из основных механизмов рыночной экономики, обеспечивающих состязательность участников рынка за внимание покупателей и возможности реализации продукции на наиболее выгодных условиях, за захват и удержание определенной доли рынка, за получение прибыли и доступа к ресурсам [1]. Она побуждает товаропроизводителя совершенствовать продукцию, повышать ее качество и развивать потребительские свойства. Конкурентоспособность продукции – это ее способность быть привлекательной по сравнению с аналогами благодаря лучшему соответствию характеристик потребительским оценкам и требованиям рынка. При этом появление и развитие новых технологий открывает дополнительные возможности ведения конкурентной борьбы и обеспечения конкурентоспособности продукции. В результате для всех отраслей национальной экономики актуальна задача анализа возможностей применения и будущего влияния новых технологий для обеспечения конкурентоспособности продукции.

В настоящей статье анализируются возможности применения технологий дополненной реальности [2] для формирования дополнительных конкурентных преимуществ продукции машиностроения – передовой комплексной наукоемкой отрасли, объективно характеризующей уровень технологического развития государства и обеспечивающей формирование высокой добавленной стоимости широкого спектра продукции (изделий) отраслевых подгрупп [3, 4].

Становление пятого технологического уклада и переход к шестому [5] в условиях глобальной конкуренции требуют от предприятий машиностроения применения более эффективных подходов к организации процессов сборки, настройки, обслуживания, эксплуатации и ремонта как самих изделий, так и задействованных в перечисленных процессах единиц оборудования и компонентов производственных систем. В разработке, освоении и внедрении данных новых подходов заключается одно из направлений подготовки к четвертой промышленной революции [6].

В качестве источника дополнительных конкурентных преимуществ продукции машиностроения авторами рассматривается контент дополненной реальности – новый способ информационного обеспечения, позволяющий реализовать интерактивную информационную поддержку этапов жизненного цикла изделий, оборудования и компонентов производственных систем.

Дополнительными обеспечиваемыми конкурентными преимуществами, приводящими к минимизации себестоимости продукции, предполагаются снижение требований к уровню квалификации и численности технического персонала, а также сокращение затрат времени на настройку, обслуживание и ремонт как самой продукции машиностроения, так и задействованных в процессе ее изготовления единиц оборудования и компонентов производственных систем.

В качестве механизма, реализующего информационное обеспечение технического персонала, рассматриваются специализированные справочно-информационные системы, обеспечивающие интерактивное получение требуемого оператору вспомогательного

контента дополненной реальности с применением специальных оконечных устройств и в соответствии с текущими выполняемыми им операциями над конкретным объектом (изделием, инструментом, единицей оборудования и т.п.).

Анализ современного уровня и перспектив развития характеристик программно-аппаратных комплексов, требующихся для справочно-информационных систем, основанных на технологиях дополненной реальности, обосновывает возможности их широкого внедрения в среднесрочной перспективе.

Обзор технологий дополненной реальности

Технологии дополненной реальности относятся к сфере человеко-компьютерного взаимодействия [7] – полидисциплинарного направления исследований, охватывающего изучение, развитие и разработку методов взаимодействия человека и программно-аппаратных систем. Современные концепции связи реальности (окружающего мира) и виртуальности (смоделированного с помощью компьютерных технологий трехмерного окружения) основаны на работах П. Милгрэма, Р. Азума и С. Манна.

В 1994 году Пол Милгрэм презентовал континуум реальности-виртуальности (reality-virtuality continuum) [8], в котором определяет дополненную реальность как результат дополнения окружающего мира виртуальными объектами. Рональд Азума дополнил данное определение по результатам исследований в 1997 и 2001 годах и определил дополненную реальность как систему с тремя характеристиками [9, 10]: 1) комбинация реальности и виртуальности; 2) интерактивность и функционирование в реальном времени; 3) визуализация в трехмерном пространстве. В 2002 году Стив Манн добавил к континууму Милгрэма вторую ось для отражения разных методов изменения окружения. Предложенный им двумерный континуум дал дополнительно понятия опосредованной реальности и опосредованной виртуальности [11]. П. Милгрэм, Р. Азума и С. Манн создали теоретический базис для технологий комбинирования реальности и виртуальности. Однако их исследования проводились в начале 2000-х гг., и с тех пор рынок информационных технологий не только адаптировал такие понятия как дополненная и смешанная реальность, но и значительно расширился в данном направлении. Возникли новые технологии, программные и аппаратные средства, делающие разработку решений в области дополненной реальности доступной как для юридических, так и для физических лиц. В результате, выполненные 15 лет назад теоретические изыскания и университетские прототипы воплотились в новый сегмент рынка информационных технологий [12], полностью соответствующий концепции цифровой экономики [13]. На данный момент рынок устройств дополненной реальности представлен в основном устройствами Alphabet, Microsoft и Epson.

Alphabet Inc. – холдинг, в который в 2015 г. была преобразована *Google Inc.* На рынке были представлены очки дополненной реальности GoogleGlass – первая версия (для разработчиков) была выпущена в 2013 году, на данный момент для некоммерческих клиентов доступна версия GoogleGlass 3.0.

Корпорация *Microsoft* в 2012 году анонсировала очки смешанной реальности HoloLens, которые стали доступны на рынке в 2016 году. Корпорация активно поддерживает производителей носимых гарнитур, интегрирующих свою продукцию в инфраструктуру WindowsMixedReality, например HP, *Lenovo*, *Acer*.

Корпорация *Epson* в области коммерческой дополненной реальности позиционирует Moverio Pro BT-2200 и BT-2000, а для частного потребителя - Moverio BT-350 и BT-35E, также можно отметить присутствующие на рынке устройства VUZIX (blade smart glasses) и ODG (R-7).

На рис. 1 в общем виде представлен универсальный подход к реализации технологий дополненной реальности посредством носимой гарнитуры:

- фронтальная камера формирует видеопоток, аналогичный полю зрения пользователя;
- в составе кадров видеопотока устройство выявляет заранее внесенные в базу данных маркеры – графические элементы, соответствующие визуальному восприятию конкретных объектов окружающей обстановки;
- формируется видеопоток, объединяющий поле зрения пользователя и контент дополненной реальности, соответствующий находящимся в нем объектам;
- полученный видеопоток проецируется на экран устройства и заменяет/дополняет собой поле зрения пользователя.

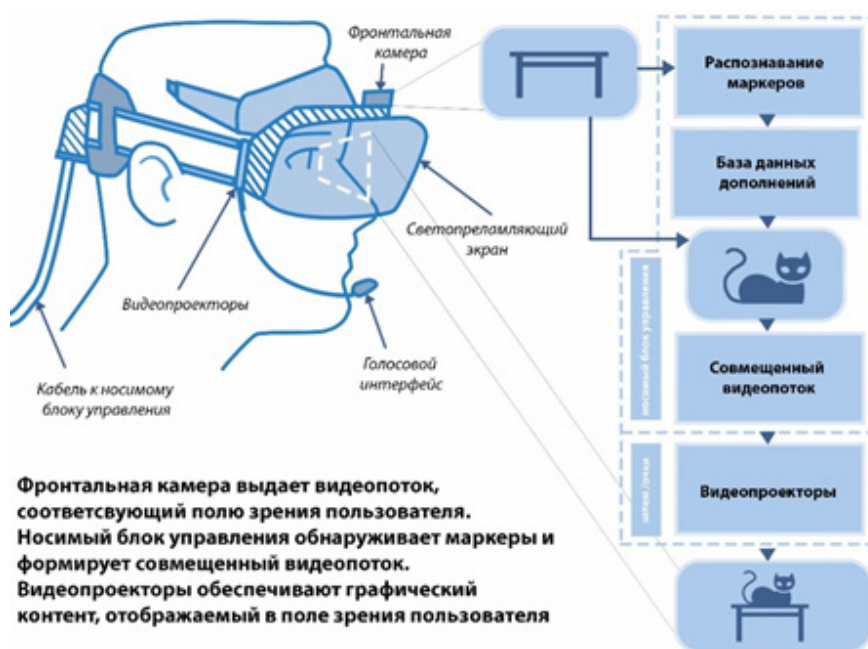


Рис. 1. Иллюстрация принципов реализации дополненной реальности.

Контент дополненной реальности для продукции и оборудования машиностроения

Рассмотрим возможности адаптации описанного выше подхода к реализации технологий дополненной реальности посредством носимой гарнитуры для интерактивного информационного обеспечения и информационной поддержки задач сборки, настройки, обслуживания, эксплуатации и ремонта как самих изделий машиностроения, так и задействованных в перечисленных процессах единиц оборудования и компонентов производственных систем. Для ассортиментных групп, а также конкретных единиц продукции и оборудования (объектов) требуется разработка специализированных приложений дополненной реальности, в которых:

- для каждого объекта определен состав выполняемых с ним задач (сборка, замена комплектующих, настройка, эксплуатация и т.п.);
- для каждой задачи сформирована последовательность выполняемых оператором операций (очередность монтажа комплектующих при сборке; порядок их демонтажа, установки и крепления при замене; последовательность ввода параметров при настройке; план выполнения действий при эксплуатации и т.д.);

- для каждой операции задан состав эталонных маркеров, соответствующих корректному визуальному образу задействованных в ней элементов объекта (например, требующийся вид креплений в месте установки комплектующего);
- при выполнении каждой операции анализируется соответствие текущего визуального образа элементов объекта заданному составу эталонных маркеров (например, определяется, установлены ли все элементы крепления комплектующего);
- непрерывный контроль наличия в поле зрения оператора корректного состава эталонных маркеров обеспечивает корректность каждой операции, четкая последовательность операций приводит к выполнению любой задачи, которую оператор может выбрать для конкретного объекта.

Реализация перечисленных выше функциональных возможностей не в рамках обособленных специализированных приложений дополненной реальности, ориентированных на отдельные единицы продукции и оборудования, а в контексте единого информационного сервиса поддержки производственного процесса фактически позволит сформировать новый инструмент производственной (промышленной) инженерии, соответствующий концепции четвертой технологической революции, – справочно-информационные системы дополненной реальности.

Пример применения технологии дополненной реальности для выполнения операций с продукцией и технологическим оборудованием машиностроения представлен на рис. 2: слева приведен доступный стороннему наблюдателю вид процесса работы оператора, а справа – доступный оператору видеопоток, объединяющий реальную окружающую обстановку и контент дополненной реальности, как привязанный к ее элементам посредством маркеров, так и несущий справочную текстовую информацию в соответствии с текущим выполняемым оператором действием.



Рис. 2. Пример применения технологий дополненной реальности в технологическом процессе машиностроения.

Контент дополненной реальности является новым источником повышения эффективности взаимодействия человека со сложными техническими объектами. В традиционном процессе такого взаимодействия не только существует возможность ошибки, способной нанести материальный ущерб, но и расходуется время оператора на принятие решений о последовательности выполняемых действий. Комбинируя возможности технологий дополненной реальности с содержанием хранилищ данных различных информационных систем, можно значительно повысить эффективность технического персонала – снизить требования к уровню его квалификации и численности, а также сократить затраты времени на выполнение любых видов работ.

Рост номенклатуры и технической сложности как изделий, так и оборудования, приводит к росту численности, повышению требований к квалификации и расширению специализации технического персонала как у производителей, так и у потребителей продукции машиностроения. Следствием этого является рост затрат на обучение и оплату труда персонала, обуславливающий увеличение себестоимости производства и эксплуатации изделий.

Новые возможности технологий дополненной реальности по визуализации информации и предоставлению инструкций в режиме реального времени позволяют решить проблему увеличения численности и расширения специализации технического персонала, усовершенствовать реализуемые бизнес-процессы и повлиять на конкурентоспособность изделий (продукции) машиностроения. В контексте применения технологий дополненной реальности задачи сборки, настройки, обслуживания, эксплуатации и ремонта конкретного объекта содержательно представляют собой одну задачу – организацию корректной последовательности оценки соответствия визуального вида элементов объекта заданному составу эталонных маркеров. Поэтому технологии дополненной реальности могут применяться на всех этапах жизненного цикла изделия и оборудования машиностроения, а для их эффективного внедрения в соответствующие процессы потребуется разработка специализированных справочно-информационных систем. Заметим также, что концепция применения рассматриваемых систем фактически будет универсальной – масштабируемой на другие отрасли (например, добывающую и обрабатывающую) и потребительский сектор (например, настройка и эксплуатация бытовой техники) национальной экономики.

Справочно-информационные системы дополненной реальности

На данный момент основными способами распространения справочной информации о продукции и оборудовании машиностроения являются поставка потребителю печатной документации или электронных носителей и размещение контента на сайте производителя или на вспомогательных информационных ресурсах. Недостатком при этом является ограниченность данных способов в части доступных механизмов доведения информации до потребителей. Визуализация справочной информации об объекте возможна только без интерактивной привязки к выполняемым с ним действиям и с использованием устройств, требующих переключения внимания оператора между ними и объектом (распечатки, планшеты, смартфоны, ноутбуки). Более того, перед началом и в процессе работы оператору требуется изучать, анализировать и запоминать справочную информацию, сверяться с ней, отвлекаясь от самого процесса. Основными недостатками обычных способов работы со справочной информацией являются отсутствие наглядности и интерактивной привязки к выполняемым действиям, необходимость постоянного переключения внимания и отсутствие возможности выполнять трудовые функции параллельно с изучением справочного материала. Соответственно, целью развития способов распространения и получения рассматриваемой справочной информации о продукции и оборудовании машиностроения может являться создание специализированных систем доведения до пользователей справочного контента, не имеющих указанных выше недостатков. Достижение данной цели фактически приведет к появлению нового вида справочно-информационных систем, основанных на технологиях дополненной реальности (справочно-информационных систем дополненной реальности). Данные системы будут иметь широкий спектр областей применения:

- обеспечение виртуального присутствия экспертов в месте проведения работ, приводящее к сокращению необходимого количества сотрудников и реализации нового уровня услуг технической поддержки;
- предоставление техникам, работающим с оборудованием «в полевых условиях», интерактивной связи с экспертными группами;
- проецирование чертежей и схем на реальные объекты для сравнения виртуальной модели и реального объекта в режиме реального времени;
- новые подходы к организации обучения и повышения квалификации сотрудников.

На рис. 3 представлен общий вид архитектуры справочно-информационной системы дополненной реальности, соответствующий современным характеристикам требующихся программно-аппаратных комплексов. Основными ограничениями внедрения данных систем в настоящее время являются высокие требования к:

- характеристикам камер, используемым для получения видеопотока, аналогичного полю зрения пользователя, с высоким разрешением;
- вычислительным мощностям оконечных устройств, обусловленным необходимостью распознавания объектов методами компьютерного зрения в видеопотоке и его дополнения справочным контентом в режиме реального времени;
- скорости беспроводной передачи больших объемов видеоконтента.

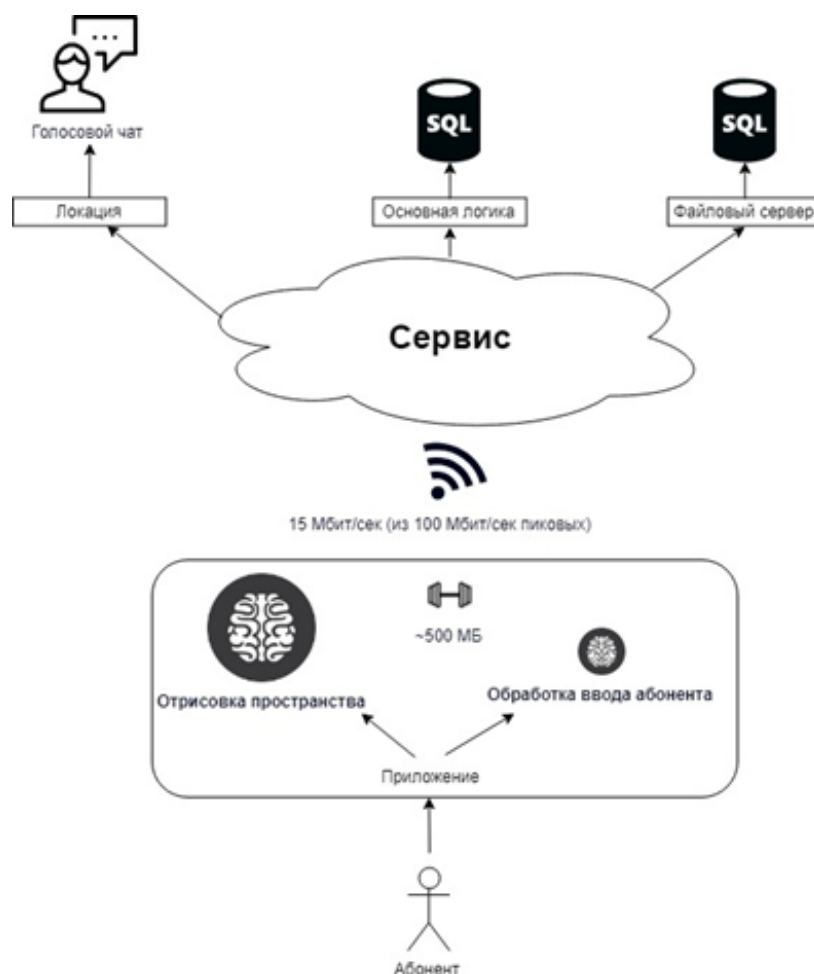


Рис. 3. Общий вид архитектуры справочно-информационной системы дополненной реальности в настоящее время.

По мнению авторов, перечисленные ограничения перестанут иметь решающее значение уже в среднесрочной перспективе. Внедрение к 2022 году стандартов связи 5G [14] (и дальнейшее развитие технологий беспроводной передачи информации), а также новых стандартов сжатия и передачи видеоинформации (в том числе развитие иммерсивных технологий, реализуемых в частности в разрабатываемом стандарте MPEG-I [15, 16]) позволит перейти к архитектуре справочно-информационных систем дополненной реальности, в которой:

- на конечном устройстве выполняются съемка и передача исходного, а также получение и воспроизведение итогового видеопотоков;
- на специальном сервере выполняется распознавание маркеров в составе исходного видеопотока, их дополнение контентом и формирование итогового видеопотока;
- аппаратура сети связи позволяет передавать видеопотоки в режиме реального времени между конечным устройством и сервером.

На рис. 4 представлен общий вид архитектуры справочно-информационной системы дополненной реальности с учетом описанных выше среднесрочных перспектив развития характеристик требующихся программно-аппаратных комплексов.

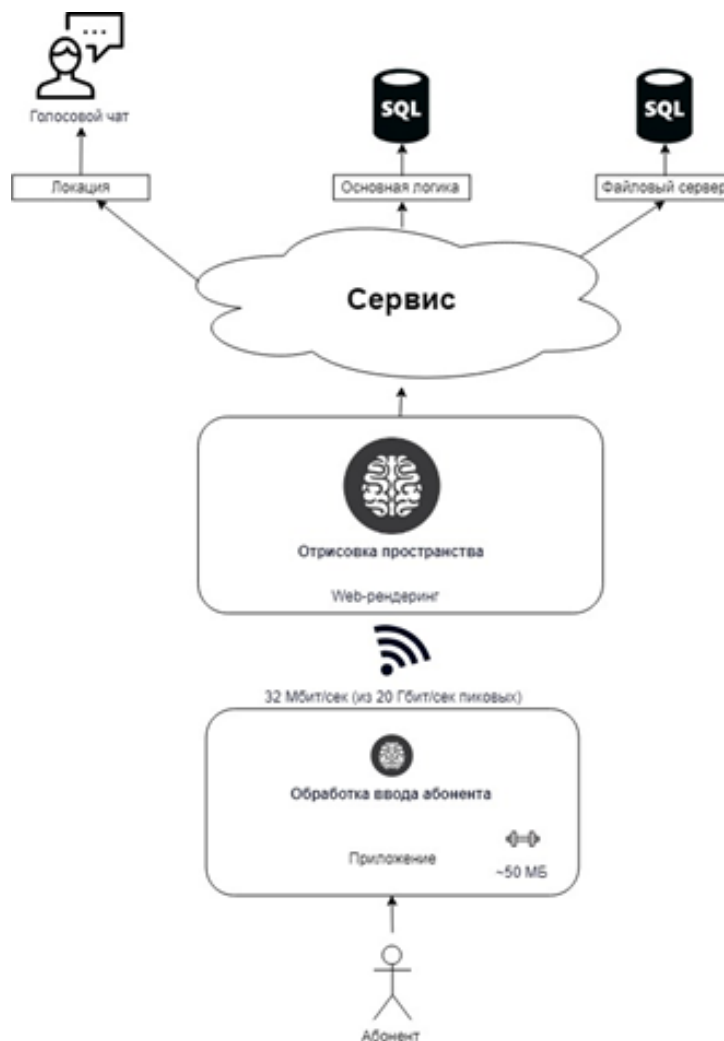


Рис. 4. Общий вид архитектуры справочно-информационной системы дополненной реальности в среднесрочной перспективе.

Выводы

В условиях транснационального рынка, а также быстрого обновления и внедрения новых технологий, борьба за потребителей вынуждает производителей совершенствовать формы и методы конкурентной борьбы, разрабатывать новые механизмы управления конкурентоспособностью товаров, что особенно актуально для машиностроения – отрасли, формирующей высокую добавленную стоимость в структуре национальной экономики технологически развитых государств.

Одним из новых источников дополнительных конкурентных преимуществ машиностроения будет являться контент дополненной реальности – новый способ информационного обеспечения задач сборки, настройки, обслуживания, эксплуатации и ремонта как самих изделий, так и задействованных в перечисленных процессах единиц оборудования и компонентов производственных систем. На этапах жизненного цикла продукции и оборудования получают применение справочно-информационные системы дополненной реальности – новый механизм реализации интерактивной информационной поддержки технического персонала.

Применение технологий дополненной реальности позволит повысить конкурентоспособность продукции машиностроения за счет сокращения себестоимости ее производства и эксплуатации, обеспеченного сокращением затрат на обучение и оплату труда технического персонала как у производителя, так и у потребителя.

Развитие справочно-информационных систем дополненной реальности в долгосрочной перспективе приведет к появлению информационных сервисов, обеспечивающих получение справочного контента о конкретных изделиях в режиме реального времени различными категориями абонентов (производственными рабочими, специалистами технических сервисов, продавцами-консультантами, потенциальными потребителями, владельцами и т.п.). Таким образом, находящиеся в настоящее время в начале своего жизненного цикла технологии дополненной реальности станут значительной движущей силой технического прогресса и неотъемлемым компонентом будущей цифровой экономики.

Вместе с тем приобретают высокую актуальность вопросы обеспечения информационной безопасности справочно-информационных систем дополненной реальности, в том числе аспекты защиты предоставляемого ими информационного контента. Нарушение целостности и аутентичности справочной информации (как неумышленное, так и преднамеренное) будет наносить материальный ущерб, проявляющийся в браке продукции, повышенном износе и выходе из строя оборудования, поломках элементов инфраструктуры предприятия, травматизме персонала и т.д.

С учетом специфики архитектуры и программно-аппаратных средств систем как дополненной, так смешанной и виртуальной реальностей, вопросы обеспечения их информационной безопасности могут быть выделены в отдельное направление исследований, формирование которого целесообразно уже в краткосрочной перспективе – с целью обеспечения возможностей оперативного внедрения и эффективного применения получаемых результатов в деятельности отечественных промышленных предприятий.

Литература:

1. Филькин М.Е., Чернавский С.Я. Моделирование и анализ уровня конкурентности на розничных рынках. М.: Издательство Центрального Экономико-Математического Института, 2018. 102 с. ISBN: 978-5-8211-0767-1
2. Папагианнис Х. Дополненная реальность. Все, что вы хотели узнать о технологии будущего. М.: Эксмо, 2019. 288 с. ISBN: 978-5-04-089971-5

3. Фролов В.К. Избранные труды. Т. 2. Машиноведение и машиностроение. М.: Наука, 2007. 523 с. ISBN 978-5-02-035785-3
4. Карсунцева О.В. Производственный потенциал предприятий машиностроения: оценка, динамика, резервы повышения. М.: Инфра-М, 2014. 211 с. ISBN 978-5-16-009482-3
5. Глазьев С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса. М.: Экономика, 2010. 256 с. ISBN 978-5-282-03056-3
6. Шваб К. Четвертая промышленная революция: пер. с англ. М.: Эксмо, 2019. 209 с.
7. Preece J., Rogers Y., Sharp H. Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction. Fourth ed. New York: Wiley, 2015. 584 p.
8. Milgram P., Kishino F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 1994;E77-D(12):1321-1329.
9. Azuma R.T. A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997;6(4):355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
10. Azuma R., Baillot Y., Behringer R., Feiner S., Julier S., MacIntyre B. Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2001;21(6):34-47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
11. Mann S., Barfield W. Introduction to Mediated Reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2003;15(2):205-208. https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1502_1
12. Бретт К. Эпоха дополненной реальности. М.: Олимп-бизнес, 2018. 527 с. ISBN: 978-5-9693-0374-4
13. Иванов В.В., Малинецкий Г.Г. Цифровая экономика: мифы, реальность, перспектива. М.: РАН, 2017. 64 с. ISBN: 978-5-906906-04-5
14. Recommendation ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Geneva, September, 2015. [Электронный ресурс]. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf.
15. Turban L., Urban F., Guillotel P. Extrafoveal Video Extension for an Immersive Viewing Experience. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2017;23(5):1520-1533. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2527649>
16. Domański M., Stankiewicz O., Wegner K., Grajek T. Immersive visual media – MPEG-I: 360 video, virtual navigation and beyond. In: Proc. of 24th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP 2017). Poznań, Poland, may, 2017. <https://www.doi.org/10.1109/IWSSIP.2017.7965623>

References:

1. Fil'kin M.E., Chernavskii S.Ya. *Modelirovaniye i analiz urovnya konkurentnosti na roznichnykh rynkakh* (Modeling and analysis of the level of competitiveness in retail markets). Moscow: Izdatel'stvo Tsentral'nogo Ekonomiko-Matematicheskogo Instituta; 2018. 102 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-8211-0767-1
2. Papagiannis Kh. *Dopolnennaya real'nost'. T. 2. Vse, chto vy khoteli uznat' o tekhnologii budushchego* (Augmented reality. V. 2. Everything you wanted to know about future technology). Moscow: Eksmo; 2019. 288 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-04-089971-5
3. Frolov V.K. *Izbrannyye trudy T. 2. Mashinovedeniye i mashinostroeniye* (Selected Works. V. 2. Engineering and mechanical engineering). Moscow: Nauka; 2007. 523 p. (in Russ.). ISBN 978-5-02-035785-3
4. Karsuntseva O.V. *Proizvodstvennyi potentsial predpriyatii mashinostroeniya: otsenka, dinamika, rezervy povysheniya* (Production potential of machine-building enterprises: assessment, dynamics, reserves of increase). Moscow: Infra-M; 2014. 211 p. (in Russ.). ISBN 978-5-16-009482-3
5. Glaz'ev S.Yu. *Strategiya operezhayushchego razvitiya Rossii v usloviyakh global'nogo krizisa* (The strategy of accelerated development of Russia in the context of the global crisis). Moscow: Ekonomika; 2010. 256 p. (in Russ.). ISBN 978-5-282-03056-3
6. Shvab K. *Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya* (Fourth Industrial Revolution): trans. from Engl. Moscow: Eksmo; 2010. 256 p. (in Russ.).
7. Preece J, Rogers Y, Sharp H. Interaction Design: Beyond Human-Computer Interaction. 4th Edition. NJ: Wiley; 2015. 584 p.
8. Milgram P, Kishino F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 1994; E77-D(12):1321-1329.
9. Azuma RT. A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997;6(4):355-385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>
10. Azuma R, Baillot Y, Behringer R, Feiner S, Julier S, MacIntyre B. Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2001;21(6):34-47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
11. Mann S., Barfield W. Introduction to Mediated Reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2003;15(2):205-8. https://doi.org/10.1207/S15327590IJHC1502_1
12. Brett K. *Epokha dopolnennoi real'nosti* (The Age of Augmented Reality). Moscow: Olimp-biznes; 2018. 527 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-9693-0374-4
13. Ivanov V.V., Malinetskii G.G. *Tsifrovaya ekonomika: mify, real'nost', perspektiva* (Digital economy: myths, reality, perspective). Moscow: RAN; 2017. 64 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-906906-04-5

14. Recommendation ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Geneva, September, 2015. Available from: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-1!!PDF-E.pdf

15. Turban L, Urban F, Guillotel P. Extrafoveal Video Extension for an Immersive Viewing Experience. *IEEE: Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2017;23(5):1520-1533. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2527649>

16. Domański M, Stankiewicz O, Wegner K, Grajek T. Immersive visual media – MPEG-I: 360 video, virtual navigation and beyond. In: 24th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP 2017). Poznań, Poland, may, 2017. <https://www.doi.org/10.1109/IWSSIP.2017.7965623>

Об авторах:

Зуев Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Зуева Анна Николаевна, кандидат экономических наук, заведующая кафедрой КБ-9 "Предметно-ориентированные информационные системы", Институт комплексной безопасности и специального приборостроения, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (107996, Россия, Москва, ул. Стромынка, д. 20)

Леонов Дмитрий Алексеевич, аспирант, ассистент кафедры практической и прикладной информатики, Институт информационных технологий, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78)

About the authors:

Andrey S. Zuev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Anna N. Zueva, Cand. Sci. (Economics), Head of the Department CS-9 "Subject-Oriented Information Systems", Institute of Integrated Safety and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Dmitriy A. Leonov, Postgraduate Student, Assistant of Professor of the Department of Practical and Applied Informatics, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Оценка и прогнозирование надёжности для высоконадёжных программно-аппаратных систем на примере центров обработки данных

Г.В. Петушков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: petushkov@list.ru

Рассматриваются вопросы оценки и прогнозирования надёжности высоконадёжных систем, например, центров обработки данных, включающих большое число серверов. Оценивается частота появления перемежающихся отказов и сбоев программного обеспечения в серверах. Предлагаются методики мониторинга и прогнозирования отказов серверов, исключающие одновременные отказы многих устройств.

Ключевые слова: высоконадёжные программно-аппаратные системы, многопроцессорные серверы, оценки надёжности аппаратной и программной части, прогнозирование надёжности.

Для цитирования: Петушков Г.В. Оценка и прогнозирование надёжности для высоконадёжных программно-аппаратных систем на примере центров обработки данных. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):21-26. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-21-26>

Evaluation and reliability prediction for highly reliable software and hardware systems: The case of data processing centers

Gregory V. Petushkov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: petushkov@list.ru

Methods for estimating and predicting the reliability levels of highly reliable systems are analyzed, for example, data centers that include a large number of servers. The frequency of interleaved and software failures on servers is estimated. Methods for monitoring and forecasting server failures are proposed, which exclude simultaneous failures of many devices.

Keywords: highly reliable software and hardware systems, multiprocessor servers, reliability assessment of hardware and software, reliability prediction.

For citation: Petushkov G.V. Evaluation and prediction of reliability for highly reliable software and hardware systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):21-26 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-21-26>

Современные программно-аппаратные системы, например, центры обработки данных (ЦОД), поддерживающие выполнение разнообразных приложений пользователей в интернете, обязаны быть высоконадёжными системами. Высокая надёжность достигается как надёжностью функционирования входящих в их состав элементов (серверного оборудования), так и резервированием оборудования, используемого для выполнения приложений в ЦОД.

Сложность и высокая надёжность программного и аппаратного оборудования серверов ЦОД делает актуальной и нетривиальной задачу оценки и прогнозирования надёжности отдельных серверов и ЦОД в целом, при этом ЦОД должен выполнять свои функции непрерывно.

Для отдельных серверов ЦОД характерными типами отказов функционирования являются сбои или перемежающиеся отказы, связанные прежде всего с проявлением однократных или многократных сбоев в работе современных микросхем высокой степени интеграции, а также ошибок программного обеспечения и требующие, как минимум, перезагрузки сервера для их устранения [1–3]. Особенности проявления ошибок, характерных для сбоев программного обеспечения, рассмотрены в работах [4–7]. Внезапные или катастрофические отказы аппаратных средств сервера также возможны, но проявляются заметно реже, хотя их устранение длится обычно дольше, поскольку требует поиска источника отказа, замены соответствующего оборудования и тестирования обновлённой конфигурации сервера.

Сам сервер является достаточно сложным программно-аппаратным устройством, поэтому стандартные методики расчёта его надёжности на основе интенсивностей отказов компонентов [8–11] могут дать результаты, заметно отличающиеся от реальных. Кроме того, более распространённым является первый из рассмотренных типов отказов, связанный с проявлением ошибки программного обеспечения (ПО), что не учитывается стандартными методиками. Это требует получения оценок надёжности по отношению к таким отказам на основе информации, относящейся к отказам и сбоям в работе данного конкретного сервера.

Наиболее подходящим математическим аппаратом для прогнозирования характеристик надёжности сервера по данным об истории его эксплуатации является модель Джелинско-Моранды [12]. Данная модель не единственная, но является наиболее часто используемой, поскольку близка по структуре к расчётам надёжности аппаратной части сервера. Модель основана на следующих допущениях: время работы до следующего отказа распределено экспоненциально, а интенсивность отказов ПО пропорционально количеству оставшихся в программном обеспечении ошибок. Согласно этим допущениям вероятность безотказной работы ПО $P(t)$ как функция времени на i -ом отрезке времени равна

$$P(t_i) = e^{-\lambda_i t_i}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов, равная

$$\lambda_i = C(N - (i - 1)). \quad (2)$$

В выражении (2) C – коэффициент пропорциональности, а N – первоначальное число ошибок в ПО.

Отсчёт времени t_i начинается от момента последнего $(i-1)$ -го отказа ПО.

Выражение для определения значения коэффициента C в модели приводится в литературе [8]. Например, если в процессе эксплуатации сервера получены значения интервалов времени, через которые наступали сбои ПО: $t_1 = 10$, $t_2 = 15$, выраженные в сутках, значение C определяется как

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{(N-i+1)}}{\sum_{i=1}^{k-1} t_i}, \quad (3)$$

где k – номер прогнозируемого отказа,

t_i – значения интервалов времени ($i = 1, 2$).

Тогда для $N = k = 3$, рассматривая третий ожидаемый отказ, получаем:

$$C = \frac{1/2 + 1/3}{10 + 15} = 0.033.$$

Этот расчёт позволяет дать оценку значениям интенсивностей отказа

$$\lambda_1 = 3C = 0.099,$$

$$\lambda_2 = 2C = 0.066,$$

$$\lambda_3 = C = 0.033.$$

откуда следует, что прогнозируемое время наработки на третий отказ ПО составляет в сутках:

$$T_3 = 1/\lambda_3 = 30.$$

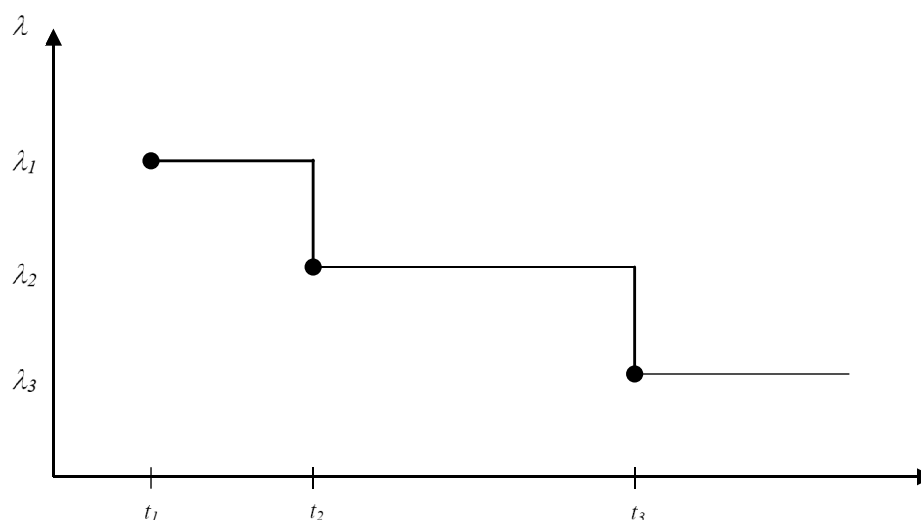


Рис. 1. Изменение интенсивности отказов λ по модели Джелинского-Моранды.

Внесём некоторое уточнение в модель, поскольку неочевидно, что и далее интенсивность отказов будет снижаться. Известно [12,13], что на этапе нормальной эксплуатации изделия интенсивность отказов стабильна и не зависит от времени. Предлагается выдвинуть две гипотезы в отношении интенсивности отказов к моменту третьего отказа: интенсивность отказов стабилизируется на уровне λ_2 и, иначе, интенсивность отказов снижается до уровня λ_3 . Этим гипотезам соответствуют две оценки ожидаемого времени наработки на третий отказ: значение $t'_3 = 15$ по первой гипотезе и значение $t''_3 = 30$ по второй.

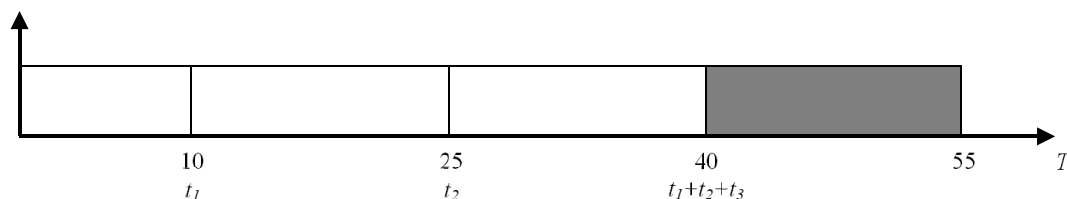


Рис. 2. Иллюстрация для астрономического времени T времени появления третьего отказа от момента $T'40$ суток работы до момента $T''55$ суток.

Интервал $\{40,55\}$, выделенный штриховкой на рис. 2, назовём интервалом ожидания отказа.

Далее в процессе эксплуатации сервера возникает третий отказ или сбой в работе сервера и мы получаем реальное время ожидания третьего отказа $t_3^0 = 25$ суток.

В соответствии с вновь полученными экспериментальными данными можно провести прогноз времени появления четвёртого отказа, определив новое значение C и t_4 .

$$C = \frac{1/2 + 1/3 + 1/4}{10 + 15 + 25} = 0.022,$$

$$t_4'' = 1/C = 45.$$

Аналогично предыдущему случаю принимаем $T_4' = 50 + 25 = 75$ и $T_4'' = 50 + 45 = 95$ и выделяем интервал ожидания четвёртого отказа в виде $\{75,95\}$ суток.

Ещё раз подчеркнём, что все прогнозы выполняются на основе данных, относящихся к данному конкретному серверу. И этот анализ может быть продолжен по мере получения новых экспериментальных данных.

Теперь вернёмся к вопросу работы ЦОД как системы, состоящей из серверов, которая должна функционировать непрерывно. Расчёт и прогнозирование характеристик работы такой системы можно проводить по усреднённым характеристикам надёжности работы входящих в неё устройств как это предлагалось в [13–15] с учётом имеющегося резервирования. Однако у разработчиков не всегда есть набор усреднённых характеристик и даже к имеющимся характеристикам уровень доверия может быть не высок.

В данной работе предлагается иной подход к прогнозированию надёжности системы, основанный на индивидуальном прогнозировании характеристик надёжности входящих в неё устройств.

Для системы (ЦОД) необходимо построить схему мониторинга событий в виде сбоев и отказов, происходящих в устройствах (серверах) и принимать меры по повышению надёжности и непрерывности функционирования системы на основе индивидуального прогнозирования отказов устройств.

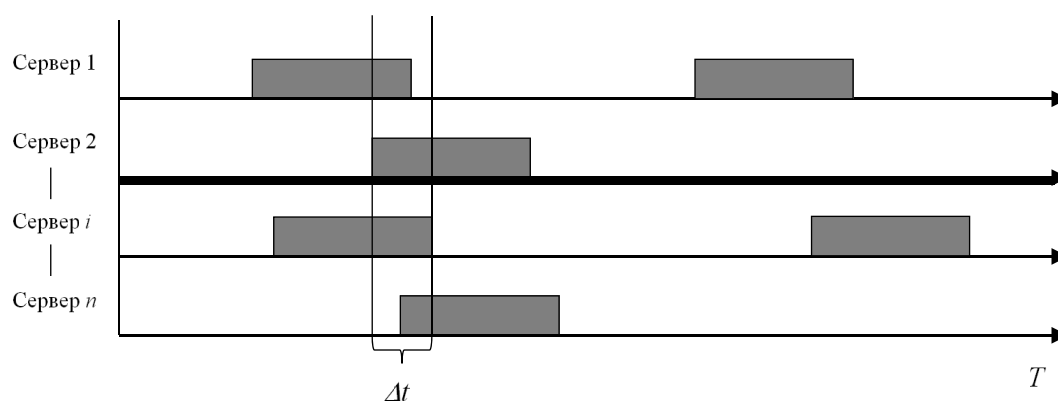


Рис. 3. Графический пример результатов индивидуального прогнозирования интервалов ожидания отказа для серверов, полученный по приведённой в данной работе методике.

Интервалы ожидания отказа для отдельных серверов заштрихованы на рис. 3. Такое графическое представление позволяет выделить интервалы Δt , в которых ожидаются сбои в работе сразу нескольких серверов, что может привести к сбою в работе ЦОД. Выделение таких интервалов в результате проводимого мониторинга и прогнозирования отказов серверов позволяет принимать дополнительные меры по борьбе за непрерывность функционирования системы (ЦОД) путём перераспределения нагрузки на серверы и более быстрого запуска в работу отказавших в этот период серверов. Подобным же образом в примере на рис. 3 могут быть учтены внезапные отказы оборудования серверов, которые, однако, требуют большего времени для восстановления работоспособности сервера.

Методика оценки надёжности и непрерывности функционирования системы на основе индивидуального прогнозирования надёжности входящих в неё устройств включает в себя следующие шаги: построение прогноза по интервалу времени проявления следующего отказа индивидуально для каждого прибора (сервера) в системе; мониторинга для выявления совпадения во времени этих интервалов для разных приборов в системе; применения средств смягчения и парирования отказов в случае, если совпадение моментов проявления отказов угрожает непрерывности функционирования системы.

Предложенная методика оценки надёжности и непрерывности функционирования системы на основе индивидуального прогнозирования надёжности входящих в неё устройств применима не только для ЦОД, но, например, для крупных вычислительных систем и сетей. В целом методику можно отнести к классу алгоритмов, в которых обработка больших объёмов данных даёт улучшение и уточнение получаемых прогнозов, т. е. к алгоритму работы с «большими данными».

Литература:

1. Кирпичников А.П., Васильев С.Н. Особенности современной микроэлектроники и вопросы построения систем управления высокой надёжности и безопасности. *Надёжность*. 2017;17(3):10-16. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-3-10-16>
2. Долгополов Б.А., Зайко Ю.Г., Михайлов В.А. Метод определения долговечности микросхем. *Надёжность*. 2019;19(3):3-6. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-3-3-6>
3. Егоров И.В. Имитационная модель надёжности резервированной вычислительной системы с периодическим восстановлением информации. *Надёжность*. 2018;18(3):10-17. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-3-10-17>
4. Потапов И.В. Проблематика в области надёжности программных систем. *Надёжность*. 2015;(1):53-61. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-11-1-53-61>
5. Алпеев А.С. Терминология надёжности. *Надёжность*. 2016;16(4):43-45. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2016-16-4-43-45>
6. Шубинский И.Б. Надёжные отказоустойчивые информационные системы. М.: ООО "Журнал "Надёжность", 2016. 544 с. ISBN 978-5-7572-0399-7

7. Антонов А.В., Галивец Е.Ю., Чепурко В.А., Черняев А.Н. Анализ дерева отказов в среде программирования R. *Надежность*. 2018;18(1):4-13. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-1-4-13>
8. Громов Ю.Ю., Иванова О.Г., Мосягина Н.Г., Набатов К.А. Надежность информационных систем. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. 160 с. ISBN 978-5-8265-0911-1
9. Лаврищева Е.М., Петрухин В.А. Методы и средства инженерии программного обеспечения: учебное пособие. М.: МФТИ, 2006. 304 с.
10. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 560 с. ISBN 5-94157-542-4
11. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005. 479 с. ISBN 5-469-00102-4
12. Иблуду К.А. Надежность, контроль и диагностика вычислительных машин и систем. М.: Высшая школа, 1989. 216 с. ISBN 5-06-000130-X
13. Коваленко С.М., Платонова О.В. Анализ задачи эффективной эксплуатации комплексов систем автоматизации и расчеты надежности на основе непрерывных моделей. *Известия ВУЗов. Машиностроение*. 2014;8(653):75-79. <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2014-8-75-79>
14. Коваленко С.М. Оценка надежности информационно-управляющих систем на основе непрерывных моделей. *Вопросы радиоэлектроники*. 2005;4(2):143-146.
15. Хеннеси Джон Л., Паттерсон Дэвид А. Компьютерная архитектура. Количественный подход, 5-е изд. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 935 с. ISBN 978-5-94836-413-1

References:

1. Kirpichnikov A.P., Vasiliev S.N. Particular characteristics of today's microelectronics and matters of highly dependable and secure control systems design. *Nadezhnost' = Dependability*. 2017;17(3):10-16 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-3-10-16>
2. Dolgoplov B.A., Zayko Y.G., Mikhaylov V.A. A method of identifying the durability indicator of microcircuitry. *Nadezhnost' = Dependability*. 2019;19(3):3-6 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-3-3-6>
3. Egorov I.V. Simulation model of dependability of redundant computer systems with recurrent information recovery. *Nadezhnost' = Dependability*. 2018;18(3):10-17 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-3-10-17>
4. Potapov I.V. Issues of software systems dependability. *Nadezhnost' = Dependability*. 2015;(1):53-61 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-0-1-53-61>
5. Alpeiev A.S. Definitions of dependability. *Nadezhnost' = Dependability*. 2016;16(4):43-45 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2016-16-4-43-45>
6. Shubinskii I.B. *Nadezhnye otkazoustoichivye informatsionnye sistemy* (Reliable fail-safe information systems). M.: "Zhurnal "Nadezhnost'"; 2016. 544 p. (in Russ.) ISBN 978-5-7572-0399-7
7. Antonov A.V., Galivets E.Y., Chepurko V.A., Cherniaev A.N. Fault tree analysis in the R programming environment. *Nadezhnost' = Dependability*. 2018;18(1):4-13 (in Russ.) <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2018-18-1-4-13>
8. Gromov Yu.Yu., Ivanova O.G., Mosyagina N.G., Nabatov K.A. *Nadezhnost' informatsionnykh sistem* (Reliability of information systems). Tambov: Izd-vo GOU VPO TGTU; 2010. 160 p. (in Russ.) ISBN 978-5-8265-0911-1
9. Lavrishcheva E.M., Petrukhin V.A. *Metody i sredstva inzhenerii programmnoy obespecheniya: uchebnoe posobie* (Methods and means of software engineering). Moscow: MFTI; 2006. 304 p. (in Russ.)
10. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* (Fundamentals of reliability theory). Sankt Peterburg: BKhV-Peterburg; 2006. 560 p. (in Russ.) ISBN 5-94157-542-4
11. Cherkesov G.N. *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov* (Reliability of hardware and software systems). Sankt Peterburg: Piter; 2005. 479 p. (in Russ.) ISBN 5-469-00102-4
12. Iyudu K.A. *Nadezhnost', kontrol' i diagnostika vychislitel'nykh mashin i sistem* (Reliability, control and diagnostics of computers and systems). Moscow: Vysshaya shkola; 1989. 216 p. (in Russ.) ISBN 5-06-000130-X
13. Kovalenko S.V., Platonova O.V. Analysis of the operational efficiency of complex automation systems and the calculation of their reliability on the basis of continuous models. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye* = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2014;8(653):75-79 (in Russ.) <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2014-8-75-79>
14. Kovalenko S.M. Reliability assessment of information management systems based on continuous models. *Voprosy radioelektroniki* = Issues of radio electronics. 2005;4(2):143-146 (in Russ.)
15. Hennessey John L., Patterson David A. *Komp'yuternaya arkhitektura. Kolichestvennyi podkhod* (Computer Architecture). Moscow: TEKHNOSFERA; 2016. 935 p. (in Russ.) ISBN 978-5-94836-413-1

Об авторе

Петушков Григорий Валерьевич, аспирант кафедры Вычислительная техника Института Информационных технологий, директор Института молодежной политики и международных отношений ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the author

Gregory V. Petushkov, Postgraduate Student of the Department of Computer Engineering of the Institute of Information Technologies, Director of the Institute of Youth Policy and International Relations MIREA - Russian Technological University (Vernadskogo pr., 78, A-404, 119454, Moscow, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-27-33>



УДК 004.5

Условие аддитивности информационно-справочного киоска на основе времени загрузки страниц

В.С. Томашевская[@],
Д.А. Яковлев

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

В работе рассматривается условие аддитивности информационно-справочного киоска, позволяющего осуществить проектирование статического киоска, по сути являющегося совокупностью страниц, организованных для предоставления пользователям достоверной информации. Условие аддитивности проанализировано на основе времени загрузки страниц информационно-справочного киоска, реализованного на базе концепции простого сайта узкой тематики с добавлением концепции вертикального портала. В связи с этим было введено понятие оптимального времени загрузки страницы, т.к. главная задача информационно-справочного киоска – это отображение запрашиваемой пользователем страницы, содержащей тематический контент в течение определенного временного интервала, а ключевая составляющая – графический интерфейс. Информационно-справочный киоск, как небольшая, с точки зрения функционала и объемов наполнения, абонентская система, содержащая информацию текстового, аудио- или видеоформата, созданная для предоставления справочной информации пользователю и дающая ему средства взаимодействия, путем предоставления системных объектов и функций, реализованных в виде графических компонентов, не является исключением из правил. В статье также рассмотрены такие ключевые понятия информационно-справочного киоска, как аддитивность, эргодичность и энтропия.

Ключевые слова: информационно-справочный киоск, аддитивность, эргодичность, энтропия.

Для цитирования: Томашевская В.С., Яковлев Д.А. Условие аддитивности информационно-справочного киоска на основе времени загрузки страниц. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):27-33. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-27-33>

Additivity condition for reference kiosk based on page load time

Valeriya S. Tomashevskaya[@],
Dmitriy A. Yakovlev

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

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

The paper analyzes the condition of additivity of the information and reference kiosk, which allows designing a static kiosk, which is essentially a set of pages organized in order to provide users with reliable information in various fields of knowledge and practice, with additive properties. The condition of additivity is analyzed based on the loading time of the pages of the informational kiosk is implemented on the basis of the concept of a simple website with narrow subject matter by adding the concept of a vertical portal, in connection with which introduced the concept of optimal page load time of the informational kiosk, since the main task of the informational kiosk is the display of the user requested page containing the content within a certain time interval, and a key component of the kiosk GUI. Information and reference kiosk, as a small subscriber system in terms of functionality and volume of content, containing information in text, audio or video format, aimed at providing reference information to the user and giving him a means of interaction, by providing all available system objects and functions implemented in the form of graphical components, is not an exception. The article also discusses the key concepts of the information and reference kiosk, such as additivity, ergodicity, and entropy.

Keywords: information and reference kiosk, additivity, ergodicity, entropy.

For citation: Tomashevskaya V.S., Yakovlev D.A. Assessment of the additivity of the information and reference kiosk based on the page loading speed. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):27-33 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-27-33>

Введение

На сегодняшний день насчитывается значительное количество различных интернет-ресурсов, которые различаются между собой по тематическому наполнению и функциональному назначению. Одни из них функционируют в качестве средств массовой информации, другие носят развлекательный или образовательный характер. Последние по своей сути являются совокупностью страниц, организованных с целью предоставления пользователям достоверной информации в разных областях знаний и практической деятельности. К данной группе можно отнести и информационно-справочный киоск.

Под этим определением обычно подразумевается реализованная с помощью определенного аппаратного решения простая абонентская система, предназначенная для общего использования и размещенная в публичных местах. При подробном анализе можно сделать вывод, что ключевой составляющей киоска является графический интерфейс, через который непосредственно осуществляется взаимодействие. Аппаратная реализация в данном случае может быть любой. Ее единственное условие – быть достаточной для поддержания визуального отображения интерфейса. Исходя из этого, естественным

является вывод о том, что подобную концепцию можно реализовать иначе – в виде ресурса сети Интернет, используя для создания графического интерфейса некий определенный инструментарий. Пользователь сможет просматривать веб-страницы и взаимодействовать с киоском благодаря браузеру.

Для реализации информационно-справочного киоска лучше всего взять концепцию простого сайта узкой тематики и дополнить ее концепцией вертикального портала.

Сам портал представляет собой единую интегрированную точку для осуществления неограниченного и всестороннего доступа к информации [1]. Особенностью вертикальных порталов является максимально возможный охват конкретной аудитории, что делает их узконаправленными. Таким образом, информационно-справочный киоск можно представить в виде совокупности страниц объединенных общей темой, дизайном.

С учетом вышеперечисленного информационно-справочный киоск можно описать как небольшую с точки зрения функционала и объемов наполнения, абонентскую систему, содержащую информацию текстового, аудио- или видеοформата. Эта система направлена на предоставление справочной информации пользователю и дает ему средства взаимодействия путем предоставления объектов и функций, реализованных в виде графических компонентов. Исходя из данного определения, при реализации информационного киоска в качестве интернет-ресурса взаимодействие с пользователем происходит с помощью интернет-браузера, а интерфейс, благодаря которому будет происходить процесс взаимодействия, реализуется с использованием системы управления контентом.

Понятия аддитивности и аддитивных систем

Аддитивность – это свойство величин, которое можно охарактеризовать следующим образом: вне зависимости от того, как именно происходит разбиение объекта, сумма значений величин, соответствующих частям объекта, равна значению величины соответствующего целого объекта [2].

К аддитивным относятся те системы, которые являются аддитивными по отношению к подсистемам и составляющим, являющимся частью их самих. В таких системах пересекаются информационные множества идентифицированных атрибутов и классов [3].

Транзакционные системы можно привести в пример простых аддитивных систем. Это связано с их реакцией на воздействие одиночных транзакций [4]. Данные реакции характеризуются такими параметрами как однозначность, повторяемость и предсказуемость [3].

Также при рассмотрении аддитивности необходимо затронуть понятия энтропии и эргодичности.

Энтропией можно назвать меру неопределенности некоторого события или ситуации. Так, если некий опыт имеет n равновероятных исходов, а другой опыт – m равновероятных исходов, то составной опыт имеет nm таких исходов [5]. Если мы вводим меру неопределенности f , то естественно потребовать, чтобы она была удовлетворяла следующим условиям: во-первых, неопределенность должна расти с ростом числа возможных исходов; во-вторых, неопределенность составного опыта должна быть равна сумме неопределенностей отдельных опытов, или иными словами мера неопределенности должна быть аддитивной: $f(nm) = f(n) + f(m)$ [6].

Эргодичность. Случайный процесс считается эргодичным при условии, что с вероятностью, равной единице, все его статистические характеристики могут быть предсказаны по одной реализации из некоего ансамбля процессов с помощью усреднения во времени [7].

Другими словами, среднее по времени значение почти всех возможных реализаций процесса сходится к одной и той же постоянной величине с вероятностью, равной единице [8]. Из этого следует, что среднее по реализациям значение равно среднему по времени [9]. Понятие эргодичности характеризует собой повторяемость опыта и его результатов, а также устойчивость получаемых результатов. Благодаря этому можно делать выводы об устойчивости и репродуктивности работы информационной системы в изменяющихся и случайных условиях [8]. Это значительно упрощает анализ случайных процессов. При исследовании различных информационных систем, эргодичность представляет собой не точную оценку качества и эффективности системы, а скорее более приближительную. По этой причине оценка качества и эффективности имеет смысл только в сочетании с изучением понятия аддитивности [8].

Функциональные возможности интернет-ресурсов оказывают прямое воздействие на степень аддитивности. Чем больше функций имеется у блога, сайта или социальной сети, тем труднее наделить их свойством аддитивности и наоборот. Мера аддитивности справочных информационных систем также практически никак количественно не оценивается. Границы ее действия в поле изменения различных показателей и свойств информационных систем также не рассмотрены в существующих публикациях по этой тематике [8].

Проверка информационно-справочного киоска на наличие аддитивности

Главная задача информационно-справочного киоска – это отображение запрашиваемой пользователем страницы, содержащей тематический контент в течение определенного временного интервала. Чем дольше пользователь ждет, пока интересующая его страница загрузится, тем выше шанс того, что он покинет ресурс. Соответственно, чем меньше требуется времени для того, чтобы страница загрузилась, тем лучше. Киоск должен состоять только из тех страниц, которые предоставляют пользователю необходимую информацию за как можно малый интервал времени. Именно они и образуют собой аддитивный информационно-справочный киоск. Если присутствуют страницы, не отвечающие данному требованию, то киоск не выполняет свое прямое назначение. Такая ситуация противоречит самому понятию аддитивности, где в качестве целого объекта выступает информационный киоск, а в качестве его составляющих – страницы. Соответственно, наличие подобных страниц не позволяет киоску считаться аддитивным.

Сами страницы должны обладать характеристикой, на основании которой можно судить о наличии или отсутствии аддитивности у информационно-справочного киоска. В качестве данной характеристики будет рассматриваться скорость загрузки страницы, т.е. время, которое необходимо для того, чтобы страница со всеми ее элементами полностью отобразилась перед пользователем.

Данная характеристика является более подходящей в качестве условия аддитивности т.к. обладает следующими эргодическими свойствами:

- исчисляемость процесса или свойства;
- повторяемость результатов;
- предсказуемость [10].

Исходя из этого, введем понятие оптимального времени загрузки страницы информационно-справочного киоска. Для нашего информационно-справочного киоска данное значение будет равно 2 секундам [11]. Обозначим его как T . Если время загрузки страницы превышает данный лимит, имеет смысл говорить о том, что степень аддитивности

снижается, поскольку каждая страница содержит тематический контент, а все вместе они образуют собой информационный киоск.

Условимся, что, если время загрузки страницы меньше или равно T , то она является аддитивной по отношению к киоску, если больше, то – не аддитивной. Тогда степень аддитивности киоска можно определить так:

$$A = \frac{T_a}{T_v}, \quad (1)$$

где T_a – переменная, обозначающая количество страниц информационно-справочного киоска, которые являются аддитивными; T_v – переменная, обозначающая общее число страниц информационно-справочного киоска, независимо от того, являются ли они аддитивными или нет.

Для полностью аддитивного киоска имеем $A = 1$. Для него также выполняется условие:

$$\frac{T_n}{T_v} = 0,$$

где T_n – переменная, обозначающая скорость загрузки всех страниц информационно-справочного киоска, которые не являются аддитивными.

Если же результат (1) отличен от 1, то можно сделать вывод что информационно-справочный киоск содержит страницы, которые не удовлетворяют поставленному условию, т.е. имеют время загрузки, большее T .

Со временем может возникнуть необходимость в добавлении новых страниц информационно-справочного киоска. Они также должны удовлетворять поставленному условию. Ниже представлена формула, определяющая степень аддитивности информационно-справочного киоска при добавлении новых страниц к уже имеющимся (старым) страницам:

$$A_n = \frac{T_{a1} + T_{a2}}{T_{v1} + (T_{a2} + T_{n2})}, \quad (2)$$

где T_{a1} – суммарное число всех старых аддитивных страниц; T_{a2} – суммарное число аддитивных страниц среди новых страниц; T_{n2} – суммарное число неаддитивных страниц среди новых страниц; T_{v1} – суммарное число всех старых страниц информационного киоска.

Если исходить из заключения о том, что все старые страницы уже соответствуют требованиям к скорости загрузки, а значит, они аддитивны, то $T_{v1} = T_{a1}$. Учитывая этот факт, получим из (2):

$$A_n = \frac{T_{v1} + T_{a2}}{T_{v1} + (T_{a2} + T_{n2})} = \frac{T_{a1} + T_{a2}}{T_{a1} + (T_{a2} + T_{n2})}.$$

Результат $A_n = 1$ говорит о том, что информационно-справочный киоск после увеличения количества страниц по-прежнему полностью аддитивен.

Заключение

Дано определение информационно-справочного киоска. Рассмотрены такие ключевые для него понятия, как аддитивность, эргодичность и энтропия. Предложен способ оценки аддитивности на основе скорости загрузки страниц информационно-справочного киоска.

Литература:

1. Тупикина Г.Г., Дочкин С.А. Образовательный портал как способ доступа к информационным ресурсам. *Вестник КемГУ*. 2011;2(46):106-111.
2. Аддитивность. Большая российская энциклопедия. [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/mathematics/text/1800371>
3. Маркелов В.М. О системной информации в аддитивных информационных системах. *Перспективы науки и образования*. 2014;5(11):31-36.
4. Болбаков Р.Г. К вопросу о системной информации. *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2014;3(4):38-50.
5. Зубков Е.В., Белов В.М. Методика выявления динамической зависимости между группами событий. *Вестник СибГУТИ*. 2016;1:4-16.
6. Коротаев С.М. Энтропия и информация – универсальные естественнонаучные понятия. [Электронный ресурс]. URL: http://www.chronos.msu.ru/old/RREPORTS/korotaev_entropy/korotaev_entropy.htm
7. Кирьянова Л.В., Лемин А.Ю., Матсеевич Т.А. Теория случайных процессов: курс лекций. М.: Изд-во МИСИ, 2016. 94 с. ISBN 978-5-7264-1421-8
8. Мордвинов В.А., Юргаев Д.А. Аддитивность информационных порталов в регулярном пространстве Лебега. *Информационные системы и технологии*. 2010;5(61):65-71.
9. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Информатика и синергетика: учебное пособие. М.: МГУПС, 2015. 88 с.
10. Сигов А.С., Куракин Д.В., Юргаев Д.А. Аддитивность интегрированных информационных систем в регулярном пространстве Лебега. *Информатизация образования и науки*. 2010;3(7):3-10.
11. Everts T. Time Is Money: The Business Value of Web Performance. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc., 2016. 110 p.

References:

1. Tupikina G.G., Dochkin S.A. Educational portal is access's way for informational resources. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta* = Bulletin of Kemerovo State University. 2011;2(46):106-111 (in Russ.).
2. Additvnost'. Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya (Additivity. Big Russian Encyclopedia). [Electronic resource]. URL: <https://bigenc.ru/mathematics/text/1800371> (in Russ.).
3. Markelov V.M. About system information in additive information systems. *Perspektivy nauki i obrazovaniya* = Perspectives of Science and Education. 2014;5(11):31-36 (in Russ.).
4. Bolbakov R.G. On the problem of system information. *Vestnik MGTU MIREA* = Herald of MSTU MIREA. 2014;3(4):38-50 (in Russ.).
5. Zubkov E.V., Belov V.M. Technique for dynamic dependence detection between groups of events. *Vestnik SibGUTI* = The Herald of SibSUTIS. 2016;1:4-16 (in Russ.).
6. Korotaev S.M. *Entropiya i informatsiya – universal'nye estestvennonauchnye ponyatiya*. (Entropy and information – universal natural science concepts). Electronic resource. URL: http://www.chronos.msu.ru/old/RREPORTS/korotaev_entropy/korotaev_entropy.htm
7. Kiryanova L.V., Lemin A.Yu., Matseevich T.A. Kir'yanova L.V., Lemin A.Yu., Matseevich T.A. *Teoriya sluchainykh protsessov: kurs leksii*. (Theory of Random Processes: Lecture Course. Moscow: MISI Publishing House; 2016. 96 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7264-1421-8
8. Mordvinov V.A., Yurgaev D.A. Additivity of information portals in regular space Lebesgue. *Informacionnye sistemy i tehnologii* = Information systems and technologies. 2010;5(61):65-71 (in Russ.).
9. Rosenberg I.N., Tsvetkov V.Ya. *Informatika i sinergetika: uchebnoe posobie* (Computer science and synergetics). Moscow: MGUPS; 2015. 88 p. (in Russ.).
10. Sigov A.S., Kurakin D.V., Yurgaev D.A., Additivity of the integrated information systems in regular space Lebesgue. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* = Informatization of Education and Science. 2010;3(7):3-10 (in Russ.).
11. Everts T. Time Is Money: The Business Value of Web Performance. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc.; 2016. 110 p.

Об авторах:

Томашевская Валерия Сергеевна, 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).

Яковлев Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Valeriya S. Tomashevskaya, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Dmitriy A. Yakovlev, Postgraduate Student, Department of Corporate Information Systems, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Принципы построения больших территориально распределенных автоматизированных систем

В.А. Третьяков^{1,2},
Г.В. Куликов^{1,@},
Ю.Ф. Лукьянец^{1,2}

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²ПАО МАК «Вымпел», Москва 125480, Россия

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

В статье дано определение больших территориально распределенных автоматизированных систем, включающих системы сбора и обработки информации с пространственно разнесенных датчиков на объектах. Примерами таких автоматизированных систем являются военные системы, такие как система предупреждения о ракетном нападении, система космического контроля, стратегические и нестратегические системы противоракетной обороны, а также гражданские – государственная автоматизированная система управления, система управления воздушным движением и другие. Назначением этих систем является непрерывный мониторинг состояния совокупности определенных объектов, среды их функционирования, постоянная оценка параметров объектов, выявление опасных ситуаций в поведении объектов и окружающей среды, а также разработка мероприятий по снижению уровня возможных угроз безопасности и устранению опасных ситуаций.

Типовая структура большой территориально распределенной автоматизированной системы включает источники и потребители информации, телекоммуникационные средства, а также центр обработки входных данных и подготовки информации для потребителей. Источниками информации являются операторы, технические средства наблюдения и специализированные измерительные средства. Телекоммуникационные средства формируются двумя способами. Первый вариант использует существующие глобальные сети передачи данных. Во втором варианте собственные сети передачи данных формируются на основе специально созданных средств передачи данных и использования выделенных каналов передачи данных. Центр обработки входных данных и подготовки информации содержит комплекс средств автоматизации и персонал, обеспечивающий обслуживание, ремонт и эксплуатацию.

Описаны функции и наиболее значимые аппаратно-программные компоненты крупных территориально распределенных автоматизированных систем. Охарактеризованы основные показатели качества их функционирования и стадии жизненного цикла: разработка требований, создание опытного образца, сертификация, серийное производство, эксплуатация, модернизация, окончание эксплуатации и утилизация.

Ключевые слова: автоматизированные системы, аппаратные компоненты, программные компоненты, стадии жизненного цикла.

Для цитирования: Третьяков В.А., Куликов Г.В., Лукьянец Ю.Ф. Принципы построения больших территориально распределенных автоматизированных систем. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):34-42. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-34-42>

Principles of creation of the big territorially distributed automated systems

Victor A. Tretyakov^{1,2},
Gennadiy V. Kulikov^{1,@},
Yuriy F. Lukyanets^{1,2}

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²JSC «Vimpel», Moscow 125480, Russia

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

The article defines large territorially distributed automated systems, which include systems that collect and process information from spatially spaced sensors on objects. Examples of such automated systems are military systems, such as a missile attack warning system, a space control system, strategic and non-strategic missile defense systems, and civil systems, such as the state automated Control system, the air traffic control system and other systems. The purpose of these systems is the continuous monitoring of the state of a set of certain objects, the environment of their functioning, the constant assessment of the parameters of objects, the identification of dangerous situations in the behavior of objects and the environment, as well as the development of measures to reduce the level of possible security threats and eliminate dangerous situations.

The typical structure of large territorially distributed automated systems includes sources and consumers of information, telecommunication facilities, as well as a center for processing input data and preparing information for consumers. The sources of information are operators, technical means of observation and specialized measuring instruments. Telecommunication means of big territorially distributed automated systems are formed in two ways. The first option uses existing global data net-works. In the second variant, self-made data transmission networks are formed on the basis of specially created means of data transmission and the use of dedicated data channels. The center of input data processing and information preparation contains a complex of automation tools and personnel providing maintenance, repair and operation.

The functions and the most significant hardware and software components of large territorially distributed automated systems are presented. The main indicators of quality of their functioning and stages of life cycle are characterized: development of requirements, creation of a prototype, certification, mass production, operation, modernization, the end of operation and utilization.

Keywords: automated systems, hardware components, software components, life cycle stages.

For citation: Tretyakov V.A., Kulikov G.V., Lukyanets Y.F. Principles of creation of the big territorially distributed automated systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):34-42 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-34-42>

Введение

К большим территориально распределенным автоматизированным системам (АС) относятся системы, обеспечивающие сбор и обработку информации от пространственно разнесенных датчиков по объектам, представляющим интерес для потребителей информации. Примерами таких автоматизированных систем являются системы военного назначения, например: система предупреждения о ракетном нападении, система контроля космического пространства, системы стратегической и нестратегической ПРО [1, 2], а также системы гражданского назначения, например: государственная автоматизированная система «Управление», система управления воздушным движением [3] и другие системы [4, 5].

Назначением этих систем является непрерывный контроль состояния совокупности неких объектов, среды их функционирования, постоянная оценка параметров объектов, выявление опасных ситуаций в поведении объектов и обстановке, а также разработка мероприятий по снижению уровня возможных угроз безопасности, формирование команд по устранению опасных ситуаций.

Типовая структура больших территориально распределенных автоматизированных систем

Типовая структура большой территориально распределенной автоматизированной системы представлена на рис. 1 и обычно включает источники и потребители информации, телекоммуникационные средства, а также центр обработки входных данных и подготовки информации для потребителей [6–9].



Рис. 1. Типовая структура большой территориально распределенной автоматизированной системы.

В качестве источников информации могут выступать операторы, обеспечивающие периодический сбор данных, технические средства наблюдения: оптические, радиолокационные, радиотехнические, акустические, сейсмические, радиационные и т. п., обеспечивающие непрерывный автоматический контроль за объектами, специализированные измерительные средства, реализующие постоянную фиксацию значений параметров объектов и среды их функционирования.

Потребителями информации таких систем являются индивидуальные операторы и их группы в различных организациях и учреждениях, для информационного обеспечения которых создавалась автоматизированная система. Во многих случаях потребителями информации таких систем могут являться другие автоматизированные системы.

Существуют два варианта формирования телекоммуникационных средств. В первом варианте используются существующие глобальные сети передачи данных. Во втором варианте формируются собственные сети передачи данных на базе специально создаваемых средств передачи данных с использованием выделенных каналов передачи данных [10].

Центром обработки осуществляется прием информации от источников и ее обработка, формирование и предоставление результатов обработки потребителям.

Центр обработки входных данных и подготовки информации для потребителей содержит комплекс средств автоматизации (аппаратурный и программный комплексы) и персонал, обеспечивающий обслуживание центра, ремонт и эксплуатацию. Аналогичным образом источники и потребители информации, а также телекоммуникационные средства содержат комплексы средств автоматизации и персонал. Автоматизированная система в целом включает в себя комплексы средств автоматизации и персонал центра обработки информации, источников и потребителей информации, а также телекоммуникационных средств. В процессе функционирования АС источниками информации формируются и передаются в центр обработки результаты измерений параметров контролируемых процессов и/или данных о состоянии контролируемых объектов.

В больших территориально распределенных автоматизированных системах чаще всего содержится множество центров. Центры обработки входных данных могут формироваться по территориальному принципу, образуя сетевые структуры, либо по принципу подчиненности одних центров другим, образуя иерархические структуры, либо включать совокупности центров, сформированных по разным принципам, образуя смешанную структуру.

По результатам обработки данных центром осуществляется управление источниками информации, оценка состояния контролируемых процессов, объектов и обстановки в целом с целью выявления опасных ситуаций. Потребителям информации выдаются результаты такой оценки и предложения по применению подчиненных им средств в целях поддержания необходимых параметров системы в допустимых пределах. При принятии соответствующих решений и наличии соответствующих санкций потребителями осуществляется применение подчиненных им средств.

Функции территориально распределенных автоматизированных систем

В целом территориально распределенными автоматизированными системами может реализовываться следующий перечень функций:

- сбор информации от источников. Источниками входной информации могут быть

указанные выше датчики, специализированные измерительные средства, взаимодействующие системы, удаленные терминалы операторов и т. д.;

- предварительная обработка входной информации, включая формально-логическую проверку представления входной информации и проверку ее на физическую достоверность, отбраковку искаженной информации;
- обработка, приведение информации к виду и форматам, принятым для хранения в АС;
- хранение в базе данных АС принятой, обработанной и сформированной для пользователей информации в виде регламентированных отчетов и выходных сигналов, обновление и восстановление в случае необходимости хранящейся в АС информации, а также представление ее пользователям;
- оценка по принятой информации и результатам ее обработки текущей обстановки и выявление возможных угроз и опасных ситуаций;
- прогноз развития обстановки и возможных угроз, выявление для пользователей АС опасных ситуаций, определение параметров опасных ситуаций и уровня возможного ущерба от их наступления, составление плана действий;
- формирование и инициативная выдача потребителям по результатам прогноза сигналов предупреждения об опасных ситуациях и возможных угрозах, выработка информации оповещения о времени наступления опасных ситуаций и уровне нанесения возможного ущерба.
- подготовка и выдача по запросам пользователей отчетов по результатам функционирования АС;
- выработка рекомендаций и команд по применению средств противодействия угрозам и устранению опасных ситуаций;
- контроль выполнения плана действий и его оперативная коррекция в случае необходимости.

Общая функциональная схема АС представлена на рис. 2.

Центром обработки осуществляется прием информации от источников и ее обработка.

В конкретной автоматизированной системе может реализовываться далеко не весь приведенный выше перечень функций.

Аппаратные и программные компоненты автоматизированных систем

Выполнение функций автоматизированной системой осуществляется путем реализации определенной информационной технологии с участием персонала и комплекса средств автоматизации. Комплекс средств автоматизации автоматизированной системы представляет собой совокупность всех компонентов АС за исключением людей. Совокупность таких элементов, входящих в состав комплекса средств автоматизации, можно разделить на две группы.

К первой группе относятся компоненты, из которых формируется аппаратный комплекс автоматизированной системы, ко второй группе – компоненты, образующие программный комплекс автоматизированной системы.

Аппаратурный комплекс для большинства современных автоматизированных систем обычно включает следующие типовые компоненты:

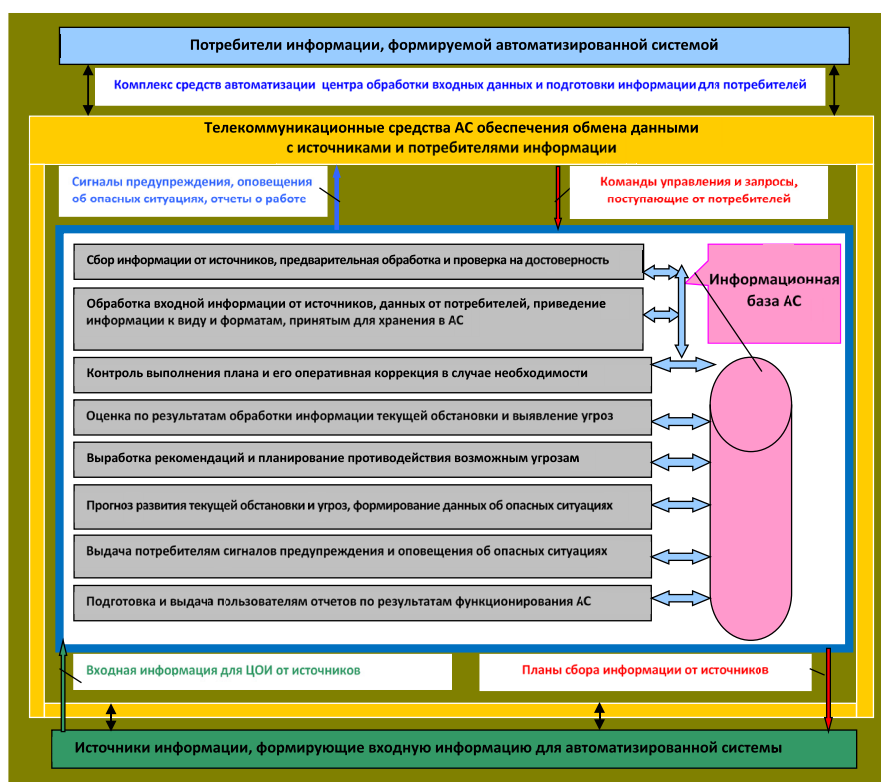


Рис. 2. Общая функциональная схема автоматизированной системы.

- аппаратура средств передачи данных;
- серверы;
- автоматизированные рабочие места (АРМ);
- аппаратура системы единого времени и получения навигационных данных;
- аппаратура обеспечения безопасности информации;
- аппаратура отображения коллективного пользования;
- аппаратура жизнеобеспечения персонала и требуемых параметров окружающей среды для функционирования КСА;
- аппаратура обеспечения противопожарной безопасности;
- аппаратура обеспечения охраны;
- аппаратура электропитания (сетевое и автономного);
- вспомогательное, сетевое и кабельное оборудование;
- комплект запасного имущества и приборов.

Программный комплекс автоматизированной системы включает:

- функциональное программное обеспечение;
- общесистемное программное обеспечение;
- специализированное системное программное обеспечение;
- программное обеспечение защиты от несанкционированного доступа и преднамеренного искажения информации.

Функциональное программное обеспечение включает совокупность программ, реализующих выполнение функций по назначению АС и достижение целей ее функционирования.

Общесистемное программное обеспечение представляет собой совокупность программ, приобретаемых совместно с вычислительными средствами и обеспечивающих разработку и реализацию на этих средствах функциональных программ.

Специализированное системное программное обеспечение предназначено для реализации системных функций управления базами данных и функций геоинформационных систем, а также функций управления вычислительным процессом, обмена сообщениями с источниками и потребителями информации, формирования и отображения информационных моделей, формирования регламентированных отчетов по результатам работы АС.

Программное обеспечение защиты от несанкционированного доступа и преднамеренного искажения информации представляет собой совокупность программ, предназначенных для существенного расширения возможностей, предоставляемых в этой сфере операционными системами, и включающих обычно антивирусные средства, средства доверенной загрузки, средства защиты объектов от утечки информации, средства защиты информации от несанкционированного доступа.

Стадии жизненного цикла автоматизированных систем

Практика создания автоматизированных систем показывает, что можно выделить следующие стадии их жизненного цикла:

- формирование исходных данных для создания АС и разработка требований к ее характеристикам;
- организация и выполнение ОКР по созданию опытного образца АС;
- сертификация АС;
- организация и запуск серийного производства АС;
- эксплуатация АС;
- модернизация АС;
- окончание эксплуатации и утилизация комплекса средств автоматизации АС.

Следует отметить, что стадия сертификации выполняется после каждой стадии, на которой определяется, уточняется или изменяется облик АС, а именно для: опытных образцов АС (после завершения работ стадии организации и выполнения ОКР по созданию опытного образца), серийных образцов (после завершения работ стадии организации и запуска серийного производства), модернизированных образцов АС (после завершения работ стадии по модернизации АС), а также для образцов, создаваемых на базе утилизированного комплекса средств автоматизации (после завершения работ стадии утилизации). Кроме того сертификация на всех перечисленных стадиях проводится после или в процессе проведения испытаний, в результате которых независимо от заказчика определяются значения основных показателей качества АС и оценивается их соответствие техническому заданию.

В качестве основных показателей чаще всего рассматриваются такие показатели как производительность АС или оперативность обработки входной информации (время обработки входной информации от источников, время отработки запросов потребителей), точность оценки параметров контролируемых объектов и процессов (абсолютные и относительные погрешности определения параметров), достоверность оценки текущей обста-

новки (вероятность пропуска опасной ситуации, вероятность определения ложной опасной ситуации), время запаздывания в выявлении опасных ситуаций, надежность функционирования АС (время наработки на отказ, коэффициент технического использования АС и т. п.).

Заключение

В настоящей статье обобщена информация о больших территориально распределенных автоматизированных системах, сформулированы их основные функциональные задачи, приведена типовая структура и состав аппаратных и программных средств, а также определены стадии и этапы их создания и показатели эффективности функционирования.

Литература:

1. Оружие и технологии России = Russia's arms and technologies: Энциклопедия. XXI в. / Под общ. ред. С. Иванова. Т. 9. Противовоздушная и противоракетная оборона. М.: Оружие и технологии, 2004. 752 с. ISBN 5-93799-015-3
2. Гринько В.Ф., Люхин В.А., Суханов С.А. Системы и средства ракетно-космической обороны. М.: АНО «ЦОПИ», 2012. 254 с. ISBN 978-5-88070-227-5
3. Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д. Автоматизация управления воздушным движением. М.: Транспорт, 1992. 280 с. ISBN 5-277-01403-9
4. Куревин В.В., Морозов О.Г., Зайдуллин С.С. и др. Территориально-распределенные системы хранения опасных веществ и вопросы обеспечения их экологической безопасности. *Вестник технологического университета*. 2016;19(13):164-169.
5. Фролов А.В., Сигов А.С., Кутузов В.М., Трубицын А.В., Коваленко В.В., Замуруев С.Н., Куликов Г.В., Зацепин А.Г., Собчук В.А., Ткачев Г.Н., Егоров В.А., Телегин В.А., Каптюг А.А. Концепция создания комплексной системы мониторинга прибрежных акваторий. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции «РТИ Системы ВКО – 2016», 2017. С. 216–224.
6. Володин С.В., Макаров А.Н., Умрихин Ю.Д., Фараджев В.А. Общесистемное проектирование АСУ реального времени, под ред. В.А. Шабалина. М.: Радио и связь, 1984. 232 с.
7. Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С. Введение в радиолокационную системотехнику. М.: Советское радио, 1971. 368 с.
8. Лясковский В.Л., Бреслер И.Б. Методика обоснования плана оснащения средствами автоматизации органов управления территориально-распределенных информационно-управляющих систем организационного типа. *Электронные информационные системы*. 2016;4(11):19-30.
9. Чуваков А.В. Концепция формирования системы поддержки принятия решений при управлении глобально распределенной организационной системой. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2016;2(50):74-82.
10. Корилов А.М., Сонькин М.А., Поздняков А.А. Проблема создания распределенных информационно-телекоммуникационных систем для задач мониторинга и управления. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2004;2(10):45-56.

References:

1. Ivanov S. (Ed.). *Oruzhie i tekhnologii Rossii* (Russia's arms and technologies): Encyclopedia. XXI century. V. 9. *Protivovozdushnaya i protivoraketnaya oborona* (Air and missile defense). Moscow: Weapons and technology; 2004. 752 p. (in Russ.). ISBN 5-93799-015-3
2. Grin'ko V.F., Lyukhin V.A., Sukhanov S. A. *Sistemy i sredstva raketno-kosmicheskoi oborony* (Space rocket defense systems and equipment). Moscow: ANO «COPI»; 2012. 254 p. (in Russ.). ISBN 978-5-88070-227-5
3. Anodina T.G., Kuznetsov A.A., Markovich E.D. *Avtomatizatsiya upravleniya vozdushnym dvizheniem* (Automation of air traffic control). Moscow: Transport; 1992. 280 p. (in Russ.). ISBN 5-277-01403-9
4. Kurepin V.V., Morozov O.G., Zaidullin S.S. etc. Geographically distributed system for the storage of hazardous substances and ensure their ecological safety. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University. 2016;19(13):164-169 (in Russ.).
5. Frolov A.V., Sigov A.S., Kutuzov V.M., Trubitsyn A.V., Kovalenko V.V., Zamuruev S.N., Kulikov G.V., Zatsepin A.G., Sobchuk V. A., Tkachev G.N., Egorov V.A., Telegin V.A., Kaptyug A.A. The concept of creating an integrated monitoring system of coastal waters. In Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference "RTI Sistemy VKO – 2016". 2017. P. 216-224 (in Russ.).
6. Shabalin V.A. (Ed.). Volodin S.V., Makarov A.N., Umrikhin Yu.D., Faradzhev V.A. *Obshchesistemnoe proektirovanie ASU real'nogo vremeni* (System-wide design of ACS real-time). Moscow: Radio i svyaz'; 1984. 232 p. (in Russ.).

7. Kontorov DS, Golubev-Novozhilov Yu.S. *Vvedenie v radiolokatsionnyuyu sistemotekhniku* (Introduction to radar systems engineering). Moscow: Sovetskoe radio; 1971. 368 p. (in Russ.).
8. Lyaskovsky V.L., Bresler I.B. Methodology of substantiation of the plan to equip controls of geographically distributed organizational information and control systems with automation means. *Elektronnye informatsionnye sistemy* = Electronic information systems. 2016;4(11):19-30 (in Russ.).
9. Chuvakov A.V. Concept formation of decision support system in the management of global distributed organizational systems. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* = Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. 2016;2(50):74-82 (in Russ.).
10. Korikov A.M., Sonkin M.A., Pozdnyakov A.A. Problems of distributed informational telecommunication systems creation for monitoring and control tasks solving. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* = Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. 2004;2(10):45-56 (in Russ.).

Об авторах:

Третьяков Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий базовой кафедрой автоматизированных радиотехнических систем Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

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, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Лукьянец Юрий Филиппович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент базовой кафедры автоматизированных радиотехнических систем Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Victor A. Tretyakov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Basic Department of Automated Radio Systems, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Gennadiy V. Kulikov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Yuriy F. Lukyanets, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Basic Department of Automated Radio Systems, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-43-57>



УДК 577.337; 538.931

Динамика электросолитона в термализованной молекулярной цепи

В.Н. Каданцев^{1,@},

А.Н. Гольцов²,

М.А. Кондаков¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²School of Applied Sciences, Abertay University, Dundee, UK

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

В статье теоретически в квазиклассическом приближении исследуется динамика электросолитона в α -спиральной белковой структуре при наличии внешнего окружения. α -спиральные молекулы белка являются динамически организованными системами, свойства и биологические функции которых обусловлены как особенностями их строения, так и особенностями динамического поведения. Транспорт избыточных электронов вдоль α -спиральных белков определяется специфическими свойствами этих молекул. Благодаря асимметричному распределению плотности электрического заряда в пептидной группе (ПГ), они обладают значительным постоянным электрическим дипольным моментом. Ранее авторами было показано, что в результате взаимодействия с окружением (внутриклеточной средой) в α -спиральных молекулах могут возбуждаться как акустические колебания (Фрелиховский режим), так и возбуждения типа уединенных волн – солитонов (Давыдовский режим). При этом понятие «солитон» применяется не только в строгом математическом смысле, т.е. для полностью интегрируемых гамильтоновых систем, но и для обозначения динамически стабильных нелинейных коллективных образований. Такие солитоны в цепочке ПГ способны захватывать внешний электрон от донора. Динамические уравнения, описывающие движение одномерного акустического солитона с захваченным зарядом (электроном), представляют собой в континуальном приближении самосогласованную систему, состоящую из временного уравнения Шредингера с деформационным потенциалом и неоднородного линейного волнового уравнения для этого потенциала. Эта система, которая в литературе называется уравнениями Захарова, имеет важное общезначимое

значение и, как правило, описывает нелинейное взаимодействие двух физических подсистем: быстрой и медленной. В результате аналитического и численного моделирования показано, что при значениях параметра электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ), превышающих некоторую пороговую величину, избыточный электрон может перемещаться вдоль термализованной цепочки ПГ в форме электросолитона (ЭС). В статье также обсуждаются приложения полученных результатов к описанию механизма эффективного транспорта электрона в квазилинейных белковых макромолекулярных структурах.

Ключевые слова: α -спиральные белки, солитоны, электросолитон, фононы, коллективные возбуждения.

Для цитирования: Каданцев В.Н., Гольцов А.Н., Кондаков М.А. Динамика электросолитона в термализованной молекулярной цепи. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):43-57. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-43-57>

Electrosoliton dynamics in a thermalized molecular chain

Vasiliy N. Kadantsev^{1,@},
Alexey N. Goltsov²,
Mikhail A. Kondakov¹

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²School of Applied Sciences, Abertay University, Dundee, UK

@Corresponding author, e-mail: appl.synergy@yandex.ru

The possibility of the electrosoliton formation in α -helical proteins which represents a localized state of an extra electron bound with the deformation region of the α -helix arising due to the electron interaction with chain of peptide groups is investigated in a quasiclassical approximation. Two possible mechanisms of the formation of collective dynamic modes in the form of Fröhlich collective mode and Davydov soliton were previously suggested by the authors. In this paper, we developed a unified quantum-mechanics approach to describe conditions of the formation of the Fröhlich vibronic state and Davydov soliton in α -helical protein molecules interacting with the environment. The concept of "soliton" is used not only in the strict mathematical sense, i.e. in the case of completely integrable Hamiltonian systems, but also to describe dynamically stable, nonlinear collective structures. Davydov solitons are stable due to a small probability of the dissipation of its energy into thermal energy which provides a high efficiency of soliton transport of energy, charges, and conformation changes in biosystems at a physiological temperature of 310 K.

Electrosolitons can be formed if the value of electron–phonon interaction (EPI) parameter exceeds a certain threshold. One of the most important characteristics of the electrosoliton's state is the coupling energy of a quasi-particle (exciton or electron) with molecular chain deformation, which also determines the soliton stability. Dynamic equations describing the motion of a one-dimensional electrosoliton in the continuum

approximation are a self-consistent system which includes the time-dependent Schrödinger equation with a deformation potential and an inhomogeneous linear wave equation for this potential. This system, known as the Zakharov system, has significance in physics and, generally, describes the nonlinear interaction of two physical subsystems: fast and slow. Zakharov equations have a well-known soliton solution in the hyperbolic secant form, describing the envelope profile of the high-frequency vibrations of a fast subsystem, which can propagate with any subsonic velocity. The suggested mechanism of emergent of macroscopic dissipative structures in the form of electrosolitons in α -helical proteins is discussed in connection with recent experimental data on long-lived collective protein excitation in the terahertz frequency region.

Keywords: α -helical protein, electrosoliton, autolocalization states, hydrogen bonds, phonon, dynamical regimes, soliton.

For citation: Kadantsev V.N., Goltsov A.N., Kondakov M.A. Electrosoliton dynamics in a thermalized molecular chain. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(1):43-57 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-43-57>

Введение

Жизненные процессы в клетках происходят при непосредственном участии белков – гигантских цепочечных молекул, составленных из различных аминокислот и имеющих определенную структуру. Структура белка обеспечивает выполнение им заданного числа функций, поэтому для каждого вида белка имеется определенная структура [1, 2]. Перед биофизикой стоит задача описания строения, свойств и функционирования простейших биологических систем (ферментов, структурных белков и др.), входящих в состав клеток живых организмов. Непрерывное, эффективное снабжение энергией, химическими веществами и электрически заряженными частицами (электронами, протонами) различных подсистем живых организмов – необходимые условия для их функционирования. Многие биологические процессы связаны с переносом энергии и электрических зарядов вдоль белков. Так, например, осуществляется электронный транспорт в фотосинтезирующих системах, по дыхательным путям митохондрий и др. В ряде случаев электроны перемещаются на расстояния в несколько десятков ангстрем. Механизм переноса электронов без значительных потерь на большие расстояния остается пока невыясненным.

Среди поиска различных подходов к решению названных проблем представляет интерес возможность использования методов теории твердого тела, связанных с представлением об элементарных возбуждениях коллективных степеней свободы [3]. Такие возбуждения (коллективные моды) формируются в многокомпонентных конденсированных средах и определяют динамическое поведение соответствующих систем и выполняемые ими функции. Предполагается, что эти задачи могут быть решены на основе знания атомного состава основных биологических элементов (внутриклеточных структур) при учете внутримолекулярных и межмолекулярных взаимодействий и вызываемых ими конформационных изменений макромолекул, а также перемещений энергии, электронов и протонов, как вдоль молекул, так и между ними.

Структура белков и их роль в транспорте энергии и заряда. Многочисленные экспериментальные данные указывают на то, что в белках существует возможность для передачи изменений в электронной структуре или перемещения энергии. Так, Сент-Дьердьи,

установил, что осуществление окислительного процесса пространственно разделенных цитохрома *a*, цитохрома *b* и цитохрома *c* возможно только в случае переноса электрона между ними [3]. Аналогичное явление наблюдалось с ферментом каталазой, в котором четыре геминовые группы связаны с белком. Каталитическая активность трех геминовых групп изменяется, когда к четвертой присоединяется инактивирующий ее реагент. Это означает, что активность фермента каталазы определяется совместным действием всех четырех геминовых групп, т.е. геминовая группа каталазы обладает делокализованной *p*-электронной системой. Для объяснения изложенных результатов Сент-Дьердьи высказал гипотезу [3] о собственной проводимости белков, которая хотя и не подтвердилась, но натолкнула исследователей на мысль о необходимости объяснения биологических проблем с точки зрения квантовой механики, с учетом электронной системы белков. Гипотеза Сент-Дьердьи стимулировала многочисленные экспериментальные и теоретические исследования белков [5–7].

В 1938 г. известный физик П. Иордан [4] высказал предположение о важной роли коллективных свойств биологических макромолекул в осуществлении переноса электронов и энергии бестоковых возбуждений на большие (в молекулярных масштабах) расстояния.

Согласно рентгеноструктурным и прочим данным [2, 5–7] молекулы белков содержат значительные квазиупорядоченные спиралевидные (α -спирали) или складчатые (β -складчатые структуры) участки. Устойчивость этих квазиодномерных периодических структур обуславливается водородными связями между C=O и N–H фрагментами двух пептидных групп O=C–N–H, входящих в различные звенья периодической структуры (рис. 1). Периодичность следования пептидных групп (ПГ) позволяет использовать методы теории твердого тела для исследования энергетической структуры белков. Однако для решения проблемы, например, проводниковых свойств белков, потребуется провести еще немало теоретических исследований, чтобы удовлетворительно объяснить различные свойства белков и понять их биологическую роль.

Представления о коллективных возбуждениях в биомacroмолекулах широко используются при исследовании одного из центральных вопросов биоэнергетики – выяснении причин высокой эффективности переноса энергии, электронов и протонов в пределах одной макромолекулы и между молекулами [9–16]. Теория солитонного «транспорта» энергии и зарядов в α -спиральных белках развита в работах А.С. Давыдова [12–14]. Теоретическим исследованиям солитонов в молекулярных системах посвящено большое количество работ (с библиографией можно ознакомиться в [15, 16, 22]). В подавляющем большинстве этих работ молекулярные системы рассматриваются как изолированные физические системы (без учета теплового движения и взаимодействия с окружающей средой), структура которых подобна структуре их биологических оригиналов (аналогов). Однако, биологические системы различного уровня организации, являются открытыми системами и их функционирование (сложная динамика) во многом определяется взаимодействием с окружением. Так, в [17–19] показано, что в α -спиральных белках могут формироваться коллективные возбуждения солитонного типа (вибросолитоны), обусловленные «накачкой» фононами, поступающими в биомолекулярную систему из ее окружения.

В данной статье рассматриваются некоторые теоретические представления о коллективных возбуждениях в α -спиральной белковой макромолекуле, взаимодействующей

с окружающей средой, при наличии в системе избыточной заряженной частицы. Цель настоящей работы – теоретически исследовать возможность захвата «избыточного» заряда в результате взаимодействия коллективных возбуждений (мод) в цепи пептидных групп – вибросолитонов, с электроном. Такие коллективные возбуждения, представляющие собой связанное состояние электрона с солитоном фононного (вибронного) типа в полипептидной цепи, могут осуществлять «транспорт» электрических зарядов в биологических системах.

Результаты и их обсуждение

Модель взаимодействия электрона со смещениями молекул в полипептидной цепочке

При описании движения заряда, перемещающегося в мягкой молекулярной структуре, в случае сильной связи со смещениями молекул из равновесных положений нельзя применять теорию возмущений. Отказ от использования теорий возмущений приводит к описанию движения заряда с помощью нелинейных уравнений. Их решение показывает, что движение заряда в этом случае сопровождается локальной деформацией решетки и в одномерной цепочке описывается волновой функцией в виде уединенной волны – солитона.

В целом ряде работ [12–19] для описания движения заряда, в качестве модели рассматривается одномерная цепочка, образованная одинаковыми молекулами, расположенными на расстоянии a друг от друга. Повторяющиеся группы молекул обладают постоянными, направленными вдоль цепочки дипольными моментами. Такая система моделирует одну из цепей в α -спиральной белковой молекуле или ацетанилиде (АЦН), в которых пептидные группы (молекулы) соединяются водородными связями. Распределение электрических зарядов на атомах, входящих в состав пептидной группы (рис. 1а), таково, что каждая группа обладает значительным (порядка 3.5 Д) дипольным моментом. Схема расположения постоянных электрических дипольных моментов в α -спиральной молекуле белка изображена на рис. 1б.

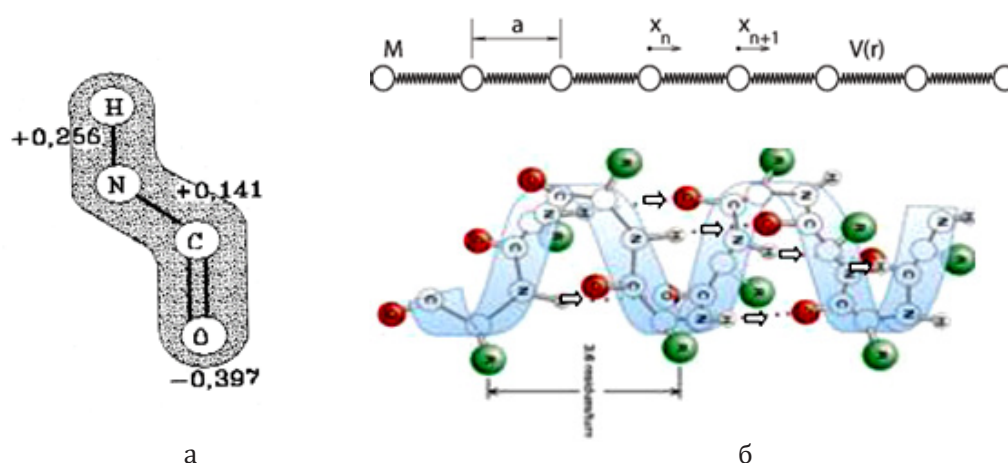


Рис. 1. Распределение электрических зарядов на атомах пептидной группы (а);

Модель одномерной молекулярной цепи показана на верхнем рисунке (б).

Все молекулы (пептидные группы) расположены вдоль оси x на расстоянии a друг от друга, имеют одинаковую массу M . Взаимодействие между молекулами описывается одним потенциалом $V(r)$, где r – изменение расстояния между молекулами.

Направления дипольных моментов указано стрелками на нижнем рисунке [13, 18].

В работе [13] показано, что в поле такого диполя электрон может находиться в связанном состоянии с энергией связи порядка 0.9 эВ. В каждой цепочке водородных связей в спиральном белке пептидные группы образуют периодически повторяющиеся потенциальные ямы для внешнего заряда.

Для электрона, попавшего в цепочку, перекрывание его волновых функций в соседних ямах приводит к коллективизации этих состояний и формированию зоны проводимости [7, 12]. Следует отметить, что перекрывание волновых функций зарядов в различных цепочках, менее существенно и им можно пренебречь. Это позволяет рассматривать движение заряда в каждой цепочке α -спирального белка (или АЦН) независимо.

Показано, что в такой системе в результате *взаимодействия электрона с вызванной им же локальной деформацией цепи* может образовываться автолокализованное состояние – *давидовский электросолитон* (ДЭС) [12, 14–16].

Одной из наиболее важных характеристик автолокализованного состояния является энергия связи квазичастицы (электрона) с деформацией молекулярной цепи, определяющей, в том числе, и стабильность солитона. ДЭС являются достаточно стабильными из-за малой вероятности диссипации их энергии в тепловую, что обеспечивает высокую эффективность солитонного транспорта энергии, конформационных изменений и электрических зарядов в биосистемах при физиологических температурах порядка 310 К.

Предполагается, что постоянные дипольные электрические моменты ПГ достаточно жесткие, так что *под влиянием электрона* происходят только смещения их равновесных положений. Такой «дозвуковой» давидовский электросолитон, может формироваться только, если групповая скорость указанного волнового пакета V_{sol} меньше скорости продольного звука V_0 в цепи без электрона: $V_{sol} < V_0$. Здесь $V_0^2 = a^2 \left(\frac{\chi}{M} \right)$, а χ – продольная упругость цепи [15, 16].

Рассмотрим далее энергетические состояния одного лишнего электрона в цепочке пептидных групп. При отсутствии внешнего магнитного поля спин электрона можно не учитывать. В приближении эффективной массы такая система характеризуется гамильтонианом [15]

$$H = H_e + H_{ph} + H_{int},$$

где

$$H_e = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(E_0 - \frac{\hbar^2}{m^* a^2} \right) |\phi_n|^2 - \frac{\hbar^2}{2m^* a^2} (\phi_{n+1} + \phi_{n-1}) \phi_n, \quad (1)$$

$$H_{int} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma_1 |\phi_n|^2 (U_{n+1} + U_{n-1}) + \sigma_2 (U_n + U_{n-1}) (\phi_n^* \phi_{n-1} + \phi_{n-1}^* \phi_n), \quad (2)$$

$$H_{ph} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{M \dot{U}_n^2}{2} + \varphi (U_{n+1} - U_n). \quad (3)$$

Здесь U_n – смещение n -ой пептидной группы из своего положения равновесия, $m^* = \frac{\hbar^2}{2a^2 I}$ – эффективная масса электрона в зоне проводимости, выражающаяся через

интеграл обменного взаимодействия I . E_0 – уровень отсчета энергии электрона в недеформированной цепи (энергия дна зоны проводимости); $\Delta E = \frac{2\hbar^2}{m^* a^2}$, σ_1 – нерезонансный параметр нелинейности электрон-фононного взаимодействия (ЭФВ), а $\sigma_2 = \frac{3\hbar^2}{2m^* a^3}$ – резонансный параметр нелинейности ЭФВ. Функция $\psi(\rho)$ характеризует потенциал водородной связи; ρ – деформация водородной связи. ϕ_n – волновая функция электрона в узельном представлении, нормированная условием

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |\phi_n|^2 = 1. \quad (4)$$

Если отсчитывать энергию электрона от уровня $\left(E_0 - \frac{\hbar^2}{m^* a^2}\right)$, то гамильтоновой функции (1) соответствует следующая система уравнений движений

$$i\hbar\dot{\phi}_n = -I(\phi_{n+1} + \phi_{n-1}) + \sigma_1\phi_n(\rho_n + \rho_{n-1}) + \sigma_2(\rho_{n-1}\phi_{n-1} + \rho_n\phi_{n+1}), \quad (5)$$

$$M\ddot{U}_n = \psi(\rho_n - \rho_{n-1}) + \sigma_1(|\phi_{n+1}|^2 - |\phi_{n-1}|^2) + \sigma_2[\phi_n(\phi_{n+1}^* - \phi_{n-1}^*) + \phi_n^*(\phi_{n+1} - \phi_{n-1})] \dots \quad (6)$$

Здесь $\rho_n = U_{n+1} - U_n$ – деформация n -ой водородной связи.

В результате теоретических расчетов [15, 16] энергии сродства электрона и ширины зоны проводимости ΔE получены следующие значения:

$$\Delta E = 2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}, I = 5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж и } \sigma_2 = 3.3 \cdot 10^{-10} \text{ Н}.$$

Теоретический расчет величины параметра деформационного потенциала дает значение $\sigma_1 = (4.15 \div 4.36) \cdot 10^{-10} \text{ Н}$, что практически совпадает с экспериментальной оценкой этого параметра [13–15]. При этом и система уравнений (5)–(6) и расчет параметров цепочки справедливы при условии, что постоянные дипольные моменты пептидных групп достаточно жесткие, так что под влиянием электрона происходит только смещение их равновесных положений. Выбранные таким образом параметры молекулярной системы (соответствующей полипептидной цепочке в α -спиральном белке) определяют максимальную скорость избыточного электрона в ней: $V_e = \frac{2aI}{\hbar} = 4.27 \cdot 10^5 \text{ м/с}$, что на два порядка превышает скорость продольного звука в такой цепочке V_{ac} . Это свидетельствует о том, что система «цепочка – электрон» является жесткой – характерные времена фоновой системы на два порядка превосходят характерное время динамики электрона.

При наличии большого ангармонизма, наблюдаемого в некоторых одномерных молекулярных системах, могут формироваться возбуждения типа акустических солитонов [14, 15]. Такие возбуждения возникают при значительном смещении конечных молекул цепочки из равновесных положений (сжатии). Образовавшийся при этом акустический солитон представляет собой перемещающиеся вдоль молекулярной цепочки локальные смещения молекул из положений равновесия. В результате численного моделирования [15, 16] показано (см. рис. 2), что при рассматриваемом способе возбуждения цепочки

(начальной деформации) в ней формируется акустический сверхзвуковой (со скоростью солитон, способный переносить внешний электрон.

Вероятность P захвата электрона акустическим солитоном и образования связанного состояния зависит от параметров σ_1 и σ_2 . Результаты расчетов величины P от указанных параметров приведены в таблице [15, 16].

Из приведенной таблицы видно, что в процессе захвата электрона акустическим солитоном важную роль играют оба механизма электрон-фононного взаимодействия, учтенные в гамильтониане H_{int} (3): нерезонансный, характеризуемый σ_1 и резонансный, приводящий к понижению дна зоны проводимости для избыточного электрона в цепочке, характеризуемый параметром σ_2 . Однако в подавляющем большинстве работ, посвященных данному вопросу, второй член в (3) не учитывается. Таким образом, при значениях параметров ЭФВ $\sigma_1 = (4.15 \div 4.36) \cdot 10^{-10}$ Н, полученных путем аналитических расчетов, изменения энергии взаимодействия избыточного электрона с зарядами (жесткими диполями) мягкой полипептидной цепочки при малых смещениях молекул из равновесных положений, и $\sigma_2 = 3.33 \cdot 10^{-10}$ Н захват избыточного электрона акустическим солитоном в рассматриваемой цепочке происходит с вероятностью $P \sim 0.27$.

Из-за жесткости системы описанный процесс образования связанного состояния «электрон – акустический солитон» возможен только в случае, если одновременно с попаданием электрона в решетку образуется значительная локальная деформация, приводящая к образованию акустического солитона. В противном случае электрон будет перемещаться по цепочке в виде расплывающегося волнового пакета.

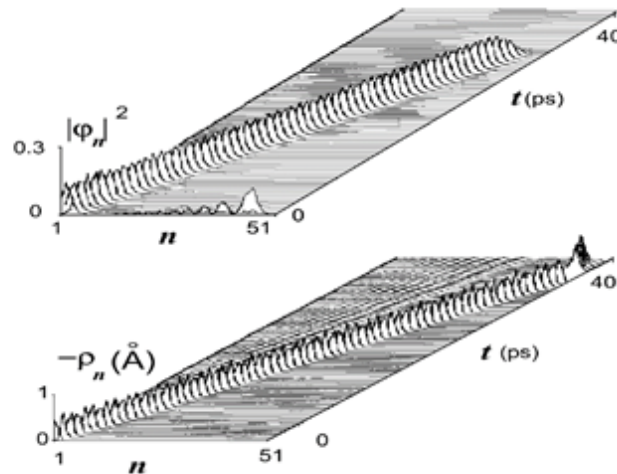


Рис. 2. Результаты расчета захват избыточного электрона, помещенного в начальный момент времени на первую молекулу цепочки, акустическим солитоном с энергией $E = 0.49$ эВ. Солитон возбуждается смещением в начальный момент времени первой молекулы из положения равновесия [15, 16].

Зависимость вероятности P захвата электрона акустическим солитоном от величины параметров σ_1 и σ_2 (Н)

σ_1	0	$1 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$
σ_2	0	0	0	0	$0.03 \cdot 10^{-10}$	$0.07 \cdot 10^{-10}$
P	0.07	0.10	0.17	0.23	0.26	0.30

Для избыточного электрона, попавшего в периодическую одномерную решетку молекул, взаимодействующих с электроном, наличие акустического солитона проявится в виде дополнительной энергии электрона (деформационного потенциала). При этом акустический солитон представляет собой «потенциальную яму» для электрона.

На рис. 3 показаны решения системы уравнений – волновые функции электрона в потенциальной яме, создаваемой акустическим солитоном, соответствующие пяти нижним уровням энергии ($L = 1, 2, 3, 4, 5$).

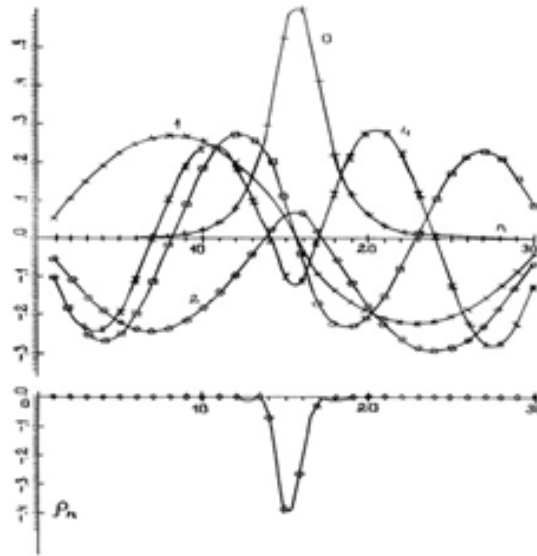


Рис. 3. Волновые функции ϕ_n пяти первых (с $L = 1, 2, 3, 4, 5$) состояний электрона в потенциальной яме, создаваемой акустическим солитоном, и смещений молекул ρ_n в области возбуждения.
 $\sigma_1 = 4.5 \cdot 10^{-10}$ Н, $\sigma_2 = 3.3 \cdot 10^{-10}$ Н [15, 16].

Захват избыточного электрона акустическим солитоном в цепочке ПГ, взаимодействующей с окружением

Теоретическое исследование динамических свойств альфа-спирального белка, взаимодействующего с окружением [17–19], показывает, что неустойчивость, вызываемая в цепочке ПГ изменением внешних параметров – свойств окружающей среды, может приводить к образованию новых макроскопических пространственно-временных структур системы, в частности, акустических солитонов вибронного типа [9], формирующихся в цепочках водородных связей в результате фонон-фононных взаимодействий. Уравнение для фононных мод $\beta_s(z, t)$ в этом случае, в континуальном пределе получено в виде [18]:

$$i\hbar \frac{\partial \beta_s(z, t)}{\partial t} + \hbar a^2 I_s \frac{\partial^2 \beta_s(z, t)}{\partial z^2} - E_s \beta_s(z, t) + Q_s |\beta_s(z, t)|^2 \beta_s(z, t) = F_s(z, t), \quad (7)$$

где

$$E_s = \varepsilon_{0s} - e_{0s} - \frac{i\hbar\gamma_s}{2} = E_{s0} - \frac{i\hbar\gamma_s}{2} \quad \text{и} \quad Q_s = \frac{N^2 |V_s|^2}{\Omega_t}.$$

Решение этого уравнения может быть представлено в виде

$$\beta_s(z, t) = \beta_s(\xi) = \Phi_s(\xi) \exp \left\{ i(q_s z - \omega_s t) - \frac{\gamma_s}{2} t \right\}. \quad (8)$$

Здесь $\xi = z - z_0 - V_s t$; V_s – скорость перемещения возбуждения вдоль цепочки пептидных групп, а вещественная амплитуда Φ_s должна удовлетворять условию нормировки:

$$\frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_s^2(\xi) d\xi = N_0. \quad (9)$$

При условии малого затухания $\gamma_s \approx 0$, когда флуктуации также малы, ими можно пренебречь и уравнение для фоновых мод принимает следующий вид:

$$\left[\Xi_s + \hbar a^2 I_s \frac{\partial^2}{\partial z^2} + Q_s |\Phi_s(\xi)|^2 \right] \Phi_s(\xi) = 0, \quad (10)$$

где Ξ_s – спектральный параметр, связанный с энергией фонона соотношением

$$\hbar \omega_s = \Xi_s + E_s + \hbar q^2 a^2 I_s. \quad (11)$$

Это уравнение, представляет собой нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) и для любого, не равного нулю Q_s имеет нормированное частное решение в виде уединенной волны (солитона), распространяющейся вдоль оси z . При наличии диссипации $\gamma_s \neq 0$ решение уравнения (10), с учетом соотношений (7)–(8), записывается в следующем виде:

$$\beta_s(\xi) = \left\{ \frac{a \theta_0 N_0}{2} \right\}^{1/2} \frac{\exp[i(q_s z - \omega_s t)]}{\text{ch}[\theta_0 e^{-\gamma_s t} (z - z_0 - V_{sol} t)]}, \quad (12)$$

где $N = N_0 e^{-\gamma_s t}$, а область, занятая уединенной волной – ширина солитона, определяется соотношением:

$$d(t) = \frac{\pi}{\theta_0} e^{\gamma_s t}. \quad (13)$$

При условии малости диссипации в системе и отсутствии связанных с нею флуктуаций указанные решения принимают вид:

$$\Phi_s(\xi) = \left\{ \frac{a \theta_0 N_0}{2} \right\}^{1/2} \frac{1}{\text{ch}[\theta_0 e^{-\gamma_s t} (z - z_0 - V_{sol} t)]}, \quad (14)$$

где $\theta_0 = \frac{Q_s N_0}{4 \hbar a I_s}$ и z_0 – центр солитона.

В этом случае время жизни динамических режимов цепочки пептидных групп, соответствующих нетривиальным решениям, меньше обратных времен релаксации, т.е. $\tau_s < \gamma_s^{-1}$.

Для избыточного электрона, попавшего в рассматриваемую периодическую одномерную решетку молекул, взаимодействующих с электроном, наличие акустического солитона проявится, как отмечалось выше, в виде дополнительной энергии электрона (деформационного потенциала). В результате, электрон может быть «захвачен» акустическим солитоном и в таком связанном состоянии перемещаться вместе с ним в дальнейшем. Возможность такого захвата исследовалась рядом авторов аналитически на континуальных моделях цепочек с различным видом ангармонизма [9, 13–16], но без учета тепловых колебаний и взаимодействий электрона с окружением белка. Некоторые результаты численного моделирования захвата и переноса зарядов акустическими солитонами, в том числе и приведенные выше, указывают на устойчивость обсуждаемых процессов по отношению к внешним возмущениям при физиологических значениях параметров окружающей среды.

Рассмотрим энергетические состояния одного лишнего электрона в цепочке пептидных групп. В приближении эффективной массы такая система характеризуется гамильтонианом (1)–(3).

При слабом влиянии электрона на локальные деформации цепочки в процессе захвата электрона акустическим солитоном важную роль играет нерезонансный механизм электрон-фононного взаимодействия в гамильтониане H_{int} (3), характеризуемый параметром ЭФВ $\sigma_1 = (4.15 \div 4.36) \cdot 10^{-10}$ Н, который определяет изменения энергии взаимодействия избыточного электрона с зарядами (жесткими диполями) мягкой полипептидной цепочки при малых смещениях молекул из равновесных положений.

Состояние избыточного электрона, захваченного солитоном, в приближении эффективной массы электрона m^* , описывается функцией $\phi_e(z, t)$ удовлетворяющей уравнению Шредингера в континуальном приближении:

$$i\hbar\dot{\phi}_e(z, t) - \left\{ \varepsilon_0 - \frac{\hbar^2}{2m^*a^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + W(z, t) \right\} \phi_e(z, t) = 0, \quad (15)$$

где $W(z, t)$ – оператор деформационного потенциала без учета обратного влияния электрона на акустический солитон можно представить в виде

$$W(\xi) = W(z, t) = -\sigma |\beta_s(z, t)|^2 < 0 \quad (16)$$

или, при условии малости диссипации

$$W(\xi) = -\sigma |\Phi_s(\xi)|^2 < 0. \quad (17)$$

Решение уравнения (15) будем искать в виде модулированной волны:

$$\phi_e(z, t) = \Phi_e(x) \exp[i(q_s z - \omega_s t)]. \quad (18)$$

Подставив уравнение (17) в (15) для действительной части амплитуды, получим следующее уравнение:

$$\left[\frac{\hbar^2}{2m_T} \frac{d^2}{d\xi^2} + \varepsilon + W(\xi) \right] \Phi_e(\xi) = 0. \quad (19)$$

Энергия электрона, взаимодействующего с локальной деформацией цепи определяется из соотношения:

$$\varepsilon = \hbar\omega - \varepsilon_0 - \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} (1 - \tau) - m_T \frac{V_s^2}{2}, \quad (20)$$

где $k = m^*V/\hbar$ и $\hbar\omega$ – энергия электрона в лабораторной системе координат, τ – фактор Дебая-Валлера, учитывающий влияние взаимодействия цепочки с термостатом при температуре T , а $m_T = \frac{m^*}{\tau}$ – эффективная масса «одетого» электрона, зависящая от температуры T .

После подстановки в уравнение (17) выражения $\Phi_s(\xi)$ определяемого соотношениями (9) и (14), получим следующее выражение для деформационного потенциала:

$$W(\xi) = -\frac{\sigma a \theta_0 N_0}{2 \operatorname{ch}^2(\theta_0 \xi)} = \frac{D}{\operatorname{ch}^2(\theta_0 \xi)} < 0. \quad (21)$$

Состояние электрона в потенциальной яме такого вида (рис. 4) рассматривалось Ландау и Лифшицем [20].

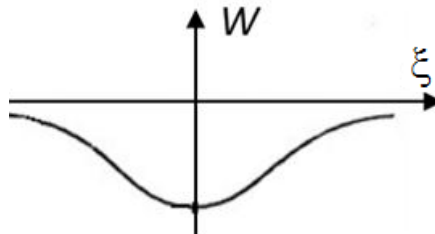


Рис. 4. Деформационный потенциал $W(\xi)$ (21).

Ими показано, что состояние электрона характеризуется спектром отрицательных энергий, определяемым соотношением:

$$\varepsilon_n = -\frac{\hbar^2 \theta_0^2}{2m_T} (\nu - n)^2, \quad (22)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots, n_{\max}$;

Таким образом, имеется конечное число уровней энергии электрона, захваченного акустическим солитоном, с квантовым числом n таким, что:

$$n_{\max} \leq \nu \equiv \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{1 + 8m_T D}{\hbar^2 \theta_0^2}} - 1 \right), \quad (23)$$

при этом нижайший энергетический уровень

$$\varepsilon_0 = -\frac{\hbar^2 \theta_0^2}{2m_T} v^2 \quad (24)$$

характеризуется волновой функцией

$$\Phi_{0e}(\xi) = a\theta_0 \Gamma(v + \frac{1}{2}) / \sqrt{\pi} \Gamma(v) \text{ch}^v(\theta_0 \xi). \quad (25)$$

Здесь Γ – гамма-функция.

При $a = 5 \text{ \AA}$ энергия нижайшего электронного состояния в яме имеет значение

$$\varepsilon_0 \simeq -\frac{am}{2m_T} \theta_0^2 v^2, \quad (26)$$

где m – масса свободного электрона. Захват электрона акустическим солитоном возможен только в том случае, когда $|\varepsilon_0|$ превышает среднюю энергию тепловых колебаний.

Параметры, определяющие состояние захваченного акустическим солитоном внешнего электрона, зависят от температуры цепочки через эффективную массу «одетого» электрона, которая растет с ростом T [15, 21].

Заключение

Результаты проведенного теоретического исследования динамических свойств α -спирального белка, взаимодействующего с окружением, показывают, что в результате захвата «избыточного» заряда деформацией цепи – акустическим солитоном, могут формироваться новые макроскопические структуры. Такие коллективные возбуждения, представляющие собой связанные состояния электрона с солитоном фононного типа в полипептидной цепи, могут осуществлять «транспорт» электрических зарядов в биологических системах.

Приведенные выше соотношения выполняются только при условии, когда взаимодействие акустического солитона с электроном слабо влияет на форму солитона. Однако вопрос о реализации этого и других условий, необходимых для переноса избыточного электрона акустическими солитонами в реальных системах, требует специального исследования.

В результате связи электрона с локальной деформацией рассматриваемой цепи его масса увеличивается, а энергия понижается по отношению к дну зоны проводимости. Это приводит к стабилизации движения электрона, особенно в мягких цепочках при сильной связи электрона с деформацией цепи – акустическим солитоном. При этом электрон движется со скоростью, меньшей скорости продольного звука, не теряя энергию на излучение фононов (эффект Черенкова). Такое перемещение электрона в некотором смысле аналогично движению электрона в сверхпроводящем состоянии металла. На возможность существования в одномерной системе «сверхпроводящего эффекта без спаривания», обусловленного взаимодействием электронов с полем смещений молекул впервые указал Г. Фрелих [10, 11]. Отметим, что до недавнего времени экспериментальное наблюдение таких коллективных возбуждений не представлялось возможным. В настоящее время, в результате бурного раз-

вития экспериментальной техники, разработаны методы исследования, которые становятся важными платформами для фундаментальной проверки отдельных проблем квантовой механики, гравитации, динамики наноструктур и микроорганизмов [23, 24].

Литература:

1. Волькенштейн М.В. Биофизика. СПб.: Лань, 2008. 608 с. ISBN 978-5-8114-0851-1
2. Сердюк И., Заккаи Н., Заккаи Дж. Методы в молекулярной биофизике: структура, функция, динамика: учебное пособие. В 2-х т. Т. 1. М.: КДУ, 2009. 568 с. ISBN 978-5-98227-453-3
3. Szent-Gyorgyi A. Bioenergetics. New York: Acad. press, 1957. 143 p.
4. Jordan P. Über die physikalische Structure organischer Riesenmoleküle. *Naturwissenschaften*. 1938;26(42):693-694. <https://doi.org/10.1007/BF01606595>
5. Атанасов Б.П., Постникова Г.Б., Садыков Ю.Х., Волькенштейн М.В. Изучение переноса электронов в гемопroteинах. *Молекулярная биология*. 1977;11(3):537-544.
6. Hoi W.G.J., Van Duijnen P.T., Berendsen H.J.C. The alpha-helix dipoles and the properties of proteins. *Nature*. 1978;273:443-446. <https://doi.org/10.1038/273443a0>
7. Украинский И.И., Миронов С.И. О природе зоны проводимости в пептидных цепях. *Препринт АН УССР. ИТФ-78-61р*. Киев: ИТФ, 1978. 18 с.
8. Takano T., Swanson R., Kallai O.B., Dickerson R.E. Conformational changes upon reduction of cytochrome c. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 1972;36:397-404. <https://doi.org/10.1101/SQB.1972.036.01.051>
9. Takeno S. Vibron solitons in one-dimensional molecular crystals. *Prog. Theor. Phys.* 1984;71(2):395-398. <https://doi.org/10.1143/PTP.71.395>
10. Frohlich H. On the theory of superconductivity: the one-dimensional cases. *Proc. Roy. Soc.* 1954;223(1154):296-305. <https://doi.org/10.1098/rspa.1954.0116>
11. Frohlich H. Electron in lattice fields. *Advance in Phys.* 1954;3(11):325-361. <https://doi.org/10.1080/00018735400101213>
12. Davydov A.S. Influence of electron-phonon interaction on the motion of an electron in a one-dimensional molecular system. *Theor. Math. Phys.* 1979;40(3): 831-840. <https://doi.org/10.1007/BF01032070>
13. Turner I.E., Anderson Y.E., Pox K. Energy eigenvalues and eigen-functions for an electron in an electric-dipole field. *Phys. Rev.* 1968;174(1):81-89. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.174.81>
14. Давыдов А.С. Квантовая теория движения квазичастицы в молекулярной цепи с учетом тепловых колебаний. Киев: ИТФ, 1985. 37 с.
15. Лупичев Л.Н., Савин А.В., Каданцев В.Н. Синергетика молекулярных систем. Динамические свойства дисперсионных структур. LAMBERT Academic Publishing, 2012. 396 с. ISBN-13978-3-659-22114-9.
16. Lupichev L.N., Savin A.V., Kadantsev V.N. Synergetics of Molecular Systems. Springer Series in Synergetics. Springer International Publishing; 2015. 332 p. ISBN 978-3-319-08194-6. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08195-3>
17. Kadantsev V.N., Kondakov M.A. Collective excitations in α -helix protein molecule interacting with environment. International Forum on Chemical, Biological, Agricultural, Pharmacy and Health Sciences: Conference Proceedings, May 31th, 2017, Madrid, Spain: Scientific public organization «Professional science»; 2017. P. 164
18. Каданцев В.Н., Гольцов А.Н. Коллективные возбуждения в альфа-спиральной молекуле белка. *Российский технологический журнал*. 2018;6(2):32-45. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-32-45>
19. Kadantsev V.N., Goltsov A. Collective excitations in alpha-helical protein structures interacting with environment. *BioRxiv*. 2019. <https://doi.org/10.1101/457580>
20. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Физматгиз, 1963. 702 с.
21. Ландау Л.Д., Пекар С.И. Эффективная масса полярона. *ЖЭТФ*. 1948;18:419.
22. Давыдов А.С. Солитоны в молекулярных системах. Киев: «Наукова думка», 1984. 288 с.
23. Pettit R.M., Ge W., Kumar P., Luntz-Martin D.R., Schultz J.T., Neukirch L.P., Bhattacharya M., Vamivakas A.N. An optical tweezer phonon laser. *Nat. Photonics*. 2019;13(6):402-405 <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0395-5>
24. Romero-Isart O., Pflanzner A.C., Blaser F., Kaltenbaek R., Kiesel N., Aspelmeyer M., Cirac J.I. Large quantum superpositions and interference of massive nanometer-sized objects. *Phys. Lett.* 2011;107(2):Article No. 020405. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.020405>

References:

1. Vol'kenshtein M.V. *Biofizika* (Biophysics). St. Petersburg: Lan'; 2008. 608 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8114-0851-1
2. Serdyuk I., Zakakai N., Zakakai Dzh. *Metody v molekulyarnoi biofizike: struktura, funktsiya, dinamika: uchebnoe posobie: v 2-kh t.* (Methods in molecular biophysics: structure, function, dynamics: a training manual: in 2 v.). T. 1. Moscow: KDU; 2009. 568 p. (in Russ.). ISBN 978-5-98227-453-3.
3. Szent-Gyorgyi A. Bioenergetics. New York: Acad. Press; 1957. 143 p.
4. Jordan P. Über die physikalische Structure organischer Riesenmoleküle. *Naturwissenschaften*. 1938;26(42):693-694. <https://doi.org/10.1007/BF01606595>
5. Atanasov B.P., Postnikova G.B., Sadykov Yu.Kh., Vol'kenshtein M.V. An investigation of electron transport in hemoproteins. *Molekulyarnaya biologiya = Molecular biology*. 1977;11(3):537-544 (in Russ.)

6. Hoi W.G.J., Van Duijnen P.T., Berendsen H.J.C. The alpha-helix dipoles and the properties of proteins. *Nature*. 1978;273:443-446. <https://doi.org/10.1038/273443a0>
7. Ukrainskii I.I., Mironov S.I. *O prirode zony provodimosti v peptidnykh tsepyakh* (On the nature of the conduction band in peptide chains). Preprint AN USSR. ITF-78-6Ip. Kiev: ITF; 1978. 18 p. (in Russ.)
8. Takano T., Swanson R., Kallai O.B., Dickerson R.E. Conformational changes upon reduction of cytochrome c. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.* 1972;36:397-404. <https://doi.org/10.1101/SQB.1972.036.01.051>
9. Takeno S. Vibron solitons in one-dimensional molecular crystals. *Prog. Theor. Phys.* 1984;71(2):395-398. <https://doi.org/10.1143/PTP.71.395>
10. Frohlich H. On the theory of superconductivity: the one-dimensional cases. *Proc. Roy. Soc.* 1954;223(1154):296-305. <https://doi.org/10.1098/rspa.1954.0116>
11. Frohlich H. Electron in lattice fields. *Advance in Phys.* 1954;3(11):325-361. <https://doi.org/10.1080/00018735400101213>
12. Davydov A.S. Influence of electron-phonon interaction on the motion of an electron in a one-dimensional molecular system. *Theor. Math. Phys.* 1979;40(3): 831-840. <https://doi.org/10.1007/BF01032070>
13. Turner I.E., Anderson Y.E., Pox K. Energy eigenvalues and eigenfunctions for an electron in an electric-dipole field. *Phys. Rev.* 1968;174(1):81-89. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.174.81>
14. Davydov A.S. *Kvantovaya teoriya dvizheniya kvazichastitsy v molekulyarnoi tsepi s uchetom teplovykh kolebaniy* (A quantum theory of the motion of a quasiparticle in a molecular chain, taking into account thermal vibrations). Kiev: ITF; 1985. 37 p. (in Russ.)
15. Lupichev L.N., Savin A.V., Kadantsev V.N. *Sinergetika molekulyarnykh sistem. Dinamicheskie svoystva dispersionnykh struktur* (Synergetics of molecular systems. Dynamic properties of dispersion structures). LAMBERT Academic Publishing; 2012. 396 p. (in Russ.). ISBN-13978-3-659-22114-9.
16. Lupichev L.N., Savin A.V., Kadantsev V.N. *Synergetics of Molecular Systems*. Springer Series in Synergetics. Springer International Publishing; 2015. 332 p. ISBN 978-3-319-08194-6. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08195-3>
17. Kadantsev V.N., Kondakov M.A. Collective excitations in α -helix protein molecule interacting with environment. International Forum on Chemical, Biological, Agricultural, Pharmacy and Health Sciences: Conference Proceedings, May 31th, 2017, Madrid, Spain: Scientific public organization «Professional science»; 2017. P. 164
18. Kadantsev V.N., Goltsov A.N. Collective excitations in alpha-helical protein molecule. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(2):32-45 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-32-45>
19. Kadantsev V.N., Goltsov A. Collective excitations in alpha-helical protein structures interacting with environment. *BioRxiv*. 2019. <https://doi.org/10.1101/457580>
20. Landau L.D., Lifshits E.M. *Kvantovaya mekhanika* (Quantum mechanics). Moscow: Fizmatgiz; 1963. 702 p. (in Russ.)
21. Landau L.D., Pekar S.I. The effective mass of the polaron. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1948;18:419. (in Russ.)
22. Davydov A.S. Solitons in molecular systems. Kiev: Naukova dumka; 1984. 288 p. (in Russ.)
23. Pettit R.M., Ge W., Kumar P., Luntz-Martin D.R., Schultz J.T., Neukirch L.P., Bhattacharya M., Vamivakas A.N. An optical tweezer phonon laser. *Nat. Photonics*. 2019;13(6):402-405 <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0395-5>
24. Romero-Isart O., Pflanzner A.C., Blaser F., Kaltenbaek R., Kiesel N., Aspelmeyer M., Cirac J.I. Large quantum superpositions and interference of massive nanometer-sized objects. *Phys. Lett.* 2011;107(2):Article No. 020405. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.020405>

Об авторах:

Каданцев Василий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры биокрибернетических систем и технологий Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0001-9205-652>

Гольцов Алексей Николаевич, доктор физико-математических наук, лектор Школы Прикладных Наук в Абертай Университете, Великобритания (UK, DD1 1HG, Dundee, Bell Street). Scopus Author ID: 56234051200, ORCID: 0000-0001-6725-189X.

Кондаков Михаил Алексеевич, аспирант кафедры биокрибернетических систем и технологий Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vasily N. Kadantsev, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Biocybernetic Systems and Technologies, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0001-9205-652>

Alexey N. Goltsov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Lecturer, School of Applied Sciences, Abertay University, Dundee, UK. Scopus Author ID: 56234051200, ORCID: 0000-0001-6725-189X.

Mikhail A. Kondakov, Postgraduate Student of the Department of Biocybernetics Systems and Technologies in the Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-58-66>



УДК 53.084

Лазерно-индуцированная спиновая динамика в пленке железо-иттриевого граната, легированного ионами Si

С.В. Овчаренко¹,
М.С. Гапонов¹,
Н.А. Ильин¹,
М.В. Логунов²,
Anhua Wu³,
Е.Д. Мишина^{1,@}

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, Москва 125009, Россия

³Шанхайский институт керамики, Китайская академия наук, Шанхай 200050, Китайская Народная Республика

@Автор для переписки, e-mail: mishina_elena57@mail.ru

Непрерывный рост объема хранимых и обрабатываемых данных проводит к ужесточению требований к носителям информации. Наиболее распространенная в настоящее время технология хранения информации основана на магнитных материалах, где информации в виде «0» и «1» ставится в соответствие локальное направление намагниченности, определяемое внешним магнитным полем, создаваемым устройством записи. Известно, что данный подход имеет фундаментальное ограничение по скорости записи, которое почти достигнуто. Также ужесточаются требования к энергоэффективности носителей данных. Данные обстоятельства приводят к развитию альтернативных подходов к записи информации. Один из таких подходов был продемонстрирован в области сверхбыстрого оптомагнетизма, которая бурно развивается в последние 20 лет. Этот подход заключается в записи информации короткими оптическими импульсами без приложения внешнего магнитного поля. Однако он требует фундаментальных исследований физических процессов, а также материалов, в которых возможно управление намагниченностью короткими оптическими импульсами. В данной работе рассматривается спиновая динамика в магнитном диэлектрике: пленке железо-иттриевого граната легированного кремнием. Исследования проводились с помощью методики накачки – зондирования на временном диапазоне до 800 нс. Размер пятна составил 30 мкм,

длительность оптического импульса 35 фс, плотность мощности излучения накачки около 50 мДж/см². Показано, что изменение констант магнитокристаллической анизотропии вследствие воздействия на структуру возбуждающим импульсом вызывает долготзатухающую прецессию намагниченности с периодом порядка 200 пс. Получены и проанализированы зависимости амплитуды, фазы и затухания прецессии от величины внешнего магнитного поля в диапазоне до 1.84 кЭ. Изученные процессы могут быть рассмотрены в рамках модели Ландау-Лифшица-Гилберта, и представлять интерес для оптического переключения намагниченности, а также создания различных спинтронных устройств. Показано, что пленки железо-иттриевого граната, легированного кремнием, являются перспективным материалом для магнитных носителей информации на основе сверхбыстрого оптомагнетизма.

Ключевые слова: фотоиндуцированная сверхбыстрая динамика, спинтроника, доменная структура, оптическое управление намагниченностью, фемтосекундное лазерное излучение.

Для цитирования: Овчаренко С.В., Гапонов М.С., Ильин Н.А., Логунов М.В., Wu Anhua, Мишина Е.Д. Лазерно-индуцированная спиновая динамика в пленке железо-иттриевого граната, легированного ионами Si. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):58-66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-58-66>

Laser-induced spin dynamics in the iron-yttrium garnet film doped with Si ions

Sergey V. Ovcharenko¹,
Mikhail S. Gaponov¹,
Nikita A. Ilyin¹,
Mikhail V. Logunov²,
Anhua Wu³,
Elena D. Mishina^{1,@}

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²Kotelnikov Institute of Radioengineering & Electronics of Russian Academy of Sciences, Moscow 125009, Russia

³Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 200050 Shanghai, People's Republic of China

@Corresponding author, e-mail: mishina_elena57@mail.ru

A continuous increase in the volume of stored and processed data leads to stricter requirements for storage media. The most common information storage technology is currently based on magnetic materials, where information in the form of "0" and "1" is associated with the local direction of magnetization, determined by the external magnetic field created by the recording device. It is known that this approach has fundamental limitations on the recording speed which is almost achieved. The requirements for energy efficiency of storage media are also being made stricter. These circumstances lead to the development of alternative approaches to recording information. One of these approaches has been demonstrated in the field of ultrafast opto-magnetism, which has been booming over the past 20 years. It consists in recording information with short

optical pulses without the application of an external magnetic field. However, it requires fundamental studies of physical processes, as well as materials, in which magnetization can be controlled by short optical pulses. In this paper, we consider the spin dynamics in a magnetic dielectric: a film of iron - yttrium garnet doped with silicon. The studies were carried out using the pump – probe technique over a time range of up to 800 ns. The spot size was 30 μm , the optical pulse duration was 35 fs, and the pump fluence was about 50 mJ / cm^2 . It is shown that a change in the magnetocrystalline anisotropy constants due to the action of a pump pulse on the structure causes a long-decaying magnetization precession with a period of about 200 ps. The dependences of the amplitude, phase, and decay of the precession on the magnitude of the external magnetic field in the range up to 1.84 kOe were obtained and analyzed. The studied processes can be considered on the basis of the Landau-Lifshitz-Gilbert model, and be of interest for the optical switching of magnetization, as well as the creation of various spintronic devices. It is shown that films of iron-yttrium garnet doped with silicon are a promising material for magnetic information carriers based on ultrafast opto-magnetism.

Keywords: photoinduced ultrafast dynamics, spintronics, domain structure, optical control of magnetization, femtosecond laser radiation.

For citation: Ovcharenko S.V., Gaponov M.S., Ilyin N.A., Logunov M.V., Wu Anhua, Mishina E.D. Laser-induced spin dynamics in the iron-yttrium garnet film doped with Si ions. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):58-66 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-58-66>

Введение

Несмотря на более чем столетнюю историю магнитооптических эффектов и их широчайшее использование в фундаментальных исследованиях и различных устройствах, каждое десятилетие выявляются новые области их применения, в частности, связанные с уменьшением пространственных и временных масштабов, на которых наблюдаются данные эффекты. На микроуровне развиты, например, термокартирование [1], импульсная микролазерная генерация с использованием магнитооптических модуляторов добротности [2], послойное картирование намагниченности в двумерных ферромагнетиках [3], рассмотрены эффекты усиления в магнитоплазменных структурах [4]. При этом применение внешних магнитных полей для управления магнитным моментом все еще является основной концепцией, например, в технологиях хранения информации, основанных на магнитных носителях. Однако ограничения, связанные с масштабированием и энергетической неэффективностью, вызванные использованием электрических токов для генерации магнитных полей, стимулируют активные исследования в поиске альтернативных способов управления магнитным порядком.

Бурное развитие получил в последние годы сверхбыстрый оптомагнетизм – раздел магнетизма, основанный на использовании обратных магнитооптических эффектов, в котором управление спиновой подсистемой твердого тела осуществляется оптическим импульсом без приложения внешнего магнитного поля [5]. Начало оптомагнетизма связывают с открытием сверхбыстрого размагничивания в ферромагнитном никеле в 1996 году [6]. Благодаря интенсивным исследованиям в этой области впоследствии было обнаружено сверхбыстрое полностью оптическое переключение намагниченности в различных материалах: пленках сплавов редкоземельных и переходных металлов, диэлектриках, гетероструктурах [7]. С точки зрения практической применимости наиболее

интересными объектами исследования являются тонкие пленки магнитных диэлектриков, обладающих незначительным поглощением в ближнем ИК и видимом спектральных диапазонах (в данном спектральном диапазоне работают наиболее распространенные коммерческие фемтосекундные лазеры), и, как следствие, меньшими Джоулевыми потерями.

Модельным материалом изучения сверхбыстрой динамики намагниченности в диэлектриках являются пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ), широко применяемые в микроволновых и магнитооптических устройствах. В первых работах по исследованию динамики намагниченности в пленках ЖИГ было продемонстрировано возбуждение спиновой прецессии [8, 9], анализ параметров которой привел к экспериментальной демонстрации переключения намагниченности [10]. Более того, в настоящее время сформулированы «правила», на основе которых реализовано обратимое переключение магнитного порядка в железо-иттриевом гранате, легированном ионами кобальта (ЖИГ:Co) [11] без приложения внешнего поля.

Исследование динамики намагниченности в различных магнитных диэлектриках позволит более детально прояснить механизмы, отвечающие за сверхбыструю динамику намагниченности. Явными кандидатами для таких исследований являются материалы, в которых ранее была продемонстрирована эффективная оптическая запись в квазистатическом режиме [12].

В данной работе представлены результаты исследования спиновой динамики в железо-иттриевом гранате, легированном ионами кремния (ЖИГ:Si).

Методика эксперимента

Пленка ЖИГ:Si толщиной 4.8 мкм была выращена методом жидкофазной эпитаксии на подложке гадолиний–галлиевого граната (ГГГ). Эксперимент проводился с помощью методики оптического возбуждения – зондирования (*optical pump-probe*), в качестве источника лазерного излучения использовалась фемтосекундная титан-сапфировая лазерная система TiF-20F (ООО «АВЕСТА-ПРОЕКТ», г. Троицк) с регенеративным усилителем, обеспечивающей длительность импульса 35 фс на частоте 3кГц, среднюю мощность излучения 600 мВт. Длина волны зондирующего излучения – 800 нм, излучения накачки – 400 нм (получена с помощью нелинейно оптического кристалла). Диаметр световых пятен в фокусе накачки и зондирования составлял 30 мкм, а плотность мощности для импульсов накачки и зондирования ~ 50 мДж/см² и ~ 0.5 мДж/см² соответственно. Была выбрана типичная схема для регистрации магнитооптического эффекта Фарадея, геометрия эксперимента аналогична используемой в работе [13]. Угол падения излучения накачки с нормалью к поверхности образца составлял $\sim 15^\circ$. Направление зондирующего луча совпадало с нормалью к плоскости образца. Поляризация падающих импульсов для приведенных зависимостей была линейной (P). Сигнал регистрировался балансным фотодетектором, позволяющим регистрировать фотоиндуцированные изменения поворота плоскости поляризации проходящего света и изменение его интенсивности (изменение коэффициента пропускания). Улучшение отношения сигнал/шум обеспечивалось за счет методики синхронного детектирования: синхронизированный с оптомеханическим прерывателем, модулирующим интенсивность возбуждающей волны, синхронный усилитель регистрировал изменения в зондирующем сигнале.

Результаты и их обсуждение

Динамика фотоиндуцированного магнитооптического эффекта Фарадея в пленке ЖИГ:Si с внешним полем H_{ext} , прикладываемом в плоскости образца, представлена на рис. 1.

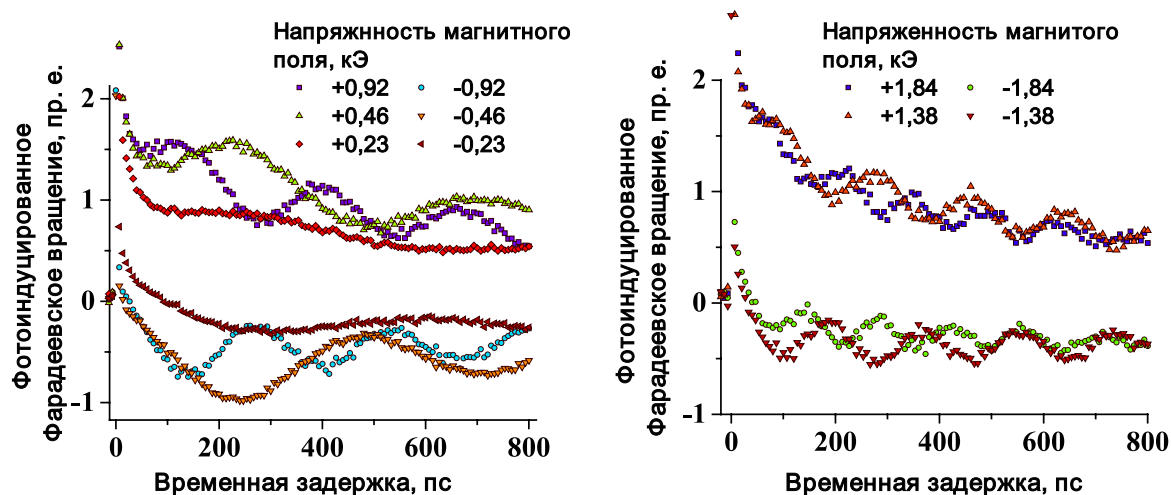


Рис. 1. Динамика фотоиндуцированного магнитооптического эффекта Фарадея в пленке ЖИГ:Si при различных внешних полях от 0.23 кЭ до 1.84 кЭ.

Измерения имеют характерный вид для экспериментов оптического возбуждения – зондирования [14]: на временах до 10 пс происходит возбуждение электронной системы оптическим импульсом и ее термализация. Далее наблюдаются осцилляции фотоиндуцированного Фарадеевского вращения, которые демонстрируют затухающую прецессию намагниченности с показателем затухания существенно выше временного разрешения проведенного эксперимента. Стоит отметить, что вызванная прецессия не зависит от поляризации накачки, что может говорить о том, что в данном эксперименте работает тепловой механизм оптического изменения магнитокристаллической анизотропии (δK -процесс), описанный в работе [5]. Тот факт, что внешнее поле H_{ext} , направлено в плоскости образца, исключает возможность возникновения изменения анизотропии формы (δM -процесса), описание которой было продемонстрировано в работе [15], однако существенным отличием нашей работы от [5] является то, что при изменении знака приложенного внешнего поля осцилляции имеют не определенный сдвиг по фазе, а находятся в противофазе, что может говорить о противоположном начальном направлении движения намагниченности, задающем фазу прецессии. Большим отличием является также длительность прецессии намагниченности, которая, как мы предполагаем, связана с более сильным изменением полного эффективного магнитного поля δH_{eff} .

На рис. 2 представлены петли гистерезиса фотоиндуцированного магнитооптического эффекта Фарадея при фиксированном времени задержки (0 и 300 пс). Петля гистерезиса во временной задержке 0 пс, соответствует времени, при котором импульс накачки и зондирования приходят одновременно и позволяет охарактеризовать основные параметры исследуемого образца с учетом возбуждения системы, до термализации носителей и возникновения прецессии намагниченности. Исходя из полученных данных, можно сделать

вывод, что поле насыщения B_n исследуемой пленки ЖИГ:Si в момент воздействия импульса возбуждения составляет ~ 0.5 кЭ, а размер коэрцитивной силы H_c равен в данном случае ~ 0.1 кЭ.

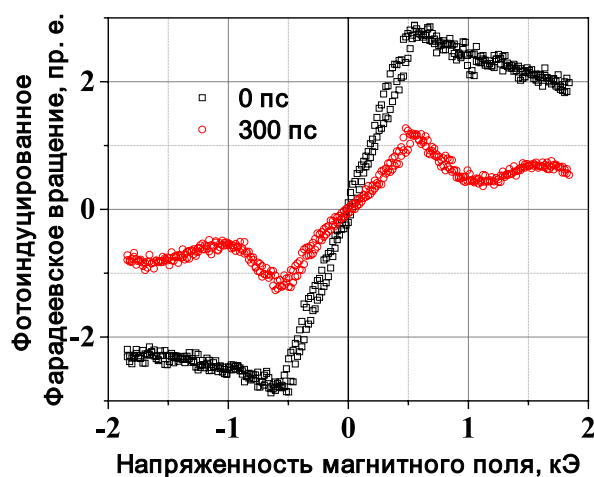


Рис. 2. Фотоиндуцированные петли гистерезиса во временной задержке 0 и 300 пс.

Если же рассматривать фотоиндуцированную петлю гистерезиса во временной задержке 300 пс, можно отметить, что после термализации носителей и с учетом ферромагнитного резонанса (ФМР), поле насыщения B_n в исследуемом образце не изменилось, а величина коэрцитивной силы H_c уменьшилась вдвое. Предполагается, что возбуждение ФМР происходит за счет фотоиндуцированного изменения поля анизотропии. Как видно из рис. 2 (задержка 300 пс), фотоиндуцированное изменение поля анизотропии проявляется в магнитном поле, превышающем поле насыщения для данного образца более, чем в 2 раза.

Полученные результаты были аппроксимированы феноменологической зависимостью фотоиндуцированного угла Фарадеевского вращения от времени задержки, являющейся типичной для экспериментов возбуждения – зондирования [16].

$$y = A \exp\left(\frac{-(x-x_0)^2}{w^2}\right) + B \exp(-decay_1 \times x) + C \exp(-decay_2 \times x) \sin(\varphi_1 + 2\pi\omega_1 x) + \\ + \frac{1}{2} D \exp(-decay_3 \times x) \sin(\varphi_2 + 2\pi\omega_2 x) (1 - \operatorname{erf}(\operatorname{StepAmp} - \operatorname{StepPhase} \times x))$$

Такая аппроксимация позволяет получить основные параметры ФМР при различных значениях приложенного внешнего магнитного поля H_{ext} : амплитуду, частоту и константу затухания прецессии намагниченности (рис. 3). Анализируя полученные значения, можно заметить, что частота ФМР практически линейно возрастает с увеличением поля. При этом амплитуда прецессии намагниченности имеет резкий скачок при величине внешнего поля $H_{ext} = 0.46$ кЭ. Это может быть связано с более высоким вкладом оптического изменения магнитокристаллической анизотропии, который обычно проявляется сильнее при низких внешних полях [5].

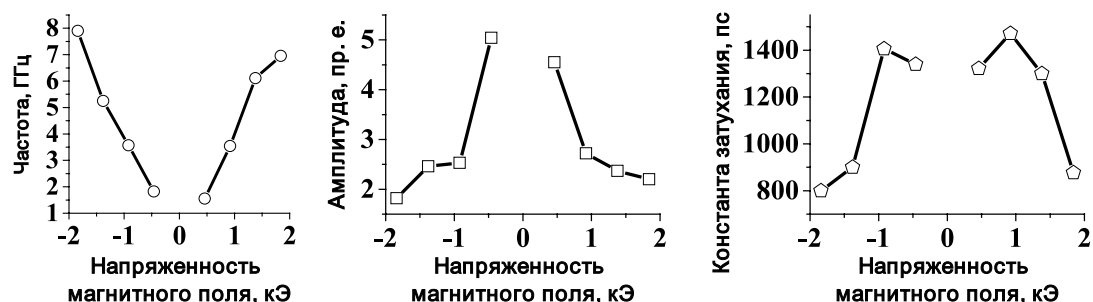


Рис. 3. Параметры ФМР, полученные в результате аппроксимации.

Полученные значения констант затухания показывают, что наиболее длительные осцилляции наблюдаются при величине внешнего поля $H_{\text{ext}} = 0.46$ кЭ и $H_{\text{ext}} = 0.92$ кЭ. Поскольку поле насыщения B_n исследуемой пленки ЖИГ:Si в возбужденном состоянии составляет ~ 0.5 кЭ, можно сделать вывод о том, что образование доменной структуры и ее нестабильность в полях, близких к полю насыщения, является одним из условий лазерно-индуцированного изменения констант магнитной анизотропии пленки феррита-граната, и проявляется в виде возникновения прецессии намагниченности с большим временем затухания. Мы считаем, что этот эффект в дальнейшем может способствовать нахождению условий полностью оптического переключения намагниченности в пленках ферритов-гранатов, легированных кремнием.

Заключение

Представленные результаты показывают возможность эффективного возбуждения лазерно-индуцированной спиновой прецессии в исследуемых пленках. Это позволяет рассматривать пленки ЖИГ:Si как перспективный материал для осуществления полностью оптического переключения намагниченности. Для создания детальной «дорожной карты» для такого переключения, однако, требуются дальнейшие исследования.

Благодарности

Авторы выражают свою признательность А.В. Кимелю за ценные консультации. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-52-53030 ГФЕН_а). Образцы изготовлены М.В. Логуновым, работа поддержана РФФИ (грант № 18-29-27020_мк).

Литература:

1. Kustov M., Grechishkin R., Gusev M., Gasanov O., McCord J. A Novel Scheme of Thermographic Microimaging Using Pyro-Magneto-Optical Indicator Films. *Adv. Mater.* 2015;27(34):5017-5022. <https://doi.org/10.1002/adma.201501859>
2. Goto T., Morimoto R., Pritchard J.W., Mina M., Takagi H., Nakamura Y., Lim P.B., Taira T., Inoue M. Magneto-optical Q-switching using magnetic garnet film with micro magnetic domains. *Opt. Express.* 2016;24(16):17635-17643. <https://doi.org/10.1364/OE.24.017635>
3. Huang B., Clark, G., Navarro-Moratalla E., Klein D., Cheng R., Seyler K.L., Zhong D., Schmidgall E. Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit. *Nature.* 2017;546(7657):270-273. <https://doi.org/10.1038/nature22391>
4. Liu M., Zhang X. Plasmon-boosted magneto-optics. *Nat. Photonics.* 2013;7(6):429-430. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.134>
5. Баранов П.Г., Калашникова А.М., Козуб В.И., Коренев В.Л., Кусраев Ю.Г., Писарев Р.В., Сапега В.Ф., Акимов И.А., Байер М., Щербakov А.В., Яковлев Д.Р. Спинтроника полупроводниковых, металлических, диэлектрических и гибридных структур» (к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН). *Успехи физических наук.* 2019;189:849-880. <https://doi.org/10.3367/UfNr.2018.11.038486>
6. Beaurepaire E., Merle J.C., Daunois A., Bigot J.Y. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel. *Phys Rev Lett.* 1996;76(22):4250-4253. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4250>

7. Kimel A.V., Li M. Writing magnetic memory with ultrashort light pulses. *Nat. Rev. Mater.* 2019;4(3):189-200. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0086-3>
8. Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Femtosecond photomagnetic switching of spins in ferrimagnetic garnet films. *Phys. Rev. Lett.* 2005;95(4):1-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.047402>
9. Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Nonthermal ultrafast optical control of the magnetization in garnet films. *Phys. Rev. B.* 2006;73(1):article № 014421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.014421>
10. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A.V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium. *Nature* [Internet]. 2017;542(7639):71-74. <https://doi.org/10.1038/nature20807>
11. Stupakiewicz A., Szerenos K., Davydova M.D., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K., Kirilyuk A. Selection rules for all-optical magnetic recording in iron garnet. *Nat. Commun.* 2019;10(1):article № 612. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08458-w>
12. Коваленко В., Колежук Е., Куц П. Фотомагнитная запись информации. *Письма в ЖТФ.* 1981;7(16):1012-1016.
13. Atoneche F., Kalashnikova A.M., Kimel A.V., Stupakiewicz A., Maziewski A., Kirilyuk A., et al. Large ultrafast photoinduced magnetic anisotropy in a cobalt-substituted yttrium iron garnet. *Phys. Rev. B.* 2010;81(21):article № 214440. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.214440>
14. Koopmans B., Malinowski G., Dalla Longa F., Steiauf D., Fähnle M., Roth T., et al. Explaining the paradoxical diversity of ultrafast laser-induced demagnetization. *Nat. Mater.* 2010;9(3):259-265. <https://doi.org/10.1038/nmat2593>
15. van Kampen M., Jozsa C., Kohlhepp J.T., LeClair P., Lagae L., de Jonge W.J.M., et al. All-Optical Probe of Coherent Spin Waves. *Phys. Rev. Lett.* 2002;88(22):article № 227201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.227201>
16. Kimel A.V., Bentivegna F., Gridnev V.N., Pavlov V.V., Pisarev R.V., Rasing T. Room-temperature ultrafast carrier and spin dynamics in GaAs probed by the photoinduced magneto-optical Kerr effect. *Phys. Rev. B.* 2001;63(23):article № 235201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.235201>

References:

1. Kustov M., Grechishkin R., Gusev M., Gasanov O., McCord J. A Novel Scheme of Thermographic Microimaging Using Pyro-Magneto-Optical Indicator Films. *Adv Mater.* 2015;27(34):5017-22. <https://doi.org/10.1002/adma.201501859>
2. Goto T., Morimoto R., Pritchard J.W., Mina M., Takagi H., Nakamura Y., Lim P.B., Taira T., Inoue M. Magneto-optical Q-switching using magnetic garnet film with micro magnetic domains. *Opt. Express.* 2016;24(16):17635-17643. <https://doi.org/10.1364/OE.24.017635>
3. Huang B., Clark, G., Navarro-Moratalla E., Klein D., Cheng R., Seyler K.L., Zhong D., Schmidgall E. Layer-dependent ferromagnetism in a van der Waals crystal down to the monolayer limit. *Nature.* 2017;546(7657):270-273. <https://doi.org/10.1038/nature22391>
4. Liu M., Zhang X. Plasmon-boostered magneto-optics. *Nat. Photonics.* 2013;7(6):429-430. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.134>
5. Baranov P.G., Kalashnikova A.M., Kozub V.I., Korenev V.L., Kusrayev Y.G., Pisarev R.V. et al. Spintronics of semiconductor, metallic, dielectric, and hybrid structures (100th anniversary of the Ioffe Institute). *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi.* 2018;189(08):849-880 (in Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.11.038486>
6. Beaurepaire E., Merle J.C., Daunois A., Bigot J.Y. Ultrafast spin dynamics in ferromagnetic nickel. *Phys. Rev. Lett.* 1996;76(22):4250-4253. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4250>
7. Kimel A.V., Li M. Writing magnetic memory with ultrashort light pulses. *Nat. Rev. Mater.* 2019;4(3):189-200. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0086-3>
8. Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Femtosecond photomagnetic switching of spins in ferrimagnetic garnet films. *Phys. Rev. Lett.* 2005;95(4):1-4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.047402>
9. Hansteen F., Kimel A., Kirilyuk A., Rasing T. Nonthermal ultrafast optical control of the magnetization in garnet films. *Phys. Rev. B.* 2006;73(1):014421. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.014421>
10. Stupakiewicz A., Szerenos K., Afanasiev D., Kirilyuk A., Kimel A.V. Ultrafast nonthermal photo-magnetic recording in a transparent medium. *Nature* [Internet]. 2017;542(7639):71-74. <https://doi.org/10.1038/nature20807>
11. Stupakiewicz A., Szerenos K., Davydova M.D., Zvezdin K.A., Zvezdin A.K., Kirilyuk A. Selection rules for all-optical magnetic recording in iron garnet. *Nat. Commun.* 2019;10(1):612. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08458-w>
12. Kovalenko V., Kolezhuk E., Kuts P. Photomagnetic recording of information. *Pis'ma v ZhTF – Technical Physics Letters.* 1981;7(16):1012-1016 (in Russ.).
13. Atoneche F., Kalashnikova A.M., Kimel A.V., Stupakiewicz A., Maziewski A., Kirilyuk A. Large ultrafast photoinduced magnetic anisotropy in a cobalt-substituted yttrium iron garnet. *Phys. Rev. B.* 2010;81(21):214440. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.214440>
14. Koopmans B., Malinowski G., Dalla Longa F., Steiauf D., Fähnle M., Roth T., et al. Explaining the paradoxical diversity of ultrafast laser-induced demagnetization. *Nat. Mater.* 2010;9(3):259-65. <https://doi.org/10.1038/nmat2593>
15. van Kampen M., Jozsa C., Kohlhepp J.T., LeClair P., Lagae L., de Jonge W.J.M. All-Optical Probe of Coherent Spin Waves. *Phys. Rev. Lett.* 2002;88(22):227201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.227201>
16. Kimel A.V., Bentivegna F., Gridnev V.N., Pavlov V.V., Pisarev R.V., Rasing T. Room-temperature ultrafast carrier and spin dynamics in GaAs probed by the photoinduced magneto-optical Kerr effect. *Phys. Rev. B.* 2001;63(23):235201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.235201>

Об авторах

Овчаренко Сергей Вадимович, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико - технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ORCID: 0000-0002-6360-3672

Гапонов Михаил Станиславович, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико - технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ORCID: 0000-0003-0003-5054

Ильин Никита Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Физико - технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Author ID: 18037137700

Логунов Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (125009, Россия, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп.7). ResearcherID: J-9486-2013

Anhua Wu, профессор Центра исследования кристаллов института керамики Шанхая Китайской Академии наук (200050, Китай, Шанхай, 1295 Dingxi Rd). ORCID: 0000-0002-0979-8085

Мишина Елена Дмитриевна, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры нанoeлектроники Физико - технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ORCID: 0000-0003-0387-5016, ResearcherID: D-6402-2014, Scopus Author ID: 7005350309

About the authors:

Sergey V. Ovcharenko, Postgraduate Student of the Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ORCID: 0000-0002-6360-3672

Mikhail S. Gaponov, Postgraduate Student of the Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ORCID: 0000-0003-0003-5054

Nikita A. Ilyin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Physics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Author ID: 18037137700

Mikhail V. Logunov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Leading Researcher, Kotel'nikov Institut of Radio Engineering and Electronics RAS (125009, Russia, Moscow, 11 Mokhovaya St., building 7). ResearcherID: J-9486-2013

Anhua Wu, Professor, Center for Crystal Research, Institute of Ceramics, Shanghai, Chinese Academy of Sciences (200050, China, Shanghai, 1295 Dingxi Rd). ORCID: 0000-0002-0979-8085

Elena D. Mishina, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia.). ORCID: 0000-0003-0387-5016, ResearcherID: D-6402-2014, Scopus Author ID: 7005350309

Особенности получения пьезоэлектрических тонких пленок методом плазменного напыления из порошкообразного AlN

В.С. Фещенко^{1,®},
К.Н. Зяблюк¹,
Э.А. Сенокосов²,
В.И. Чукита²,
Д.А. Киселев^{3,4}

¹ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест», Москва 121108, Россия

²Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь MD-3300, Приднестровская Молдавская республика

³Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Фрязино 141190, Россия

⁴Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва 119049, Россия

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

Одним из перспективных материалов в твердотельной электронике является соединение нитрид алюминия (AlN). Из него производят широкую номенклатуру полупроводниковых приборов: фотоприемники, светодиоды, пьезоэлектрические преобразователи и т. п. Широкому применению изделий на основе AlN препятствует невысокая технологичность изготовления структур на его основе. В связи с этим, разработка новых технологий для производства приборов на основе AlN является актуальной.

Работа посвящена исследованию тонких пленок AlN, изготовленных с помощью плазменного напыления из порошка AlN. Проведен обзор существующих технологий получения тонких пленок AlN. Обсуждены их достоинства и недостатки. Приведены сведения о модернизации установки ВУП-5, позволившей произвести напыление пленки AlN из порошкообразного состояния.

Одним из существенных преимуществ разработанного в этой работе процесса является то, что подложка нагревалась до температур не выше 300 °С, что позволяет, в свою очередь, совместить эту технологию с технологией кремниевых полупроводниковых приборов.

В результате получены пленки толщиной 200 нм на различных подложках и исследована структура поверхности. Показано, что наименьшей шероховатостью обладают пленки AlN, напыленные на монокристаллические подложки – алмаз и кремний, а наихудшей шероховатостью обладают пленки, напыленные на ситалле.

Методами ИК-спектроскопии были исследованы спектры пропускания полученных пленок AlN. С их помощью было показано, что на подложке образуется поликристаллический слой AlN, ориентированный в кристаллографическом направлении 002.

С использованием методов сканирующей зондовой микроскопии были исследованы пьезоэлектрические свойства изготовленных пленок. Показано, что их пьезоэлектрический коэффициент d_{33} составляет для алмазной подложки 60% от значения для однодоменного монокристаллического образца, что говорит о достаточно высоком качестве полученной пленки.

Сделан вывод, что, хотя качество слоев сильно зависит от подложки, но, тем не менее, они проявляют значительный пьезоэффект, что позволяет использовать этот метод для изготовления пьезодатчиков, излучателей ультразвука и т.п.

Ключевые слова: AlN, ИК-спектроскопия, плазменное напыление, пьезоэлектрики, тонкие слои.

Для цитирования: Фещенко В.С., Зяблук К.Н., Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Киселев Д.А. Особенности получения пьезоэлектрических тонких пленок методом плазменного напыления из порошкообразного AlN. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):67-79. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-67-79>

Features of the receiving of piezoelectric thin films by plasma spraying of powdery AlN

Valeriy S. Feshchenko^{1,@},
Konstantin N. Zyablyuk¹,
Eduard A. Senokosov²,
Vitaliy I. Chukita²,
Dmitriy A. Kiselev^{3,4}

¹Proizvodstvenno-tekhnologicheskii tsentr "UralAlmazInvest", Moscow 121108, Russia

²Pridnestrovian State University, Tiraspol, MD-3300, Pridnestrovian Moldavian Republic

³Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino 141190, Russia

⁴National University of Science and Technology "MISIS", Moscow 119049, Russia

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

One of the promising materials in solid state electronics is the AlN compound. A wide range of semiconductor devices are produced from it, such as photodetectors, LEDs, piezoelectric converters, etc. But the widespread use of products based on AlN prevents low manufacturability designs based on it. In this regard, the development of new technologies for the production of devices based on AlN is relevant.

The work is devoted to the study of thin AlN films obtained by plasma spraying from AlN powder. The review of existing technologies of production of thin films AlN is carried out.

Their advantages and disadvantages are discussed. Information on the modernization of the VUP-5 installation, which allowed to spray the AlN film from the powdered state, is given.

One of the significant advantages of the process developed in this work is that the substrate is heated to temperatures no higher than 300 °C, which in turn allows to combine this technology with the technology of silicon semiconductor devices.

As a result, films with a thickness of 200 nm on various substrates were obtained and their surface structure was studied. It is shown that AlN films deposited on single crystal substrates such as diamond and silicon have the least roughness, while films on siall have the worst roughness.

The transmission spectra of the obtained AlN films were investigated by IR spectroscopy. With their help, it was shown that a polycrystalline AlN layer oriented in the crystallographic direction 002 is formed on the substrate. The piezoelectric properties of the obtained films were investigated by scanning probe microscopy. It is shown that their piezoelectric coefficient d_{33} is 60% of the value for a single-domain single-crystal sample for a diamond substrate, which indicates a sufficiently high quality of the resulting film.

It is concluded that, although the quality of the layers strongly depends on the substrate, nevertheless, they exhibit a significant piezoelectric effect, which allows the use of this method for the manufacture of piezoelectric sensors, ultrasonic emitters, etc.

Keywords: AlN, IR spectroscopy, plasma spraying, piezoelectric, thin layers.

For citation: Feshchenko V.S., Zyablyuk K.N., Senokosov E.A., Chukita V.I., Kiselev D.A. Features of the receiving of piezoelectric thin films by plasma spraying of powdery AlN. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(1):67-79 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-67-79>

Введение

Одним из перспективных материалов в твердотельной электронике являются тонкие пленки нитрида алюминия (AlN). Из них изготавливаются светодиоды [1], фотодетекторы [2] и различного рода пьезоэлектрические устройства [3, 4].

Эффективность работы пьезоэлектрических компонентов с AlN определяется качеством пленки. Идеальным вариантом являются эпитаксиальные пленки AlN с ориентацией (002), когда c -ось перпендикулярна направлению подложки, так как в этом направлении нитрид алюминия имеет максимальный пьезоэлектрический отклик [5]. Эпитаксиальные пленки AlN могут быть получены с помощью таких методов, как молекулярно-лучевая эпитаксия (MBE) [6] или осаждение металлоорганических соединений из газовой фазы (MOCVD) [5]. Данные методы достаточно сложны и содержат условия, несовместимые с технологиями производства микроэлектронных компонентов, в частности температура подложки должна быть не менее 800 °C из-за высокой температуры плавления AlN.

Поэтому в качестве альтернативного метода нанесения пленок AlN широко используется реактивное магнетронное распыление в среде азота в плазме постоянного или высокочастотного тока. Магнетронное напыление относительно дешево, не требует нагрева подложки до высоких температур и позволяет получить высокоориентированные поликристаллические пленки AlN с хорошими пьезоэлектрическими свойствами.

Но, несмотря на то, что в большом числе работ сообщается об успешном росте пьезоэлектрических пленок AlN методом магнетронного напыления, сохраняется большой разброс их качественных характеристик. На характеристики пленок могут влиять такие

факторы, как питание плазмы (постоянный ток, импульсный или ВЧ), мощность разряда, давление газа, соотношение концентраций N_2/Ar в газе, расстояние между подложкой и мишенью, напряжение смещения и температура подложки и т.д. Поэтому любое экспериментальное исследование, направленное на изучение условий изготовления и изучение свойств полученных тонких пленок AlN, является актуальным.

Теоретические основы процесса изготовления тонких пленок AlN

Как было отмечено выше, на различные характеристики пленок AlN влияет ряд параметров процесса их получения. Например, в [7] исследовалась преимущественная ориентация пленок AlN, осаждаемых на подложках Si (001) в ВЧ разряде в зависимости от давления газов, соотношения N_2/Ar и смещения подложки. Сообщается, что при концентрации азота 30% и давлении 0.4–0.5 Па получаются (002)-ориентированные пленки, а при увеличении давления выше 0.7 Па на рентгеновской дифрактограмме появляются пики (102) и (103). Соотношение интенсивностей пиков также зависит от отношения N_2/Ar . Также (002)-ориентированные пленки могут быть получены при более высоком давлении при подаче отрицательного напряжения смещения на подложку. С другой стороны авторы [8] аргументируют, что на характеристики пленок влияют не только указанные выше параметры, но и конструкция магнетронов, что может объяснить разногласие в полученных результатах в литературе при одинаковых условиях. Они исследовали напыление пленок на двух магнетронах с различным пространственным распределением магнитного поля. В частности показано, что на магнетроне с более объемным полем (т. н. разбалансированный магнетрон) требуемая мощность достигается при более низком давлении и синтезируемые пленки имеют ориентацию (002) в широком диапазоне отношений N_2/Ar , а также плотную структуру без пустот.

Пьезоэлектрические пленки AlN имеют неоднородную структуру по толщине, так как процесс роста (002)-пленок начинается с образования зародышей на подложке и затем переходит в столбчатую структуры с преимущественной ориентацией. Поэтому при увеличении толщины ширина (002)-пика на рентгенограмме уменьшается, а пьезоэлектрический модуль d_{33} увеличивается, приближаясь к максимуму после ~ 0.5 мкм, а тангенс угла диэлектрических потерь уменьшается [9]. Также на величину пьезомодуля d_{33} влияют не только условия напыления, но и материал нижнего электрода под пленкой. Так в [10] отмечено, что пленки AlN, выращенные на Pt, обладают большим d_{33} по сравнению с пленками на Al и Ti.

Другой важной характеристикой (002)-пленок AlN является полярность (Al-сторона или N-сторона сверху). Полярность пленки определяет знак пьезоотклика. Это означает, что хорошая пленка должна иметь определенную полярность, а не состоять из островков с различной полярностью, компенсирующих друг друга. Полярность также зависит от режимов напыления. Так, в работе [11] увеличение давления газа от 0.36 до 4.0 Па привело к изменению пьезоотклика от +3.7 до –4.4 пКл/м, что свидетельствует в пользу смены полярности пленки от Al к N-стороне. Также изменение пьезоотклика от положительного к отрицательному наблюдалось при уменьшении мощности разряда [12] и при вводе 1% кислорода в смесь N_2/Ar [13]. В [14] полярность пленок непосредственно наблюдалась с помощью электронной микроскопии с атомарным разрешением и было показано, что при

соблюдении определенных условий напыления полярность пленок AlN полностью определяется материалом подложки: так, на Pt(111) растут пленки с N-стороной, в то время как на Al(111) пленки ориентированы Al-стороной вверх.

Оборудование и методика эксперимента

Нанесение слоев производилось на вакуумном посту ВУП-5М, укомплектованном магнетронной приставкой. Для выполнения работы к ВУП-5М было подключено дополнительное оборудование (рис. 1).

Для измерения давления газов использовался вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2. Для подачи газов под колпак ВУП-5М использовался регулятор расхода газов РРГ-3-10-С. В работе использовались баллоны с аргоном и кислородом с редукторами. Для нанесения слоя пьезоэлектрика AlN использовался высокочастотный (ВЧ) генератор с согласующим устройством.

Вакуумный пост укомплектован магнетронной приставкой с тремя магнетронами, позволяющей наносить до трех слоев за 1 цикл откачки (рис. 2).

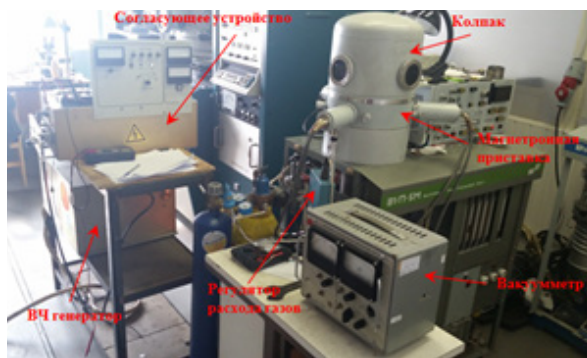


Рис. 1. Оборудование для нанесения слоев на основе вакуумного поста ВУП-5М.

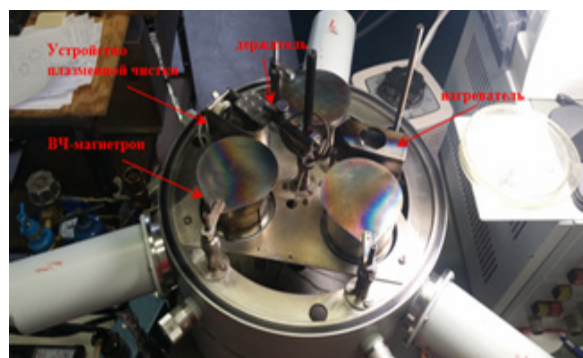


Рис. 2. Магнетронная приставка ВУП-5М.

Магнетроны охлаждаются проточной водой и рассчитаны на работу с мишенями Ø 40мм. Один из магнетронов был модифицирован для работы с ВЧ-генератором для нанесения диэлектрических слоев. Образцы, на которые наносятся слои, закрепляются на специально изготовленном держателе, который присоединяется к штоку в центре приставки. Шток вращается вокруг вертикальной оси, позволяя перемещать держатель с образцами между магнетронами в вакууме. Для нагрева держателя до нужной температуры изготовлен нагреватель на основе лампы накаливания. Также между магнетронами расположено устройство плазменной очистки поверхностей образцов.

Для напыления нитрида алюминия использовался один из трех магнетронов приставки ВУПа с некоторыми модификациями. Во-первых, был изготовлен заземленный экран, закрывающий катод магнетрона снизу приставки с зазором в несколько мм от него – таким образом удалось избавиться от нежелательного разряда, возникающего снизу приставки при подаче ВЧ напряжения. Далее, зона ВЧ плазмы имеет больший размер по сравнению с зоной плазмы постоянного тока, что может привести к распылению анода и кольца, которым мишень прижимается к катоду, что в свою очередь приводит к загрязнению пленок. Поэтому вместо стандартного анода с загнутыми сверху краями из нержавеющей

щей стали был изготовлен другой анод. Верхняя плоскость анода имеет форму кольца с внешним/внутренним диаметром $\varnothing$ 60мм/46мм, и находится на одном уровне с верхней плоскостью катода (рис. 3).

Диэлектрическая мишень имеет больший размер по сравнению со стандартным диаметром $\varnothing$ 40мм; она полностью закрывает зазор между катодом и анодом и частично внутренний радиус кольца анода, прижимное кольцо не используется. Таким образом, мишень закрывает максимальную зону ВЧ плазмы, минимизируя паразитные распыления (рис. 4). На внешнем радиусе кольца анода установлен экран высотой 15 мм для предотвращения загрязнения магнетронной приставки материалами распыления.

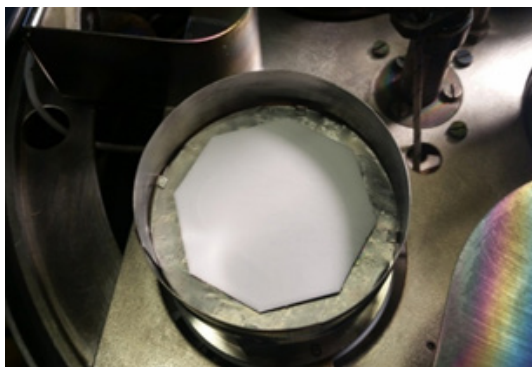


Рис. 3. ВЧ магнетрон с мишенью из нитрида алюминия.



Рис. 4. Напыление AlN в ВЧ разряде.

Схема питания ВЧ магнетрона представлена на рис 5. Источником питания является генератор, потребляющий 5.5 А от сети 380В, рассчитанный на выходную мощность до 1.5 кВт на частоте 13.56 МГц.

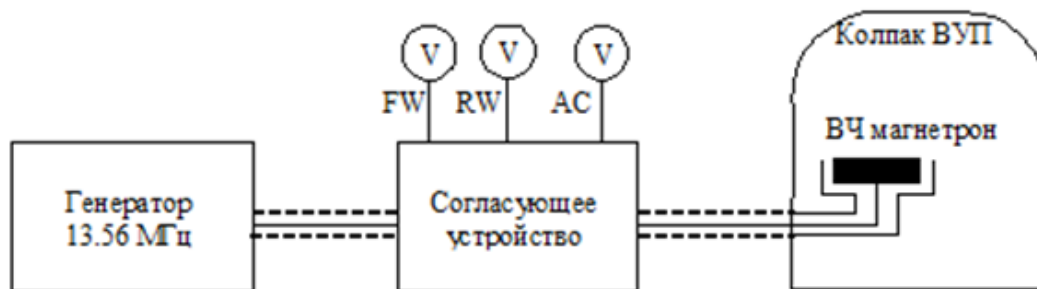


Рис. 5. Схема питания ВЧ магнетрона.

Выход генератора соединен с согласующим устройством посредством коаксиального кабеля Alpha Wire 214/U с волновым сопротивлением 50 Ом длиной 1.8 м. Выход согласующего устройства соединен со входом ВЧ магнетрона с помощью коаксиального кабеля РК-50-7-11 длиной 1.3 м. Корпуса генератора и согласующего устройства заземлены на корпус ВУПа через оплетку кабелей. Кабель РК-50-7-11 обернут алюминиевой фольгой для дополнительной экранировки помех, которые влияют на управляющее устройство регулятора расхода газа при включении генератора.

Схема согласующего устройства представлена на рис. 6.

На входе устройства установлены детектор падающей волны (FW) и детектор отраженной волны (RW). Напряжения на их выходах позволяют контролировать амплитуду

сигнала и, следовательно, мощность ВЧ разряда. Далее сигнал поступает на П-образный контур, состоящий из катушки индуктивности L1, высоковольтных конденсаторов C1–C4 и воздушного конденсатора C5. LC-контур, состоящий из катушки индуктивности L2 и вакуумного конденсатора C6 позволяет подстраивать реактивное сопротивление нагрузки в диапазоне от –200 до +200 Ом. Дроссель L3 и резистивный делитель 1:100 R1, R2 позволяют измерять напряжение автосмещения на выходе согласующего устройства. Мишень из нитрида алюминия (белый восьмиугольник на рис. 3) была изготовлена путем нанесения порошка AlN на диэлектрическое основание. Использовался порошок марки A100, который имеет характеристики согласно заявлению производителя, указанные в таблице. Параметр SSA (*specific surface area*) обозначает удельную площадь поверхности, D50 – размер зерна, ниже которого содержатся 50% частиц.

В процессе напыления центральная часть мишени нагревается до высоких температур (рис. 4). В результате неравномерного нагрева мишень может расколоться, поэтому основание мишени должно быть изготовлено из материала с высокой теплопроводностью. Одним из таких материалов является керамика из того же нитрида алюминия, имеющаяся в продаже. Для изготовления основания мишени были приобретены пластины из керамики AlN размером 48×60×0.5 мм, из которых были вырезаны восьмиугольники с расстоянием между сторонами 48 мм. Напылять AlN можно и непосредственно с данных пластин, однако содержание примесей в них неизвестно (при изготовлении керамики в порошок добавляют связующие вещества). Поэтому предпочтение было отдано пластинам со слоем порошка с характеристиками, указанными в таблице. Для нанесения порошка 5 г AlN добавлялись в 50 мл деионизованной воды, смесь взбалтывалась и выливалась в чашку Петри с основанием мишени. После выпадения осадка вода удалялась

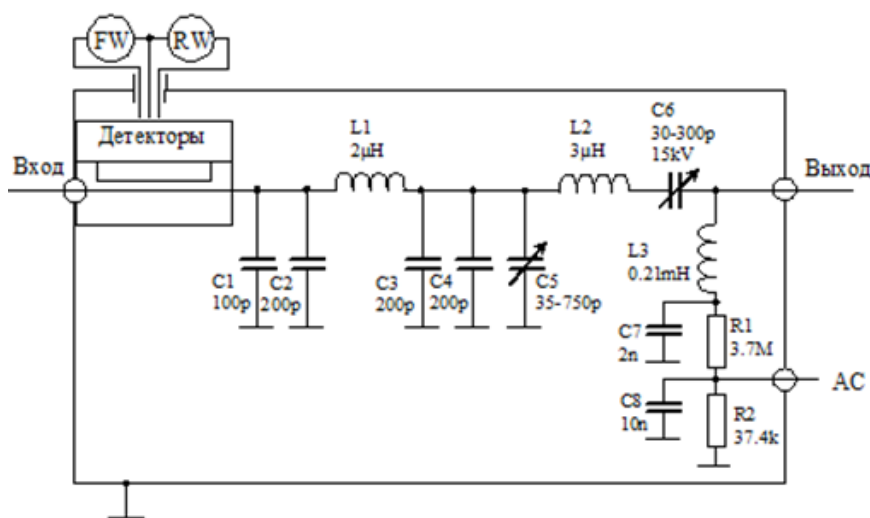


Рис. 6. Схема согласующего устройства.

Заявленные характеристики порошка AlN

	Характеристика	Значение
1	SSA, (м ² /г)	1.2–2.0
2	D50, (мкм)	7.0–10.0
3	Fe, (%)	0.03–0.05
4	Si, (%)	0.05–0.07
5	O ₂ , (%)	0.3–0.7

с помощью шприца, остатки воды высушивались. Толщина высохшего осадка 0.3–0.4 мм. Несмотря на хрупкость слоя AlN, адгезия была достаточной для проведения всех необходимых операций; в процессе напыления отслоение частиц порошка не наблюдалось.

Мощность плазмы регулировалась путем подстройки переменных конденсаторов C5 и C6 согласующего устройства (рис. 6) и контролировалась по показаниям вольтметров, подключенным к разъемам детекторов падающей и отраженной волн. Как правило, конденсатор C5 устанавливался на 3/4 от максимального значения, а точная мощность регулировалась с помощью вакуумного конденсатора C6.

После отработки был выбран следующий оптимальный режим напыления AlN. Мишень из слоя порошка AlN толщиной 0.3–0.4 мм на основании из керамики AlN толщиной 0.5 мм в форме восьмиугольника размером 48 мм лежит на катоде магнетрона, теплоотвод не используется. Для поджига плазмы необходимо либо увеличить давление до 0.7 Па, либо увеличить мощность ВЧ.

Режимы напыления:

- расстояние от мишени до нижней грани держателя – 21–22 мм;
- давление Ar – 0.5–0.7 Па;
- амплитуда падающей волны – 1.0–1.1 В;
- амплитуда отраженной волны – 0.58–64 В;
- автосмещение – 120...–180 В;
- скорость напыления – 300 нм/час.

При заданном уровне мощности температура держателя образцов поддерживается на уровне 300 °С. Увеличение мощности ВЧ приводит к увеличению температуры держателя, а также к быстрому загрязнению мишени. Предположительно происходит загрязнение металлическим алюминием в результате разложения AlN. Загрязнение, указанное на рис. 7, происходит приблизительно через 1 час работы в режиме, указанном выше, однако в ряде случаев первые следы загрязнения появлялись и через 30 минут работы. Дальнейшее напыление с загрязненной мишенью приводит к тому, что почти вся поверхность мишени становится темно-серой, а напыленный слой становится непрозрачным и проводящим. Таким образом, напыление слоя AlN толще 300 нм данным методом необходимо производить в несколько этапов, каждый раз смывая слой загрязненного порошка AlN с мишени и нанося новый.

Методика измерения и основные экспериментальные результаты

В результате были напылены пленки на ряд подложек, таких как алмаз (покрытый слоем платины), кремний и ситал.

На рис. 8 представлены изображения поверхности пленок AlN напыленные на алмаз и ситалл. Поверхность AlN, напыленная на кремний, визуально ничем не отличалась от

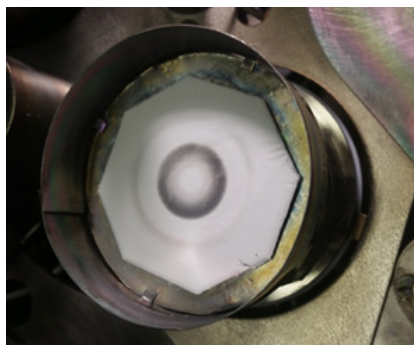


Рис. 7. Загрязнение мишени AlN после продолжительной работы.

пленки, напыленной на слой платины на алмазе, и обе эти поверхности имеют близкие значения шероховатости. Для пленки AlN на алмазе – $R_{ms} = 0.45 \text{ nm}$, $R_a = 0.27 \text{ nm}$, а для пленки AlN на кремнии – $R_{ms} = 0.48 \text{ nm}$, $R_a = 0.3 \text{ nm}$.

Из рис. 8 видно, что при одних и тех же условиях напыления шероховатость поверхности пленки AlN существенно отличается в зависимости от подложки. При напылении на слой монокристалла алмаза, кремния или металлический слой шероховатость минимальная. При напылении на поликристаллический ситалл возникают воронкообразные углубления, очевидно связанные с перепадом напряжений на границах зерен поликристалла. Из-за этого среднеарифметическая шероховатость R_a слоя AlN на ситалле в восемь раз, а среднеквадратичная шероховатость R_{ms} в двенадцать раз больше, чем на алмазе или кремнии.

Для того чтобы убедиться в том, что напыленная пленка состоит из нитрида алюминия, нами были исследованы её спектры ИК пропускания. Исследования проводили на фурье-спектрометре ФСМ – 1201.

Полученный ИК-спектр представлен на рис. 9. Спектр пропускания кремниевой подложки вычитался из суммарного спектра пропускания.

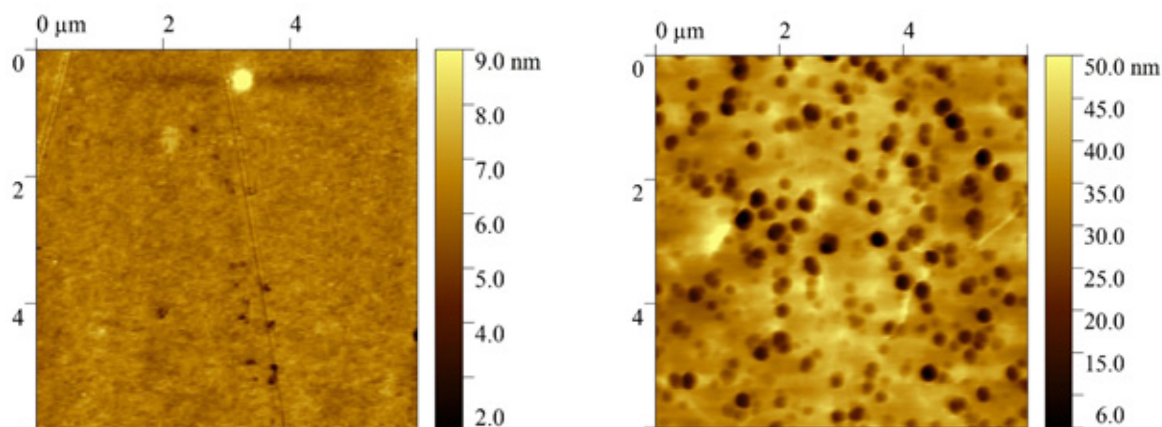


Рис. 8. Топография поверхности образцов, полученная на сканирующем зондовом микроскопе MFP-3D:
а) AlN на алмазе, параметры шероховатости поверхности: $R_{ms} = 0.45 \text{ nm}$, $R_a = 0.27 \text{ nm}$;
б) AlN на ситалле, параметры шероховатости поверхности: $R_{ms} = 6.26 \text{ nm}$, $R_a = 4.64 \text{ nm}$.

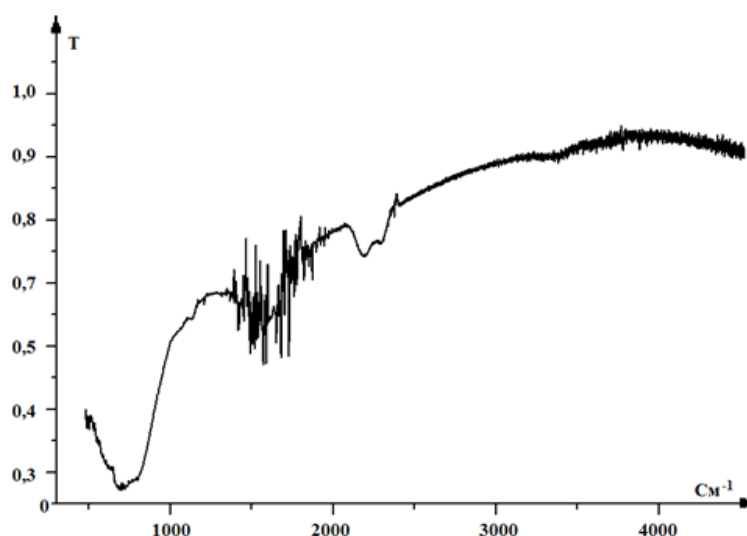


Рис. 9. ИК-спектр пленки, напыленной на кремний.

На спектре, представленном на рис. 9, виден пик в районе 672 см^{-1} , что соответствует полосе поглощения поперечного оптического фонона $E_1(\text{TO})$ в кристаллической решетке AlN в форме вюрцита [15]. В то же время, пика поглощения поперечного оптического фонона $A_1(\text{TO})$ на длине волны 612 см^{-1} не наблюдается, что согласно [15], соответствует преимущественной кристаллографической ориентации 002 у поликристаллической пленки AlN.

Исследование пьезоэлектрических свойств напыленных пленок проводилось методами сканирующей зондовой микроскопии на оборудовании ЦКП «Материаловедение и металлургия» НИТУ «МИСиС» по методике, изложенной в [16]. На рис.10 представлены результаты исследований.

Из рис 10, на котором представлены зависимости деформации пьезоэлектрического слоя от поданного на иглу напряжения [16], видно, что пьезоэлектрический коэффициент для пленки на алмазе равен $d_{33} = 2.2\text{ пм/В}$, что соответствует 60% от значения для однодоменного монокристаллического образца. Пленка, напыленная на кремний, имеет $d_{33} = 7.2\text{ пм/В}$, что соответствует высокоориентированной многодоменной структуре слоя AlN.

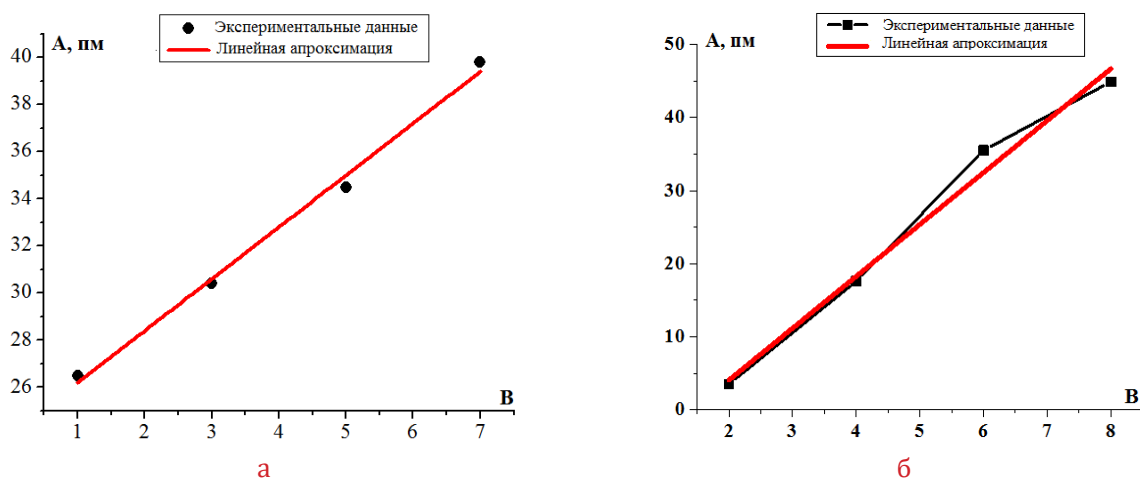


Рис. 10. Измерение пьезоэлектрического коэффициента d_{33} :
а) AlN на алмазе; б) AlN на кремнии.

Заключение

Проведен обзор существующих технологий получения тонких пленок AlN. Обсуждены их достоинства и недостатки. Приведены сведения о модернизации установки ВУП-5, позволившие произвести напыление пленки AlN из порошкообразного состояния.

В представленном в этой работе процессе подложка нагревалась до температур около $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяло совместить эту технологию с технологией кремниевых полупроводниковых приборов.

Получены пленки толщиной 200 нм на различных подложках и исследована структура поверхности. С помощью ИК-спектроскопии показано, что на подложке образуется поликристаллический слой, ориентированный в кристаллографическом направлении 002. Исследованы пьезоэлектрические свойства изготовленных пленок. Показано, что их пьезоэлектрический коэффициент d_{33} составляет для алмазной подложки 60% от значения для однодоменного монокристаллического образца, что говорит о достаточно

высоком качестве полученной пленки. Показано, что качество слоев сильно зависит от подложки, но, тем не менее, они проявляют значительный пьезоэффект, что позволяет использовать этот метод для изготовления пьезодатчиков, излучателей ультразвука и т.п.

Литература:

1. Inoue Sh.-I., Tamari N., Taniguch M. 150 mW deep-ultraviolet light-emitting diodes with large-area AlN nanophotonic light-extraction structure emitting at 265 nm. *Appl. Phys. Lett.* 2017;110(14):141106. <https://doi.org/10.1063/1.4978855>
2. Boltar K.O., Burlakov I.D., Ponomarenko V.P., Filachev A.M., Salo V.V. Solid-state photoelectronics of the ultraviolet range (review). *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016;61(10):1175-1185. <https://doi.org/10.1134/S1064226916100041>
3. Priya Sh., Song H.-Ch., Zhou Y., Varghese R., Chopra A., Kim S.-G., Kanno I., Wu L., Ha D.S., Ryu J., Polcawich R.G. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. *Energy Harvesting and Systems*. 2017;4(1):3-39. <https://doi.org/10.1515/ehs-2016-0028>
4. Piprek J. (Ed.). Nitride Semiconductor Devices: Principles and Simulation. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2007. 519 p. ISBN: 978-3-527-61072-3
5. Tsubouchi K., Mikoshiba N. Zero-Temperature-Coefficient SAW Devices on AlN Epitaxial Films. *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*. 1985;32(5):634-644. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1985.31647>
6. Rowland L.B., Kern R.S., Tanaka S., Davis R.F. Epitaxial growth of AlN by plasma-assisted, gas-source molecular beam epitaxial. *J. Mater. Research*. 1993;8(9):2310-2314. <https://doi.org/10.1557/JMR.1993.2310>
7. Clement M., Iborra E., Sangrador J., Sanz-Hervas A., Vergara L., Aguilar M. Influence of sputtering mechanisms on the preferred orientation of aluminum nitride thin films. *J. Appl. Phys.* 2003;94(3):1495-1500. <https://doi.org/10.1063/1.1587267>
8. Duquenne C., Tessier P.Y., Besland M.P., Angleraud B., Jouan P.Y., Aubry R., Delage S., Djouadi M.A. Impact of magnetron configuration on plasma and film properties of sputtered aluminum nitride thin films. *J. Appl. Phys.* 2008;104(6):063301-1-8. <https://doi.org/10.1063/1.2978226>
9. Yarar E., Hrkac V., Zamponi C., Piorra A., Kienle L., Quandt E. Low temperature aluminum nitride thin films for sensory applications. *AIP Advances*. 2016;6(7):075115-1-11. <https://doi.org/10.1063/1.4959895>
10. Dubois M.-A., Muralt P. Stress and piezoelectric properties of aluminum nitride thin films deposited onto metal electrodes by pulsed direct current reactive sputtering. *J. Appl. Phys.* 2001;89(11):6389-6395. <https://doi.org/10.1063/1.1359162>
11. Kamohara T., Akiyama M., Ueno N., Sakamoto M., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N., Kuwano N. Influence of sputtering pressure on polarity distribution of aluminum nitride thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89:243507-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2405849>
12. Akiyama M., Kamohara T., Ueno N., Sakamoto M., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N. Polarity inversion in aluminum nitride thin films under high sputtering power. *Appl. Phys. Lett.* 2007;90(15):151910-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2721865>
13. Akiyama M., Kamohara T., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N. Influence of oxygen concentration in sputtering gas on piezoelectric response of aluminum nitride thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 93(2). P. 021903-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2957654>
14. Harumoto T., Sannomiya T., Y Matsukawa, Muraishi S., Shi J., Nakamura Y., Sawada H., Tanaka T., Tanishiro Y., Takayanagi K. Controlled polarity of sputter-deposited aluminum nitride on metals observed by aberration corrected scanning transmission electron Microscopy. *J. Appl. Phys.* 2013;113(8):084306-1-7. <https://doi.org/10.1063/1.4792942>
15. Sanz-Hervas A., Iborra E., Clement M., Sangrador J., Aguilar M. Influence of crystal properties on the absorption IR spectra of polycrystalline AlN thin films. *Diamond and Related Materials*. 2003;12(3-7):1186-1189. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(02)00228-5)
16. Киселев Д.А., Жуков Р.Н., Ксенич С.В., Кубасов И.В., Темиров А.А., Тимушкин Н.Г., Быков А.С., Малинкович М.Д., Shvartsman V.V., Лупашку Д.Ц., Пархоменко Ю.Н. Влияние ориентации кремниевой подложки на локальные пьезоэлектрические характеристики пленок LiNbO₃. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016;7:74-80. <https://doi.org/10.7868/S020735281607009X>

Reference:

1. Inoue Sh.-I., Tamari N., Taniguch M. 150 mW deep-ultraviolet light-emitting diodes with large-area AlN nanophotonic light-extraction structure emitting at 265 nm. *Appl. Phys. Lett.* 2017;110(14):141106. <https://doi.org/10.1063/1.4978855>
2. Boltar K.O., Burlakov I.D., Ponomarenko V.P., Filachev A.M., Salo V.V. Solid-state photoelectronics of the ultraviolet range (review). *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016;61(10):1175-85. <https://doi.org/10.1134/S1064226916100041>

3. Priya Sh., Song H.-Ch., Zhou Y., Varghese R., Chopra A., Kim S.-G., Kanno I., Wu L., Ha D.S., Ryu J., Polcawich R.G. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. *Energy Harvesting and Systems*. 2017;4(1):3-39. <https://doi.org/10.1515/ehs-2016-0028>
4. Piprek J. (Ed.). Nitride Semiconductor Devices: Principles and Simulation. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.; 2007. 519 p. ISBN: 978-3-527-61072-3
5. Tsubouchi K., Mikoshiba N. Zero-Temperature-Coefficient SAW Devices on AlN Epitaxial Films. *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*. 1985;32(5):634-644. <https://doi.org/10.1109/T-SU.1985.31647>
6. Rowland L.B., Kern R.S., Tanaka S., Davis R.F. Epitaxial growth of AlN by plasma-assisted, gas-source molecular beam epitaxial. *J. Mater. Research*. 1993;8(9):2310-4. <https://doi.org/10.1557/JMR.1993.2310>
7. Clement M., Iborra E., Sangrador J., Sanz-Hervas A., Vergara L., Aguilar M. Influence of sputtering mechanisms on the preferred orientation of aluminum nitride thin films. *J. Appl. Phys.* 2003;94(3):1495-1500. <https://doi.org/10.1063/1.1587267>
8. Duquenne C., Tessier P.Y., Besland M.P., Angleraud B., Jouan P.Y., Aubry R., Delage S., Djouadi M.A. Impact of magnetron configuration on plasma and film properties of sputtered aluminum nitride thin films. *J. Appl. Phys.* 2008;104(6):063301-1-8. <https://doi.org/10.1063/1.2978226>
9. Yasar E., Hrkac V., Zamponi C., Piorra A., Kienle L., Quandt E. Low temperature aluminum nitride thin films for sensory applications. *AIP Advances*. 2016;6(7):075115-1-11. <https://doi.org/10.1063/1.4959895>
10. Dubois M.-A., Murali P. Stress and piezoelectric properties of aluminum nitride thin films deposited onto metal electrodes by pulsed direct current reactive sputtering. *J. Appl. Phys.* 2001;89(11):6389-95. <https://doi.org/10.1063/1.1359162>
11. Kamohara T., Akiyama M., Ueno N., Sakamoto M., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N., Kuwano N. Influence of sputtering pressure on polarity distribution of aluminum nitride thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2006;89:243507-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2405849>
12. Akiyama M., Kamohara T., Ueno N., Sakamoto M., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N. Polarity inversion in aluminum nitride thin films under high sputtering power. *Appl. Phys. Lett.* 2007;90(15):151910-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2721865>
13. Akiyama M., Kamohara T., Kano K., Teshigahara A., Kawahara N. Influence of oxygen concentration in sputtering gas on piezoelectric response of aluminum nitride thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2008;93(2):021903-1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2957654>
14. Harumoto T., Sannomiya T., Matsukawa Y., Muraishi S., Shi J., Nakamura Y., Sawada H., Tanaka T., Tanishiro Y., Takayanagi K. Controlled polarity of sputter-deposited aluminum nitride on metals observed by aberration corrected scanning transmission electron Microscopy. *J. Appl. Phys.* 2013;113(8):084306-1-7. <https://doi.org/10.1063/1.4792942>
15. Sanz-Hervas A., Iborra E., Clement M., Sangrador J., Aguilar M. Influence of crystal properties on the absorption IR spectra of polycrystalline AlN thin films. *Diamond and Related Materials*. 2003;12(3-7):1186-9. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(02)00228-5)
16. Kiselev D.A., Zhukov R.N., Ksenich S.V., Kubasov I.V., Temirov A.A., Timushkin N.G., Bykov A.S., Malinkovich M.D., Shvartsman V.V., Lupascu D.C., Parkhomenko Yu.N. The effect of silicon-substrate orientation on the local piezoelectric characteristics of LiNbO₃ films. *Poverkhnost'. rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya = Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2016;10(4):742-7. <https://doi.org/10.1134/S1027451016040091>

Об авторах:

Фищенко Валерий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, начальник научно-производственной лаборатории № 1, ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест» (121108, Россия, Москва, ул. Ивана Франко, д. 4)

Зяблюк Константин Николаевич, кандидат физико-математических наук, начальник научно-производственной лаборатории № 4, ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест» (121108, Россия, Москва, ул. Ивана Франко, д. 4)

Сенокосов Эдуард Александрович, доктор физико-математических наук, профессор заведующий кафедрой твердотельной электроники и микроэлектроники Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко (MD - 3300, ПМР, Тирасполь, ул. 25 Октября, д. 128)

Чукита Виталий Исакович, старший преподаватель кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко (MD - 3300, ПМР, Тирасполь, ул. 25 Октября, д. 128)

Киселев Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС» (119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4)

About authors:

Valeriy S. Feshchenko, Dr.Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Research and Production Laboratory № 1 of Production-Technological Center “UralAlmazInvest”, Ltd. (4, Ivan Franko St., Moscow 121108, Russia).

Konstantin N. Zyablyuk, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of Research and Production Laboratory № 4 of Production-Technological Center “UralAlmazInvest”, Ltd. (4, Ivan Franko St., Moscow 121108, Russia).

Eduard A. Senokosov, Dr.Sci. (Physics and Mathematics), professor, Head of the Department of Solid-State Electronics and Microelectronics, T.G. Shevchenko Dniester State University (128, 25 of October St., Tiraspol MD – 3300, PMR)

Vitaliy I. Chukita, Senior Lecturer at the Department of Solid-State Electronics and Microelectronics, T.G. Shevchenko Dniester State University (128, 25 of October St., Tiraspol MD – 3300, PMR)

Dmitriy A. Kiselev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Department of Materials sciences of Semiconductors and Dielectrics, The Federal State Educational Institution of the Higher Education National University of Science and Technology MISiS (4, Leninsky pr., Moscow 119049, Russia)

Моделирование пульсаций отрицательного напряжения в системе накачки заряда и на выходе микросхемы двухполярного DC–DC преобразователя LM27762

**В.К. Битюков,
Н.Г. Михневич,
В.А. Петров[@]**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

Представлены результаты моделирования работы микросхемы двухполярного DC–DC преобразователя LM27762 с помощью программного обеспечения WEBENCH *Power Designer*, разработанного компанией-производителем *Texas Instruments*. Расчеты проведены непосредственно на сайте компании. При выполнении экспериментальных исследований была использована полученная от производителя микросхемы LM27762 готовая тестовая плата – тестовый модуль LM27762EVM. Наличие тестовой платы, модели и программного обеспечения, созданных производителем микросхемы, снимает все проблемные вопросы сопоставления результатов моделирования с результатами эксперимента, которые могут быть связаны с использованием компонентов схемы с отличающимися характеристиками и влиянием разводки платы. В технической документации на микросхему отсутствует информация о характеристиках использованных в микросхеме ключей и конденсаторов. К сожалению, нет и описания разработанной модели. Основное внимание уделено влиянию токов нагрузки на пульсации отрицательного напряжения на выходе системы накачки заряда и выходе микросхемы. Моделирование показало, что уже при токе нагрузки 40 мА система регулирования переходит в режим работы с постоянной частотой накачки заряда, в то время как согласно результатам экспериментов, система регулирования продолжает работать в режиме пачек импульсов и при большем токе 50 мА. Для такого тока пачка состоит из 15 импульсов переноса заряда, промежутки между пачками составляют 3 мкс, а увеличение отрицательного напряжения за пачку импульсов также составляет примерно 75 мВ. Выполнено сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов. Показано, что созданная производителем модель работы микросхемы LM27762 является приближенной. Установлено, что из-за большого количества допущений в созданной модели микросхемы при работе микросхемы в режиме пачек, который реализуется при относительно малых токах нагрузки, расхождения по числу циклов «разряд-заряд», по размаху пульсаций на выходе системы накачки и по промежуткам времени между пачками весьма значительны. Мо-

дель работы микросхемы не позволяет получать данные по пульсациям отрицательного напряжения на ее выходе. Эксперименты показали, что приводимые в документации на микросхему очень ограниченные данные по пульсациям выходного напряжения являются заниженными. Они существенно зависят от входного и выходного напряжения и токов нагрузки. В целом сравнение результатов моделирования работы системы накачки заряда микросхемы LM27762 при ее работе в режиме пачек с соответствующими результатами экспериментов показывает, что на качественном уровне совпадение результатов расчета с экспериментом можно считать удовлетворительным. Обнаруженное расхождение результатов экспериментов с результатами моделирования, полученными при использовании модели производителя LM27762, показали, что реальная проверка совершенства микросхем должна опираться на три фактора: эксперимент, моделирование и совместный анализ полученных результатов.

Ключевые слова: моделирование, тестирование, пульсации, микросхема, DC–DC преобразователь, накачка заряда, инвертор, «летающий» конденсатор, LDO, режимы пачки импульсов и постоянной частоты.

Для цитирования: Битюков В.К., Михневич Н.Г., Петров В.А. Моделирование пульсаций отрицательного напряжения в системе накачки заряда и на выходе микросхемы двухполярного DC–DC преобразователя LM27762. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):80-96 <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-80-96>

Simulation of negative voltage ripples at the output of charge pump system and the microcircuit output of bipolar LM27762 DC–DC converter

Vladimir K. Bityukov,
Nikolay G. Mikhnevich,
Vadim A. Petrov[@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
^{@Corresponding author, e-mail: vapetrov@mirea.ru}

The operation of the LM27762 bipolar DC–DC converter chip was simulated using WEBENCH software developed by Texas Instruments. The main attention is paid to the influence of the load current on the negative voltage ripples at the output of the charge pumping system and the chip output. The results of the calculations are compared with the results of the experiments. It is shown that the model of operation of the microcircuit created by the manufacturer is approximate. When the microcircuit operates in burst mode, which is realized at relatively low load currents, the discrepancies in the number of discharge – charge cycles, voltage poles at the output of the pumping system, and in the time intervals between bursts are very significant. The model does not allow obtaining data on the ripples of the negative voltage at the chip output. Experiments have shown that the very limited data on output voltage ripples given in the microchip documentation is underestimated. They significantly depend on the input and output voltage and load currents. The discrepancy between the experimental results and the simulation results obtained using the model of the manufacturer LM27762 showed that the actual perfection test of the microcircuits should be based on three factors: experiment, simulation and joint analysis of the obtained results. The simulation results of the operation of the LM27762 circuit board of bipolar DC–DC converter using the WEBENCH Power Designer software developed by the Texas Instruments

manufacturing company are presented. The calculations are made at the company's website. For the experimental studies the ready-for-use test board of LM27762EVM test module, provided by the manufacturer of the LM27762 circuit board, is used. The use of the test board, simulator, and software developed by the manufacturer of the circuit board ensures to have no problem while comparing the simulation and experimental results, which can be associated with the use of circuit components with differing characteristics, or with the board layout. The technical documentation for the circuit board does not have information about the characteristics of the keys and capacitors used in the circuit board. Unfortunately, a description of the developed model is not available either. The information mainly concerns the influence of load currents on negative voltage ripples at the charge pump system output and at circuit board output. The simulation has shown that already at a load current of 40 mA, the control system starts operating with a permanent charge pump frequency, while, according to the results of the experiments, the control system continues to work in the pulse train mode even at a higher current of 50 mA. The pulse train for such current consists of 15 charge transfer pulses, the interval between the trains is 3 μ s, and the increase in negative voltage per pulse train is also about 75 mV. The comparison made of simulation results and the results of the experiment have shown that the model of operation of the LM27762 circuit board, created by the manufacturer, is approximate. It has been established that owing to a large number of assumptions in the developed circuit board model, when it operates in the pulse train mode, which is realized at relatively low load currents, the discrepancies are rather significant in the number of discharge-charge cycles, the pulsation amplitude at the charge pump system output, and the time intervals between the pulse trains. The simulation of operation of the circuit board does not give data on the negative voltage pulses at its output. The experiments have shown that the data provided in the documentation on the circuit board output voltage pulses, though quite limited, are underestimated. They largely depend on the input and output voltage and load currents. In general, the comparison of the results of simulation of the operation of the charge pump system of the LM27762 circuit board, when it operates in the pulse train mode, and the corresponding experimental results shows that the coincidence of the calculation results and those of the experiment in terms of quality can be considered satisfactory. The discrepancy between the experimental and simulation results, obtained using the manufacturer's LM27762 model has proved that the true testing of the quality of circuit boards requires three factors to be taken into consideration: experiment, simulation and joint analysis of the obtained results.

Keywords: modeling, testing, ripples, integrated circuit, DC-DC converter, charge pump, inverter, flying capacitor, LDO, burst and constant frequency modes.

For citation: Bitukov V.K., Mikhnevich N.G., Petrov V.A. Simulation of negative voltage ripples at the output of charge pump system and the microcircuit output of bipolar LM27762 DC-DC converter. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(1):80-96(in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-80-96>

Введение

Микросхемы стабилизированных двухполярных DC-DC преобразователей являются наиболее сложными устройствами мобильных источников вторичного электропитания. Их сложность в значительной мере обусловлена тем, что для инвертирования напряжения используется накачка заряда, а на выходе отрицательного напряжения стоит LDO – линейный стабилизатор с малым падением напряжения. Выпуск подобных микросхем начался совсем недавно. Если не считать микросхемы [1], предназначенной специально для питания мобильных жидкокристаллических панелей, можно найти лишь две микросхемы универсального применения [2, 3]. Вероятно, первой из них была микросхема LTC3260 (*Linear Technology*) [2]. Эта микросхема является комбинированной.

Отрицательное напряжение вырабатывает инвертор с накачкой заряда, за которым следует LDO (линейный стабилизатор с малым падением напряжения), а положительное выходное напряжение вырабатывает LDO положительного напряжения. В этой микросхеме система накачки заряда в тракте получения отрицательного напряжения с целью повышения КПД работает в режиме пачек импульсов при малых токах нагрузки, и в режиме постоянной частоты при больших токах нагрузки. LDO в тракте отрицательного напряжения уменьшает пульсации напряжения на выходе, что особенно важно для режима пачек.

По-видимому, самой новой разработкой двухполярного комбинированного источника электропитания, в котором используется накачка заряда, является микросхема LM27762 (*Texas Instruments*) [3]. Алгоритм ее работы в [3] не описан. В [4] и [5] представлены результаты экспериментальных исследований, позволивших получить некоторые сведения об алгоритме работы системы стабилизации отрицательного выходного напряжения в двух режимах. В связи с тем, что этот алгоритм зависит от тока нагрузки и соотношения между величинами входного и выходного напряжения, представляется целесообразным провести полное моделирование работы LM27762 в различных режимах, и прежде всего с целью сравнения в режимах, охваченных экспериментом в [4] и [5]. Последнее и было основной задачей настоящей работы.

Объект и методика моделирования

В соответствии с [3] LM27762 может вырабатывать напряжения положительной и отрицательной полярности, величины которых в диапазонах от ± 1.5 В до ± 5.0 В могут устанавливаться отдельно с помощью необходимых резисторов в цепях обратной связи LDO. Диапазон входного напряжения – от 2.7 В до 5.5 В. Выходные токи не должны превышать ± 250 мА. Несомненным достоинством этой микросхемы является низкая величина тока покоя, составляющая всего 390 мкА, что дает возможность получать высокие значения КПД при малых токах нагрузки. Высокая тактовая частота осциллятора 2 МГц по замыслу производителя микросхемы должна уменьшать выходное сопротивление и пульсации напряжения.

Блок-схема LM27762 имеется в [3]. На ней представлена инвертирующая накачка заряда с использованием внешнего «летающего» конденсатора (выводы C1+ и C1–) и показаны два LDO, один из которых формирует напряжение отрицательной полярности, а другой создает выходное напряжение положительной полярности без накачки заряда.

LM27762 имеет ряд новых важных особенностей в системе управления. В частности, у нее есть выводы EN+ и EN–, позволяющие независимо включать и отключать положительный LDO и отрицательный LDO с системой накачки заряда. Имеется система мониторинга PGOOD, которую можно отключать.

Использованный в LM27762 принцип работы системы накачки заряда с инвертированием напряжения показан на рис. 1 [3].

Схема инвертора имеет три внешних конденсатора – входной C_{IN} , «летающий» C_1 , и стоящий перед LDO конденсатор C_{spout} , иногда обозначаемый в [3] как C_{sp} . Инвертируемое входное напряжение V_{IN} берется с входного конденсатора C_{IN} . Заряд с помощью четырех ключей S1...S4 и «летающего» конденсатора C_1 переносится на конденсатор C_{spout} . Цикл переноса состоит из двух стадий. В первой происходит заряд «летающего» конденсатора C_1

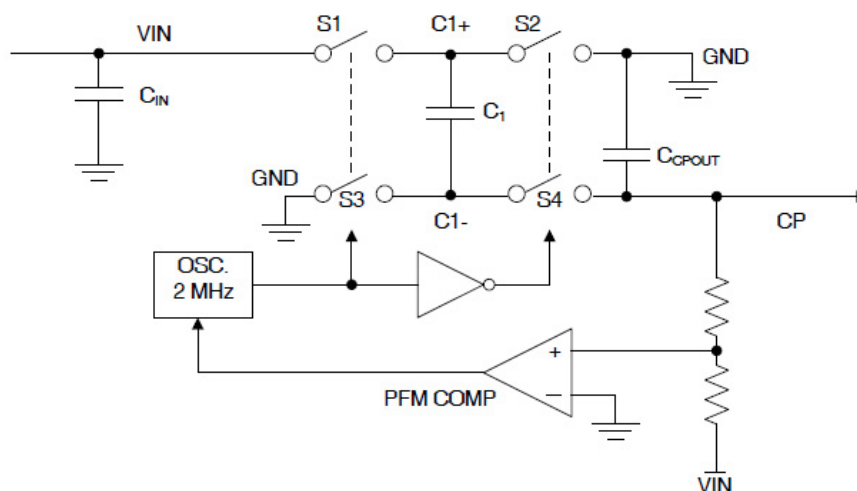


Рис. 1. Принцип инвертирования напряжения.

от входного напряжения на C_{IN} при замыкании ключей S1 и S3, а во второй происходит перенос заряда от C_1 к $C_{срout}$ при замыкании ключей S2 и S4. Поскольку при этом положительный полюс конденсатора $C_{срout}$ подсоединен к «земле», напряжение на его отрицательном полюсе, близкое к значению $-VIN$, подается на выход и на систему регулирования через цепь обратной связи. Алгоритм работы системы регулирования и компаратора частотно-импульсной модуляции (PFM COMP) в [3] не описан.

Результаты моделирования радиоэлектронных компонент и устройств представлены в ряде работ, например, [6–14]. При этом использовались модели компонентов с упрощающими и, как правило, неизвестными пользователям допущениями, которые неизбежно приводят к снижению достоверности моделирования. Однако с микросхемой LM27762 ситуация существенно иная.

Модель, описывающая различные варианты микросхемы LM27762, разработана ее производителем, компанией Texas Instruments, для программного обеспечения WEBENCH, также разработанного этой компанией. Весьма важным оказалась возможность получения от производителя LM27762 готовой тестовой платы – тестового модуля LM27762EVM [15]. Эта возможность и использовалась в настоящей работе. Наличие тестовой платы, модели и программного обеспечения, созданных производителем микросхемы, снимает все проблемные вопросы сопоставления результатов моделирования с результатами эксперимента, которые могут быть связаны с использованием компонентов схемы с отличающимися характеристиками и влиянием разводки платы. Принципиальная электрическая схема модуля LM27762EVM показана на рис. 2. Там же показано размещение контрольных точек для подключения измерительных приборов.

При установленных на плате резисторах R1 и R3, равных 249 кОм, и резисторах R2 и R4, равных 499 кОм, напряжение на выходах VOUT+ и VOUT– было равно 1.8 В. Для запуска программы моделирования на сайте компании *Texas Instruments* было необходимо ввести только значения входного напряжения и тока нагрузки. Программа сама создавала схему, которая использовалась для проведения расчетов. На рис. 3 показан пример такой схемы для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 15 мА. Ниже схемы показан список выводимых результатов расчета.

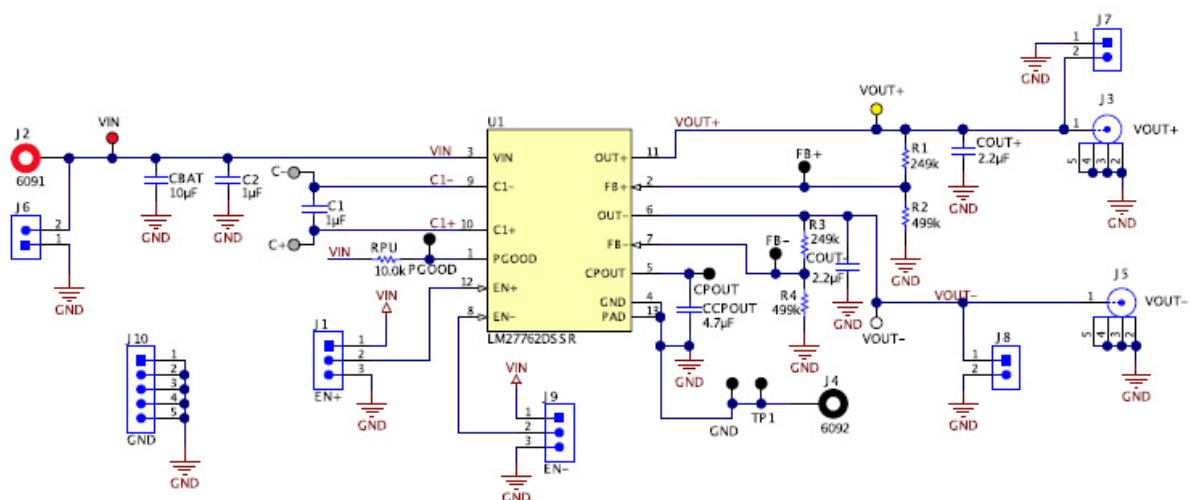


Рис. 2. Схема платы модуля LM27762EVM [15].

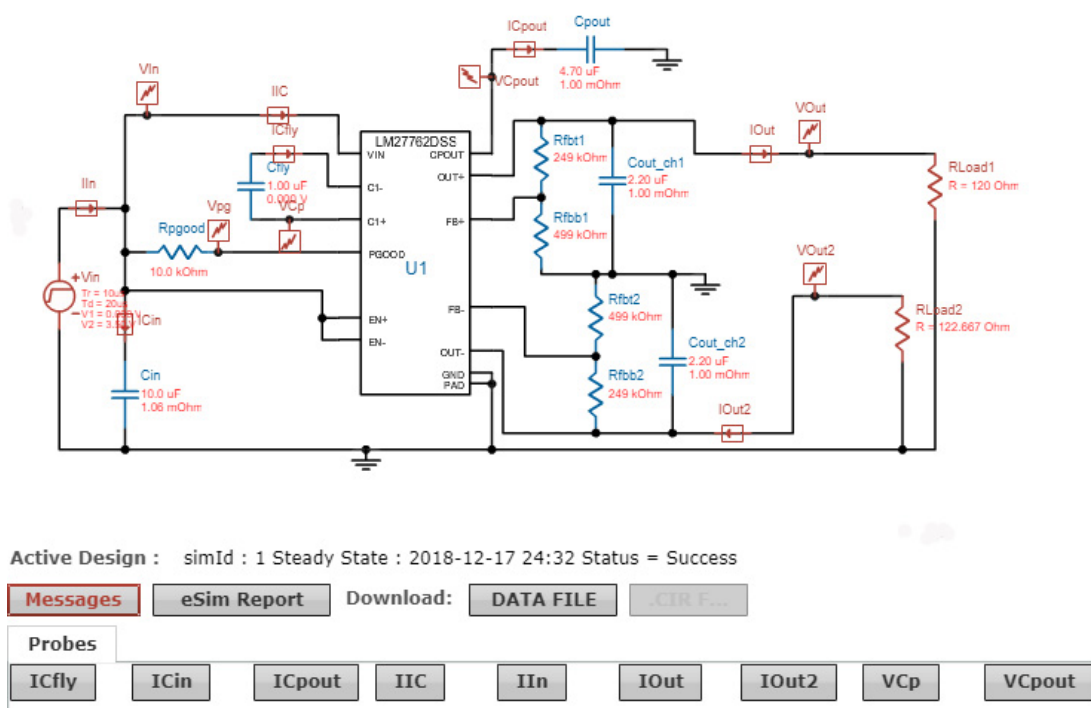


Рис. 3. Схема моделирования для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 15 мА с набором контрольных точек.

Результаты моделирования для входного напряжения 3.5 В и выходного –1.8 В

Поскольку основными причинами возникновения пульсаций на выходе отрицательного напряжения в микросхеме LM27762 являются накачка заряда и система регулирования величины отрицательного выходного напряжения, в настоящей работе им было уделено основное внимание. Результаты моделирования (sim) напряжения во времени t на положительном полюсе «летающего» конденсатора U_{fbDC+} (на схеме рис. 3 оно обозначено

как V_{Cp}) и переменной составляющей $U_{out\sim}$ напряжения на выходном конденсаторе C_{pout} системы накачки (на схеме оно обозначено как V_{Cpout}) показаны на рис. 4–12. Выводились также значения входного V_{IN} и выходных V_{Out} и V_{Out2} напряжений.

Результаты расчетов для варианта, показанного на рис. 3, представлены на рис. 4.

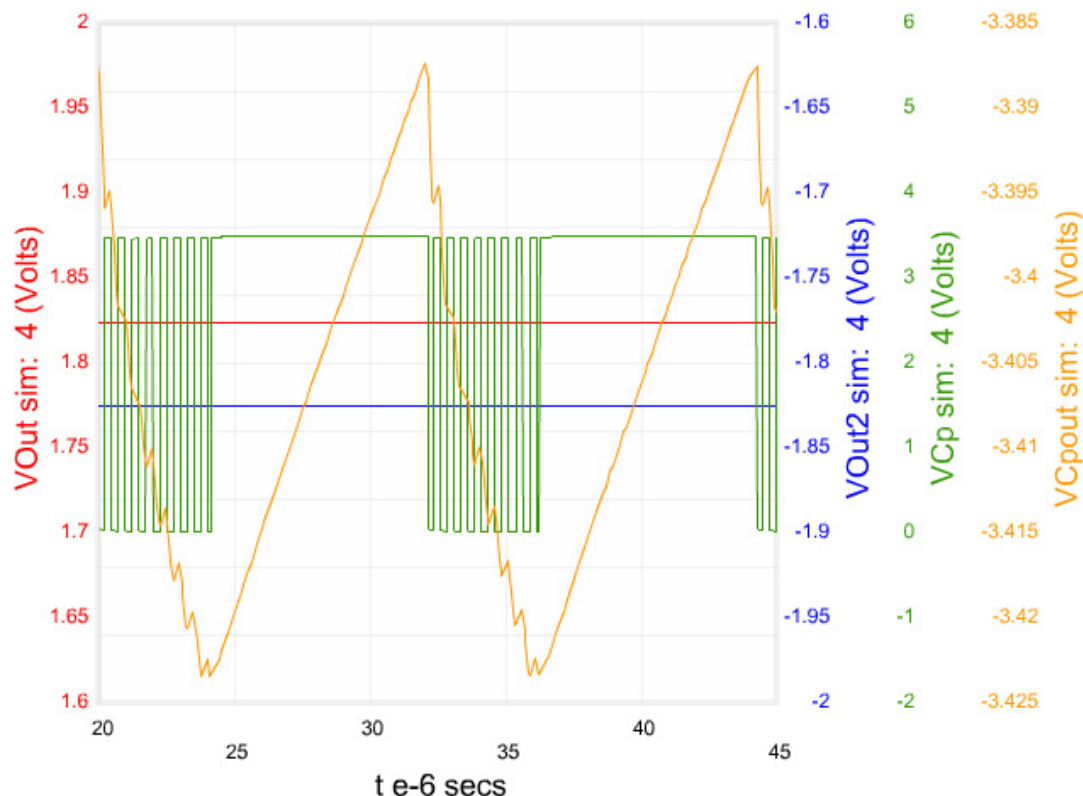


Рис. 4. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и V_{Cpout} для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 15 мА с набором контрольных точек, показанных на рис. 3.

Из рисунка видно, что накачка заряда в этом случае осуществлялась пачками из девяти циклов «разряд-заряд» «летающего» конденсатора, разделенных временным промежутком времени около 8 мкс. Более детально циклы пачки показаны на рис. 5. Период циклов составлял 0.5 мкс, что соответствовало тактовой частоте осциллятора 2 МГц. Последний, девятый цикл накачки, был по времени неполным. За 9 циклов переноса заряда абсолютная величина отрицательного напряжения на выходе из системы накачки V_{Cpout} увеличивалась примерно на 35 мВ. Выходное напряжение V_{Out2} составляло –1.825 В. Уменьшение цены деления на оси V_{Out2} не позволило обнаружить пульсации отрицательного напряжения на выходе микросхемы. По-видимому, в модели, созданной разработчиком микросхемы, пульсации отрицательного выходного напряжения не учитываются, и считается, что с пульсациями V_{Cpout} справляется отрицательный LDO, стоящий за системой накачки заряда.

На рис. 6 показаны результаты для тока нагрузки 30 мА при тех же значениях входного и выходного напряжений. Накачка заряда в этом случае осуществлялась пачками из двадцати шести циклов «разряд-заряд» «летающего» конденсатора, разделенных временным промежутком времени около 4.5 мкс. За 26 циклов переноса заряда отрицательное напряжение на выходе из системы накачки уменьшалось примерно на 43 мВ.

Полученные результаты расчетов для тока нагрузки 40 мА (рис. 7) показали, что в этом случае накачка заряда осуществляется уже не пачками, а является накачкой с постоянной тактовой частотой, равной 2 МГц. Однако на этом рисунке время разряда меньше, чем обычно (250 нс), цикл заряда начинается раньше, и на увеличении напряжения V_{Cpout} виден излом формы. Вследствие перехода к режиму постоянной частоты накачки размах пульсаций напряжения V_{Cpout} резко уменьшился и составил около 2 мВ.

При значениях тока нагрузки 50 мА и более, вплоть до 250 мА, такой особенности нет, и время заряда равно времени разряда (рис. 8).

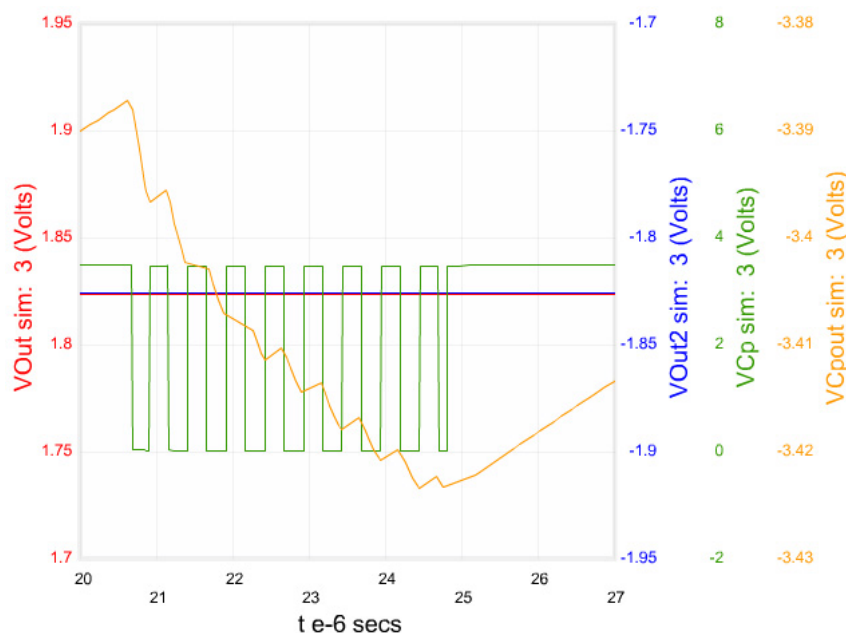


Рис. 5. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и V_{Cpout} для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 15 мА в большем масштабе по времени.

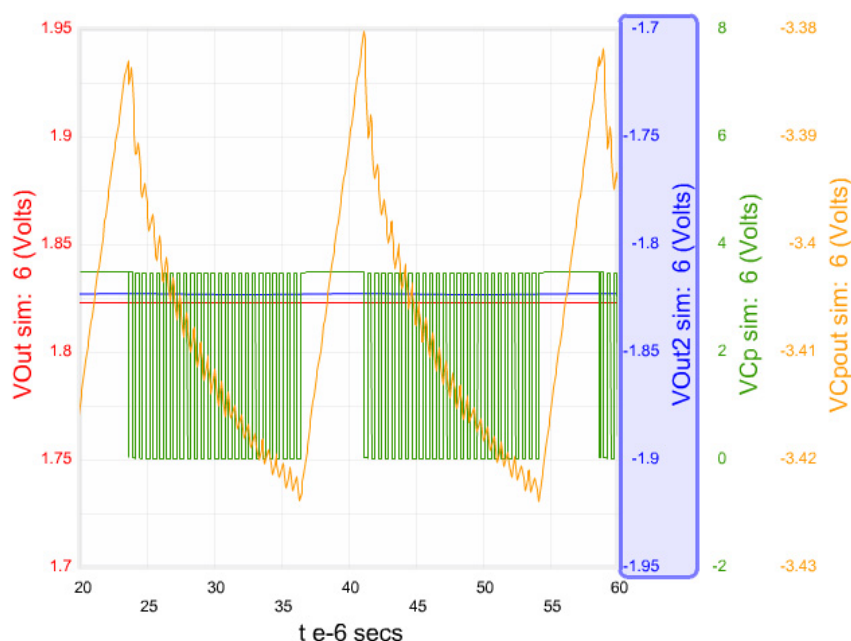


Рис. 6. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и V_{Cpout} для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 30 мА.

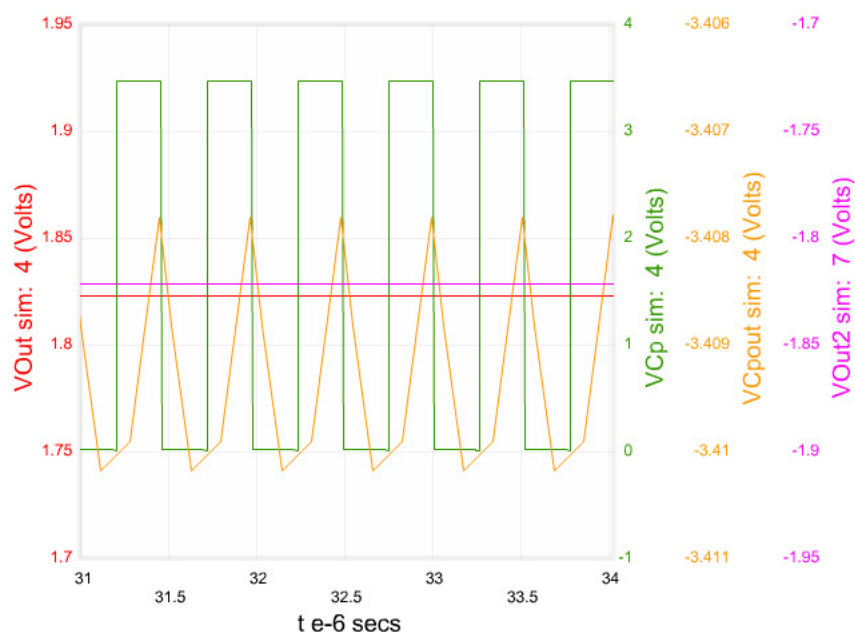


Рис. 7. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и V_{Cpout} для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 40 мА.

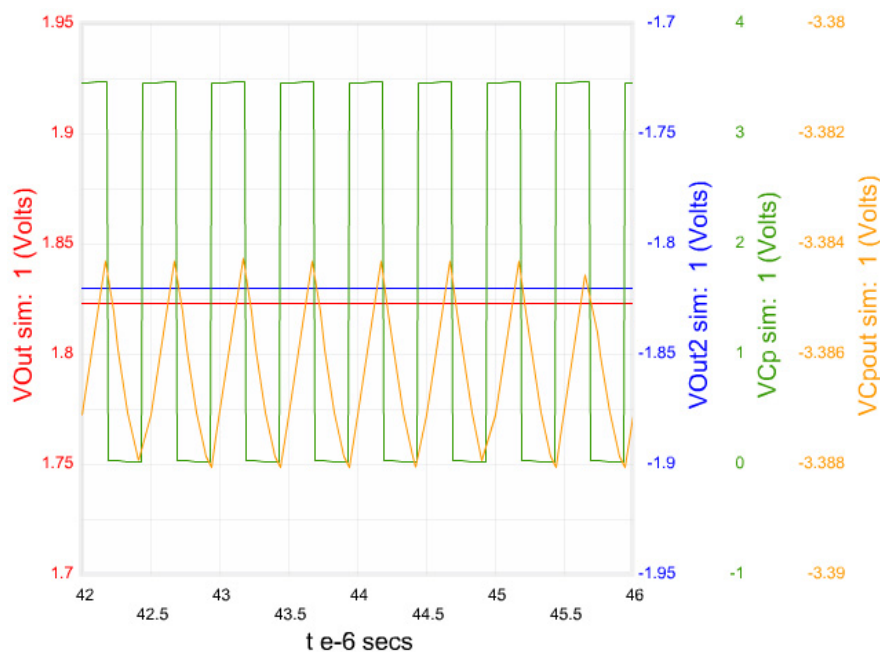


Рис. 8. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , V_{Cp} и V_{Cpout} для входного напряжения 3.5 В и тока нагрузки 50 мА.

Результаты моделирования для входного напряжения 5.5 В и выходного -4.9 В

Этот режим является предельным режимом работы микросхемы, в котором входное напряжение является максимальным и составляет 5.5 В. Моделирование было проведено для токов нагрузки 10, 15, 25, 50, 70, 80, 100 и 250 мА.

На рис. 9 в качестве примера показана схема моделирования для тока 15 мА с измененными резисторами в цепи обратной связи системы регулирования. Результаты моделирования для этого тока нагрузки показаны на рис. 10.

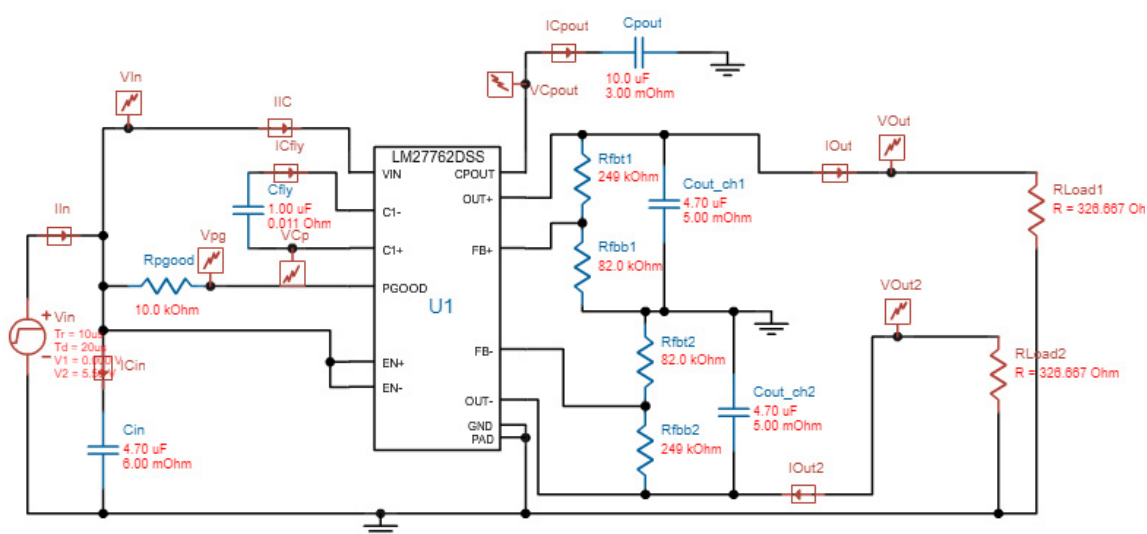


Рис. 9. Схема моделирования для входного напряжения 5.5 В, выходного напряжения -4.9 В и тока нагрузки 15 мА с набором контрольных точек.

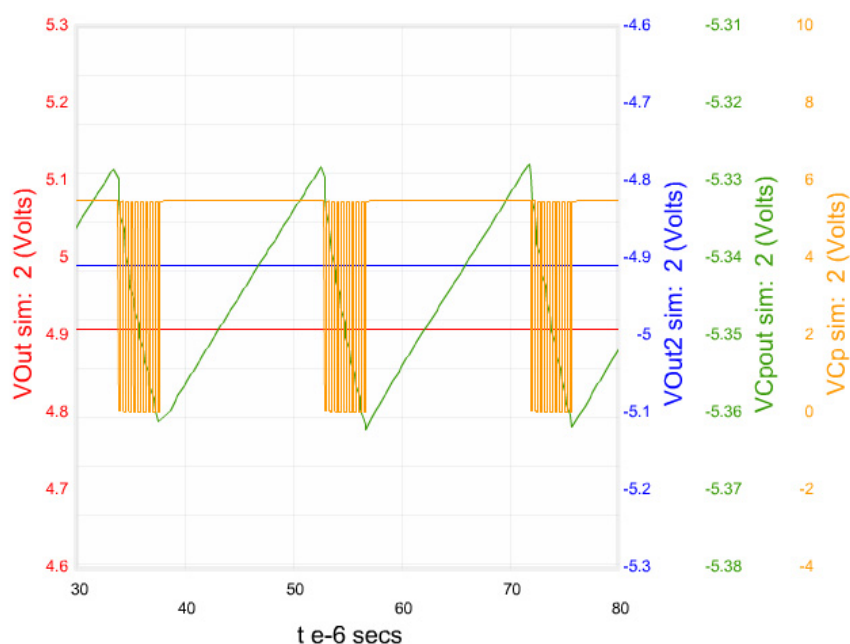


Рис. 10. Результаты моделирования величин VOut, VOut2, VCp и VC_{pout} для входного напряжения 5.5 В и тока нагрузки 15 мА.

Видно, что система регулирования работает в режиме пачек, в пачке 9 импульсов, промежутки времени между пачками примерно 16 мкс, за время переноса в пачке величина отрицательного напряжения VC_{pout} увеличилась на 33 мВ. При токе нагрузки 10 мА в пачках было 8 импульсов, промежутки времени между пачками составляли 22 мкс, величина VC_{pout} увеличивалась на 30 мВ, при токе нагрузки 25 мА соответствующие значения составили 12 импульсов, 10 мкс и 35 мВ, а при токе 50 мА – 31 импульс, 5 мкс и 38 мВ соответственно.

Результаты расчетов показали, что при токе нагрузки 70 мА система накачки заряда уже работает в режиме постоянной частоты. При этом в ходе переноса заряда величина VC_{pout} изменяется всего на 1 мВ (рис. 11).

Режимы накачки заряда с постоянной частотой сохраняются и при токах нагрузки 80, 100 и 250 мА, но с увеличением тока увеличение VC_{pout} при каждом переносе заряда становится больше и при 250 мА составляет 8 мВ (рис. 12).

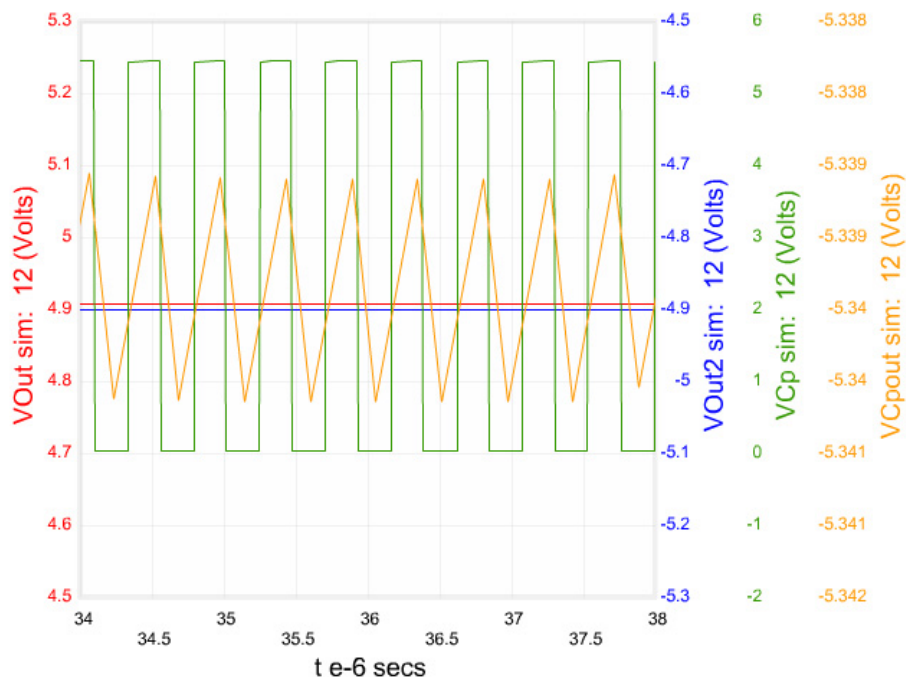


Рис. 11. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , VC_p и VC_{pout} для входного напряжения 5.5 В и тока нагрузки 70 мА.

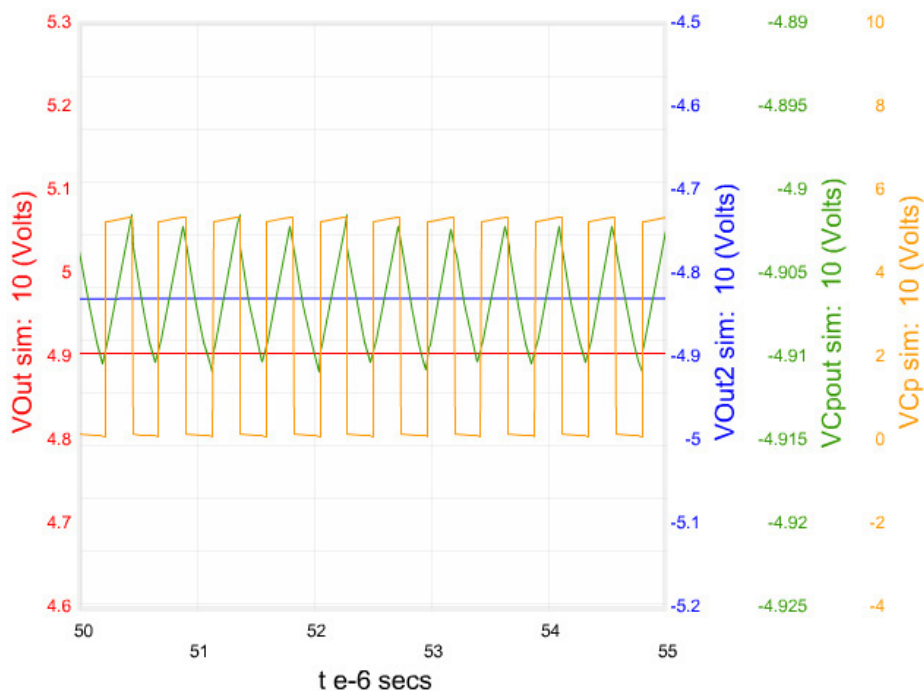


Рис. 12. Результаты моделирования величин V_{Out} , V_{Out2} , VC_p и VC_{pout} для входного напряжения 5.5 В и тока нагрузки 250 мА.

Сравнение результатов моделирования с результатами экспериментов

Полученные ранее результаты экспериментальных исследований представлены подробно в [4, 5]. В данном разделе даны лишь их некоторые сравнения с результатами моделирования. На рис. 13 показаны экспериментальные результаты для входного напряжения 3.5 В, выходного напряжения -1.8 В и тока нагрузки 15 мА. Показаны формы сигналов на положительном полюсе «летающего» конденсатора, измеренные при открытом входе осциллографа, и переменные составляющие напряжения на выходе из системы накачки заряда, измеренные при закрытом входе. Обозначения на этом рисунке соответствуют обозначениям, принятым выше для результатов моделирования.

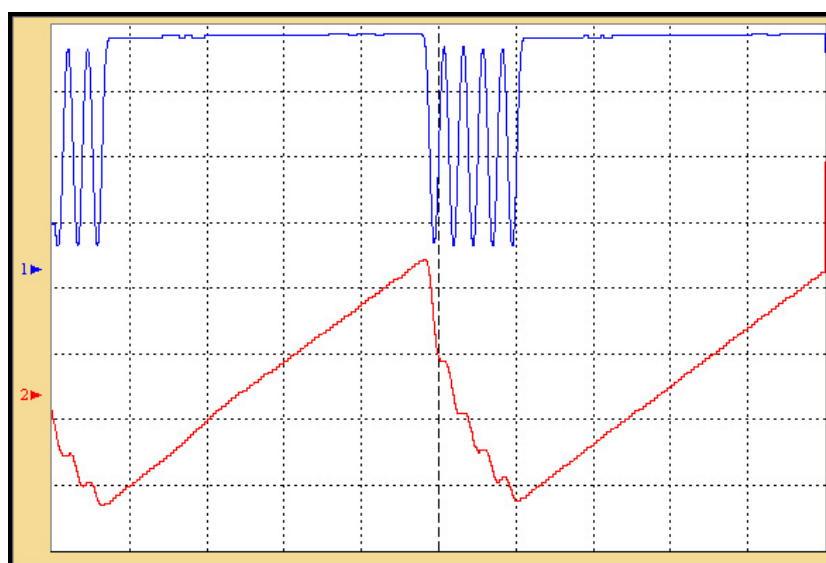


Рис. 13. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений 1 – V_{Cp} (1 В/дел) и 2 – $V_{C_{pout}}$ (20 мВ/дел) при токе нагрузки 15 мА.

Видно, что пачка импульсов состоит из 5 циклов «разряд-заряд», увеличение отрицательного напряжения $V_{C_{pout}}$ за эти циклы составляет примерно 75 мВ, а временные промежутки между пачками составляют 8 мкс. Результаты, полученные при моделировании (рис. 4 и 5, представленные выше), составляют соответственно 9 циклов, 35 мВ и 8 мкс.

Моделирование показало, что уже при токе нагрузки 40 мА система регулирования переходит в режим работы с постоянной частотой накачки заряда, в то время как согласно результатам эксперимента, система регулирования продолжает работать в режиме пачек импульсов и при большем токе 50 мА. Для такого тока пачка состоит из 15 импульсов переноса заряда, промежутки между пачками составляют 3 мкс, а увеличение отрицательного напряжения $V_{C_{pout}}$ за пачку импульсов также составляет примерно 75 мВ.

В таблице результаты моделирования для входного напряжения 5.5 В и выходного напряжения -4.9 В сравниваются с результатами соответствующих экспериментов.

В этой таблице $\Delta V_{C_{pout}}$ – увеличение отрицательной величины напряжения $V_{C_{pout}}$ за пачку импульсов, V_{out-pp} – размах пульсаций отрицательного напряжения на выходе микросхемы. Прочерк в некоторых ячейках означает, что измерения соответствующего параметра для установленного в первом столбце значения тока нагрузки не проводились. Представленные в таблице величины V_{out-pp} могли быть получены только эксперимен-

тально. Примеры результатов их измерения при токах нагрузки 50 мА (режим пачек) и 250 мА (режим постоянной частоты накачки при максимальном токе нагрузки) показаны на рис. 14 и 15. Моделирование, как было отмечено выше, не обнаруживает пульсаций отрицательного выходного напряжения.

Результаты моделирования и эксперимента для $U_{вх}=5.5$ В и $U_{вых}=-4.9$ В

Ток нагрузки, мА	Результаты моделирования			Результаты экспериментов			
	Число импульсов в пачке	Промежуток между пачками, мкс	$\Delta V_{C_{out}}$ мВ	Число импульсов в пачке	Промежуток между пачками, мкс	$\Delta V_{C_{out}}$ мВ	V_{out-pp} мВ
10	8	22	30	3	17	125	1.8
15	9	16	30	3.5	10	130	2.2
25	12	10	35	4	7	148	4
50	31	5	38	5	3.5	148	5.5
70	Накачка с постоянной частотой 2 МГц		1	—	—	—	—
80			1	8	2.2	148	22
100			3	15	2	140	34
107			—	>25	1.7	144	38
109			—	Накачка с постоянной частотой 2 МГц		21.6	2.2
150			—			26.8	6.4
250			8			36	8.2

Из таблицы видно, что результаты моделирования расходятся с результатами экспериментов весьма существенно. Прежде всего это относится к значениям токов нагрузки, при которых происходит переход от режима накачки пачками импульсов к режиму накачки с постоянной частотой. В режиме пачек при одинаковых токах нагрузки велико отличие по числу импульсов переноса в пачке. Величины суммарного за пачку повышения отрицательного напряжения на выходе из системы накачки при одних и тех же токах отличаются примерно в 3 раза. Промежутки времени между пачками различаются не очень сильно.

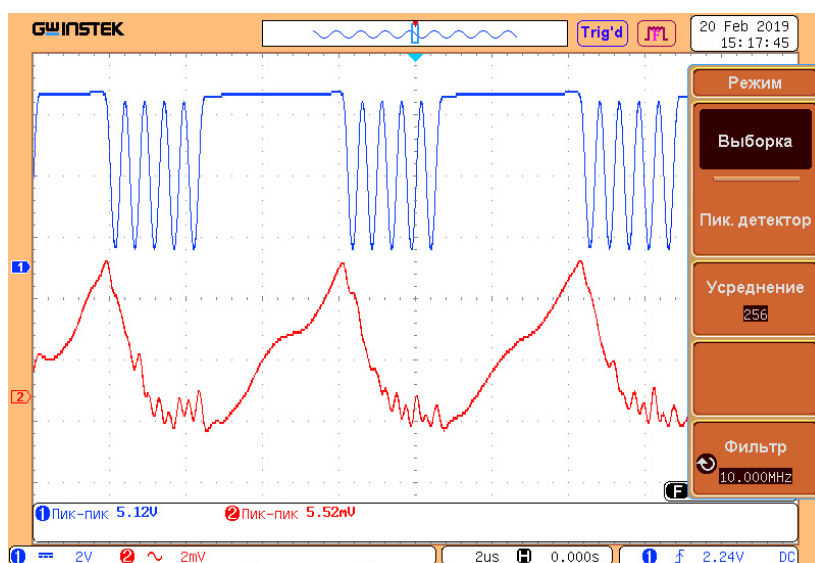


Рис. 14. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений 1 – V_{Cp} (2 В/дел) и 2 – $V_{out\sim}$ (2 мВ/дел) при токе нагрузки 50 мА.

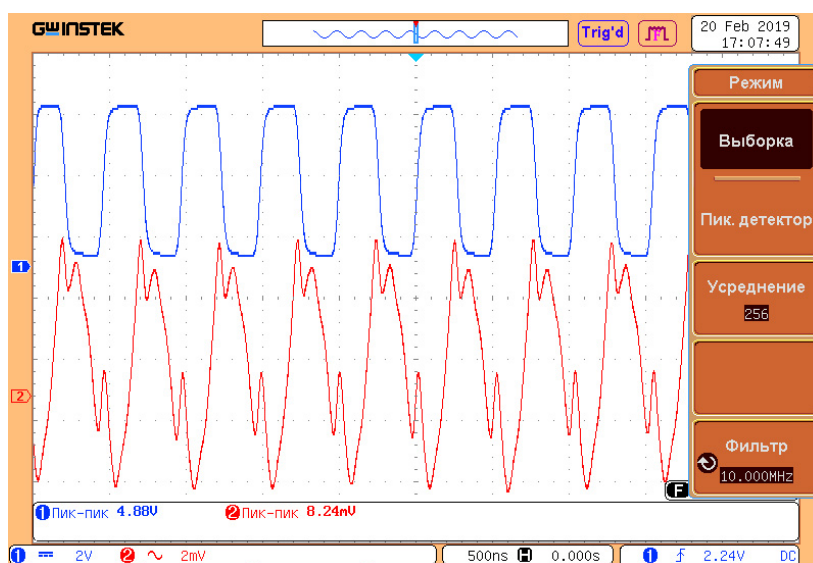


Рис. 15. Формы сигналов (500 нс/дел) напряжений 1 – V_{Cr} (2 В/дел) и 2 – V_{out} (2 мВ/дел) при входном напряжении 5.5 В, выходном напряжении –4.9 В и токе нагрузки 250 мА.

Анализ полученных результатов

Производитель микросхемы LM27762 компания *Texas Instruments* предоставляет возможность пользователям на основе созданной модели LM27762 выполнять проекты в программном обеспечении *WEBENCH Power Designer*. Расчеты проводятся непосредственно на сайте компании. К сожалению, описания разработанной модели нет. Однако в очень кратком описании инвертора, имеющемся в [3], отмечается, что «*выходные характеристики схемы инвертора могут быть аппроксимированы идеальным источником напряжения с последовательно соединенным резистором. Напряжение источника равно $(-V_{in})$. Выходное сопротивление R_{out} является функцией сопротивления замкнутых MOSFET ключей, частоты осциллятора, емкости и ESR конденсаторов C_1 и C_{cr} . Поскольку переключаемый ток заряда и разряда C_1 приблизительно равен двум значениям выходного тока, влияние ESR конденсатора накачки C_1 умножается на 4 в выходном сопротивлении. Выходной конденсатор системы накачки C_{cr} заряжается и разряжается при токе, приблизительно равном выходному току; следовательно, величина его ESR должна учитываться только один раз в выходном сопротивлении*». Хотя это замечание относится только к той части микросхемы, которая отвечает за накачку заряда, а другой информации в [3] нет, как нет и характеристик использованных в микросхеме ключей и конденсаторов, ясно, что созданная модель работы микросхемы является приближенной и необходимо сравнить результаты моделирования с результатами эксперимента. Такое сравнение было сделано в настоящей работе. В целом сравнение результатов моделирования системы накачки заряда микросхемы LM27762 при ее работе в режиме пачек с соответствующими результатами эксперимента показывает, что на качественном уровне совпадение результатов расчета с экспериментом можно считать удовлетворительным. Однако из-за большого количества допущений в созданной модели микросхемы расхождения по числу циклов «разряд–заряд» по размаху пульсаций на выходе системы накачки и по промежуткам времени между пачками расхождения весьма значительные.

К сожалению, приводимые в [3] на имеющихся там рисунках 1 и 2 в виде графиков типичные электрические характеристики пульсаций напряжения на выходе микросхемы очень ограничены. Из первого рисунка можно лишь заключить, что при входном напряжении 3.7 В и выходном –3 В при увеличении тока нагрузки от 5 до 75 мА пульсации отрицательного выходного напряжения составляют около 0.7 мВ, а при дальнейшем увеличении тока нагрузки от 75 до 250 мА увеличиваются от 0.7 мВ до 3.2 мВ. Второй график показывает зависимость напряжения пульсаций от входного напряжения при выходном напряжении – 3 В и токе нагрузки 100 мА. Здесь при увеличении входного напряжения от 3 до 3.2 В пульсации уменьшаются от 2.2 до 1.2 мВ, а затем при дальнейшем увеличении входного напряжения от 3.2 В до 4.1 В слегка увеличиваются от 1.2 до 1.3 мВ. Эта информация по пульсациям выходного напряжения, по-видимому, была получена экспериментально, так как модель не позволяет ее получить, и она явно недостаточна для того, чтобы судить о пульсациях отрицательного напряжения на выходе микросхемы в различных режимах. Приведенные в таблице экспериментально полученные величины пульсаций заметно превосходят пульсации, представленные в [3].

Обнаруженное расхождение результатов экспериментов с результатами моделирования, полученными при использовании модели производителя LM27762, не является частным случаем. Это известно и было предметом специального изучения в [16] для некоторых других микросхем. Реальная проверка совершенства микросхем должна опираться на три фактора: эксперимент, моделирование и совместный анализ полученных результатов.

Благодарности

В заключение необходимо отметить, что представленные в статье результаты исследований получены в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 8.5577.2017/8.9 на выполнение проекта по теме «Исследование шумовых характеристик и пульсаций микросхем мобильных источников вторичного электропитания».

Литература:

1. 5V Input Multi-channel System Power Supply IC BD9862MUV. Datasheet No. 10035EAT16. Rohm Semiconductor. 2010. P. 1-16.
2. Low Noise Dual Supply Inverting Charge Pump LTC3260. Datasheet 3260fa. Linear Technology. 2012. P. 1-19.
3. LM27762 Low-Noise Positive and Negative Output Integrated Charge Pump Plus LDO. Datasheet SNVSAF7B. Texas Instruments Incorporated. 2016 (Rev. 2017). P. 1-29.
4. Битюков В.К., Петров В.А., Сотникова А.А. Работа инвертирующего DC–DC преобразователя с накачкой заряда и LDO в микросхеме LM27762. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. 2019;1(28):35-43.
5. Битюков В.К., Михневич Н.Г., Петров В.А. Пульсации напряжения отрицательной полярности на выходе двухполярного DC–DC преобразователя при близком к предельному входному напряжению. *Российский технологический журнал*. 2019;7(4):31-43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-31-43>
6. Ремнев А.М., Смердов В.Ю. Анализ силовых ключей импульсных источников питания. *Схемотехника*. 2001;6:8-11.
7. Чернышов Н.Г., Чернышова Т.И. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005. 52 с.
8. Лурье М.С., Лурье О.М. Имитационное моделирование схем преобразовательной техники. Красноярск: СибГТУ, 2007. 138 с. ISBN 978-5-8173-0473-2
9. Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У. Моделирование процессов в схеме силового преобразователя при регулировании его выходного напряжения. *Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий*. 2013;1:408-411.
10. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Схемотехническое моделирование DC/DC преобразователей. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2016;14(11):69-82.
11. Бабенко В.П., Битюков В.К., Симачков Д.С. Схемотехническое моделирование устройства контроля положения привода в пространстве. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2016;21(4):11-19.

12. Дягилев В.И., Коковин В.А., Увайсов С.У., Увайсова С.С. Компьютерное моделирование работы силового преобразователя с выходным синусоидальным напряжением. *Информационные технологии*. 2016;22(4):261-266.
13. Битюков В.К., Симачков Д.С., Бабенко В.П. Источники вторичного электропитания. Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Инфра-Инженерия. 2019. 376 с. ISBN 978-5-972-902675
14. Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of Switching of High-Power FETs Using the Electronics Workbench Software. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(2):176-181. <https://doi.org/10.1134/S1064226919020025>
15. Using the LM27762EVM Evaluation Module. User's Guide, SNVU534, Texas Instruments. 2016. 19 p. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/snvu534/snvu534.pdf>
16. Hymowitz C., Ho P., Sandler S. Why Regulators Need Testing, Modeling and Analysis. *Space Power*. 2015. AEI Systems. 2015. P. 1-13.

References:

1. 5V Input Multi-channel System Power Supply IC BD9862MUV. Datasheet No. 10035EAT16. Rohm Semiconductor. 2010. P. 1-16.
2. Low Noise Dual Supply Inverting Charge Pump LTC3260. Datasheet 3260fa. Linear Technology. 2012. P. 1-19.
3. LM27762 Low-Noise Positive and Negative Output Integrated Charge Pump Plus LDO. Datasheet SNVSAF7B. Texas Instruments Incorporated. 2016 (Rev. 2017). P. 1-29.
4. Bityukov V.K., Petrov V.A., Sotnikova A.A. Operation of inverting DC–DC converter with charge pumping and LDO in the LM27762 microcircuit. *Vestnik Kontserna PVO «Almaz-Antey» = Bulletin of Concern PVO «Almaz-Antey»*. 2019;1(28):35-43. (in Russ.).
5. Bityukov V.K., Mikhnevich N.G., Petrov V.A. Negative Output Voltage Ripples of Bipolar DC–DC Converter LM27762 Near Maximum Input Voltage. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(4):31-43 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-31-43>
6. Remnev A.M., Smerdov V.Yu. Analysis of power switches of switch-mode power supply. *Skhemitexnika = Circuit Design*. 2001;6:8-11 (in Russ.).
7. Chernyshov N.G., Chernyshova T.I. *Modelirovaniye i analiz skhem v Electronics Workbench* (Simulation and analysis of circuits in Electronics Workbench). Tambov: TGTU Publishing House; 2005. 52 p. (in Russ.).
8. Lur'e M.S., Lur'e O.M. *Imitatsionnoye modelirovaniye skhem preobrazovatel'noi tekhniki* (Simulation modeling of circuits of converting equipment). Krasnoyarsk: SibGTU Publishing House; 2007. 138 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8173-0473-2
9. Dyagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaisov S.U. Simulation of processes in a power converter circuits, its output voltage being under control. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologii = Innovations based on information and communication technologies*. 2013;1:408-411 (in Russ.).
10. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. Circuit simulation of DC/DC converters. *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy = Information-Measuring and Control Systems*. 2016;14(11):69-82 (in Russ.).
11. Babenko V.P., Bityukov V.K., Simachkov D.S. Circuit simulation device controls of actuator position in space. *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy = Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2016;21(4):11-19 (in Russ.).
12. Dyagilev V.I., Kokovin V.A., Uvaisov S.U., Uvaisova S.S. Computer simulation of the power converter with harmonic wave output. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*. 2016;22(4):261-266. (in Russ.).
13. Bityukov V.K., Simachkov D.S., Babenko V.P. Источники вторичного электропитания. Учебник. (Secondary power sources). Moscow: Инфра-Инженерия; 2019. 376 p. (in Russ.). ISBN 978-5-972-902675
14. Babenko V.P., Bityukov V.K. Simulation of Switching of High-Power FETs Using the Electronics Workbench Software. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2019;64(2):176-181. <https://doi.org/10.1134/S1064226919020025>
15. Using the LM27762EVM Evaluation Module. User's Guide, SNVU534, Texas Instruments. 2016. 19 p. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/snvu534/snvu534.pdf>
16. Hymowitz C., Ho P., Sandler S. Why Regulators Need Testing, Modeling and Analysis. *Space Power*. 2015. AEI Systems. 2015. P. 1-13.

Об авторах:

Битюков Владимир Ксенофонович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Михневич Николай Григорьевич, заведующий лабораторией кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Петров Вадим Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vladimir K. Bitjukov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Radiowave Technology, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Nikolay G. Mikhnevich, Head of laboratory of the Department of Radiowave Technology, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Vadim A. Petrov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Radiowave Technology, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поле скоростей движения точек изображения при орбитальной съемке поверхности планеты

В.Я. Геча¹,
М.Ю. Жиленев¹,
В.Б. Федоров²,
Д.А. Хрычев^{2,@},
Ю.И. Худак²,
А.В. Шатина²

¹АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва 107078, Россия

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

В работе получена формула для расчета скорости движения изображения произвольной точки, лежащей в конусе обзора бортовой оптико-электронной аппаратуры космического аппарата (КА), при орбитальной съемке поверхности планеты. Формула описывает зависимость скорости от координат точки в плоскости фиксации изображения, фокусного расстояния съемочной камеры, параметров орбиты КА, угловой скорости вращения планеты, координаты (истинной аномалии) КА на орбите, углов, задающих ориентацию съемочной камеры относительно орбиты, угловой скорости вращения камеры в момент съемки. С помощью полученной формулы построены примеры полей скоростей движения точек изображения для различных наборов значений параметров съемки.

Формула выведена в предположении, что планета является однородным абсолютно твердым телом, имеющим форму шара и вращающимся с постоянной угловой скоростью; как следствие, КА движется по кеплеровской орбите, в одном из фокусов которой находится планета. Несмотря на указанную идеализацию, полученная формула может быть использована при составлении программ дистанционного зондирования Земли, для расчета и оптимизации параметров компенсаторов «смаза» изображения, для решения задачи восстановления смазанного изображения и ряда других задач, возникающих при подготовке, проведении и обработке результатов космической съемки.

Ключевые слова: кеплеровская орбита, космический аппарат, орбитальная съемка планеты, скорость движения изображения.

Для цитирования: Геча В.Я., Жиленев М.Ю., Федоров В.Б., Хрычев Д.А., Худак Ю.И., Шатина А.В. Поле скоростей движения точек изображения при орбитальной съемке поверхности планеты. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):97-109 <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-97-109>

Velocity field of image points in satellite imagery of planet's surface

Vladimir Ya. Gecha¹,
Mikhail Yu. Zhilenev¹,
Viktor B. Fyodorov²,
Dmitry A. Khrychev^{2,@},
Yury I. Hudak²,
Albina V. Shatina²

¹VNIIEM Corporation"JC, Moscow 107078, Russia

²MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

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

This paper derives a formula for calculating the velocity of arbitrary point in the field of view of the satellite camera in the process of orbital imagery of the planet's surface. The formula describes the velocity as a function of the point coordinates in the image fixation plane, the focal length of the imaging camera, the orbital parameters of the satellite, the angular velocity of the planet's rotation, the coordinates of the satellite's true anomaly in the orbit, the orientation angles of the imaging camera relative to the orbit, and the angular velocity of the camera. The paper also provides examples of the formula use for calculating the velocity field of image points for different sets of imagery parameters.

The formula is derived under the assumption that the planet is a homogeneous absolutely solid body, shaped as a ball, and rotating at a constant angular velocity; as a result, the satellite moves in a Keplerian orbit, with the planet located at one of the orbit's foci. Despite this idealization, the derived formula can be used in developing algorithms for remote sensing of the Earth, for building and optimizing the image blurring compensators, for solving the problem of blurred image recovery, and for a number of other problems related to satellite imagery preparation, execution, and processing the results.

Keywords: Keplerian orbit, satellite, orbital imagery of a planet, image velocity.

For citation: Gecha V.Ya., Zhilenev M.Yu., Fyodorov V.B., Khrychev D.A., Hudak Yu.I., Shatina A.V. Thin-film heat-sensitive elements on the basis of semimetals for electromagnetic radiation receivers. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(1):97-109 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-97-109>

Введение

Получение космических снимков высокого пространственного разрешения – сложный высокотехнологичный процесс, связанный не только с созданием бортовой оптико-электронной аппаратуры (далее БОЭА) космического аппарата надлежащего качества, но и с разработкой целого комплекса синхронно с ней работающей обеспечивающей аппаратуры, необходимой для организации ряда сопутствующих съемке вспомогательных процессов. В частности, поскольку одним из основных факторов, приводящих к снижению качества снимка, является «смаз» первичного изображения, возникающий вследствие большой скорости движения объекта съемки относительно фиксирующей

этот объект БОЭА, возникает необходимость проведения компенсации «смаза». При этом исходной информацией, как для функционирования компенсатора любого типа, так и для решения задачи восстановления смазанного изображения является поле скоростей движения изображений точек поверхности планеты, лежащих в конусе обзора БОЭА, по плоскости фиксации изображения.

Отметим, что движение объекта съемки относительно БОЭА, обуславливающее появление «смаза», представляет собой результат суперпозиции трех движений: 1) движения космического аппарата (далее КА) по орбите, 2) вращения планеты вокруг своей оси и 3) вращения съемочного аппарата относительно КА или вращения КА с БОЭА вокруг своего центра масс. Настоящая работа посвящена построению поля скоростей движения точек изображения при нахождении КА в произвольной точке его орбиты, при произвольной ориентации БОЭА относительно этой орбиты и при произвольной угловой скорости вращения БОЭА (или КА с БОЭА). Получена аналитическая формула, выражающая скорость произвольной точки изображения через координаты этой точки в плоскости фиксации изображения, параметры орбиты КА, координаты КА на орбите, углы, задающие ориентацию БОЭА относительно орбиты, и угловую скорость вращения съемочного аппарата в момент съемки. Тем самым обобщен предшествующий результат авторов [1], состоящий в решении аналогичной задачи в частном случае съемки «в надир» (т. е. когда главная ось БОЭА направлена в центр планеты) и без учета возможного вращения БОЭА.

Полученный в настоящей работе результат может быть использован как при решении комплекса задач, связанных с дистанционным зондированием поверхности планеты с помощью КА [2–4 и др.], так и для решения обратной задачи при восстановлении смазанного изображения [4, 5 и др.]. Отметим, что в настоящей работе, как и в [1], предполагается, что планета является однородным твердым телом сферической формы, равномерно вращающимся вокруг своей оси. Подобная идеализация, разумеется, ограничивает область применимости полученных результатов, например, при решении задач, связанных с дистанционным зондированием Земли (ДЗЗ). Дальнейшее развитие тематики предполагает адаптацию результатов статьи к задачам ДЗЗ путем рассмотрения уточненной модели Земли [6].

1. Системы координат и матрицы перехода

В оговоренном выше предположении, когда планета (в дальнейшем для определенности будем говорить о Земле) является однородным твердым телом, имеющим форму шара и вращающимся вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью, центр масс K космического аппарата движется по кеплеровской эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится центр Земли O .

Нам понадобятся следующие три прямоугольные системы координат (рис. 1 и 2): геоцентрическая инерциальная система $OXYZ$ (ИСК), орбитальная система $Kxyz$ (ОСК) и визирная система $K\xi\eta\zeta$ (ВСК). Опишем их построение.

Начало ИСК совпадает с центром Земли O . Ось OX направлена в точку весеннего равноденствия данной эпохи, ось OZ направлена по оси вращения планеты перпендикулярно плоскости экватора к Северному полюсу мира. Ось OY дополняет ИСК до правой системы координат.

Обозначим через $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ и $\mathbf{k}$ орты осей ИСК. Тогда вектор угловой скорости вращения Земли $\boldsymbol{\omega}_{\oplus} = \omega_{\oplus} \cdot \mathbf{k}$, где $\omega_{\oplus}$ – средняя угловая скорость ее вращения.

Опишем построение орбитальной системы координат. Ось Kz ОСК направлена из точки K в центр Земли O . Ось Ky – вдоль нормали к плоскости орбиты противоположно орбитальной угловой скорости, а ось Kx дополняет ОСК до правой системы.

Обозначим радиус-вектор точки K через $\mathbf{R}$, а орты ОСК – через $\mathbf{e}_1$, $\mathbf{e}_2$ и $\mathbf{e}_3$. Тогда согласно построению ОСК

$$\mathbf{R} = \overline{OK}, \mathbf{e}_3 = -\mathbf{R}/R, \mathbf{e}_2 = -\frac{\mathbf{R} \times \dot{\mathbf{R}}}{|\mathbf{R} \times \dot{\mathbf{R}}|}, \mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_3, \quad (1.1)$$

где $R = |\mathbf{R}|$.

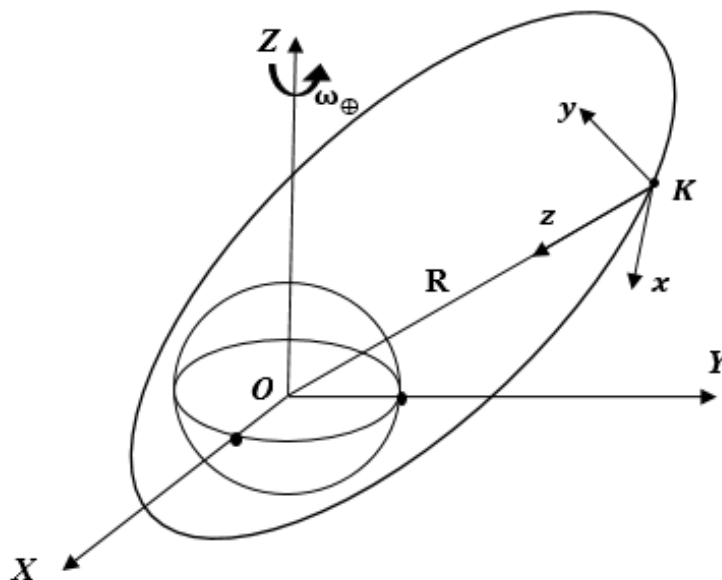


Рис. 1. Инерциальная $OXYZ$ и орбитальная $Kxyz$ системы координат.

Визирную систему координат зададим следующим образом. Ось $K\zeta$ направим в точку визирования на земной поверхности (вдоль главной оптической оси съемочной камеры). Оси $K\zeta$ и $K\eta$ проведем параллельно сторонам прямоугольника светочувствительных элементов так, чтобы получить правую систему.

Составим матрицы перехода от ВСК к орбитальной и инерциальной системам.

Положение ВСК относительно орбитальной системы будем описывать углами Эйлера α , β и γ (рис. 2). Матрица перехода $S = (s_{ij})$ от визирной системы к орбитальной представляет собой произведение трех матриц поворота на соответствующие углы:

$$S = U_1 U_2 U_3 \quad (1.2)$$

где

$$U_1 = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, U_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}, U_3 = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

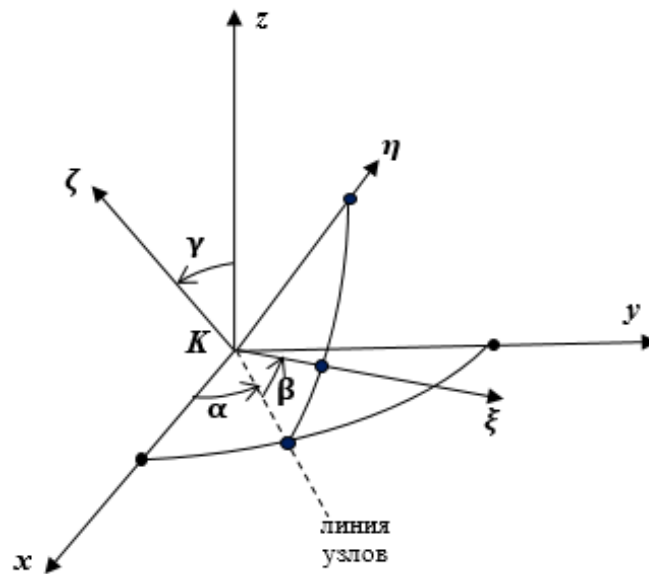


Рис. 2. Орбитальная $Kxyz$ и визирная $K\zeta\eta\zeta$ системы координат.

Матрица перехода от ОСК к ИСК описывается параметрами орбиты спутника.

Положение спутника K на орбите задано, если заданы постоянные параметры орбиты a , e , i , h , g и зависящая от времени истинная аномалия ϑ . Здесь a – большая полуось, e – эксцентриситет, i – наклонение, h – долгота восходящего узла, g – долгота перигея π от восходящего узла (π – ближайшая к центру Земли O точка орбиты спутника), ϑ – угол в плоскости орбиты, который отсчитывается от направления на перигей до текущего радиус-вектора точки K (рис. 3).

Единичный вектор $\mathbf{e}_3 = -\mathbf{R} / R$ в ИСК выражается через параметры орбиты следующими формулами [7, 8]:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_3 &= (e_{3x}, e_{3y}, e_{3z}), \\ e_{3x} &= -\cos h \cos(g + \vartheta) + \sin h \cos i \sin(g + \vartheta), \\ e_{3y} &= -\sin h \cos(g + \vartheta) - \cos h \cos i \sin(g + \vartheta), \\ e_{3z} &= -\sin i \sin(g + \vartheta). \end{aligned} \quad (1.3)$$

Из (1.1) и (1.3) получим выражения для координат векторов $\mathbf{e}_1 = (e_{1x}, e_{1y}, e_{1z})$ и $\mathbf{e}_2 = (e_{2x}, e_{2y}, e_{2z})$ в ИСК:

$$\begin{aligned} e_{1x} &= -\cos h \sin(g + \vartheta) - \sin h \cos i \cos(g + \vartheta), \\ e_{1y} &= -\sin h \sin(g + \vartheta) + \cos h \cos i \cos(g + \vartheta), \\ e_{1z} &= \sin i \cos(g + \vartheta), \\ e_{2x} &= -\sin h \sin i, \quad e_{2y} = \cos h \sin i, \quad e_{2z} = -\cos i. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Тем самым определена матрица перехода от ОСК к ИСК

$$T = \begin{pmatrix} e_{1x} & e_{2x} & e_{3x} \\ e_{1y} & e_{2y} & e_{3y} \\ e_{1z} & e_{2z} & e_{3z} \end{pmatrix}.$$

Наконец, обозначим через $\Sigma = (\sigma_{ij})$ матрицу перехода от ВСК к ИСК:

$$\Sigma = TS. \quad (1.5)$$

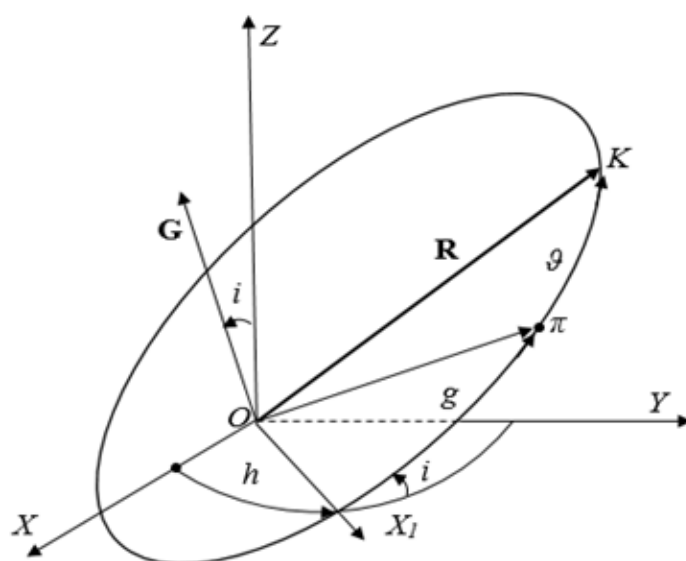


Рис. 3. Элементы кеплеровской орбиты: i – наклонение орбиты спутника (OG – ось, нормальная к плоскости орбиты); h – долгота восходящего узла (угол между осью OX и линией OX_1 пересечения плоскости орбиты спутника с плоскостью OXY); g – долгота перигея π от восходящего узла; ϑ – истинная аномалия.

2. Скорость движения точек изображения при орбитальной съемке планеты

Для нахождения скорости движения точек изображения при орбитальной съемке Земли рассмотрим следующую условную модель съемочной камеры. Будем предполагать, что главный фокус камеры находится в центре масс спутника – точке K , а плоскость Π фиксации изображений точек Земли перпендикулярна линии визирования и удалена от точки K на расстояние d (фокусное расстояние камеры).

Предполагается, что съемочная камера (или спутник с камерой) может вращаться вокруг точки K . Положение камеры относительно ОСК описывается введенной выше матрицей перехода S от ВСК к ОСК, а скорость вращения – вектором мгновенной угловой скорости

$$\omega = \omega_1 \mathbf{e}_1 + \omega_2 \mathbf{e}_2 + \omega_3 \mathbf{e}_3,$$

где

$$\begin{cases} \omega_1 = \dot{\beta} \cos \alpha + \dot{\gamma} \sin \alpha \sin \beta, \\ \omega_2 = \dot{\beta} \sin \alpha - \dot{\gamma} \cos \alpha \sin \beta, \\ \omega_3 = \dot{\alpha} + \dot{\gamma} \cos \beta. \end{cases}$$

Поскольку угловая скорость орбитальной системы координат относительно инерциальной равна $-\dot{\vartheta}\mathbf{e}_2$ (см. построение ОСК), по правилу сложения угловых скоростей [9] угловая скорость съёмочной камеры в ИСК есть

$$\boldsymbol{\Omega} = \omega_1 \mathbf{e}_1 + (\omega_2 - \dot{\vartheta}) \mathbf{e}_2 + \omega_3 \mathbf{e}_3. \quad (2.1)$$

Отметим, что производная $\dot{\vartheta}$ выражается через элементы кеплеровской орбиты формулой [7, 8]

$$\dot{\vartheta} = \frac{(1 + e \cos \vartheta)^2}{(1 - e^2)^{3/2}} n, \quad (2.2)$$

где $n = \sqrt{f M_{\oplus} a^{-3}}$ – среднее движение спутника по орбите (f – универсальная гравитационная постоянная, $M_{\oplus}$ – масса Земли).

Пусть N – произвольная точка земной поверхности, лежащая в конусе обзора БОЭА, а точка M – изображение точки N на плоскости фиксации изображения Π (рис. 4). Как уже отмечалось, вследствие вращения Земли и движения КА точка M перемещается по плоскости Π . Нашей целью является определение скорости $\mathbf{v}_M$ точки M в ВСК.

Скорость точки M в инерциальной системе отсчета, согласно правилу сложения скоростей [9], равна $\frac{d}{dt} \overline{OM} = \mathbf{v}_M + \mathbf{v}_M^e$, где $\mathbf{v}_M^e = \frac{d}{dt} \overline{OK} + \boldsymbol{\Omega} \times \overline{KM}$ – ее переносная скорость (здесь и всюду ниже под производной вектора понимается его производная в ИСК). С другой стороны, $\frac{d}{dt} \overline{OM} = \frac{d}{dt} \overline{OK} + \frac{d}{dt} \overline{KM}$. Отсюда

$$\mathbf{v}_M = \frac{d}{dt} \overline{KM} - \boldsymbol{\Omega} \times \overline{KM}. \quad (2.3)$$

Пусть в рассматриваемый момент времени точка M имеет в ВСК координаты $(\xi, \eta, -d)$, т. е.

$$\overline{KM} = \xi \mathbf{e}_1 + \eta \mathbf{e}_2 - d \mathbf{e}_3 \quad (2.4)$$

(отметим, что аппликата любой точки плоскости Π равна $-d$ в силу принятой нами модели съёмочной камеры и определения ВСК). Тогда в силу (2.1) и (2.4)

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Omega} \times \overline{KM} = & \{-\omega_1(s_{12}d + s_{13}\eta) - (\omega_2 - \dot{\vartheta})(s_{22}d + s_{23}\eta) - \omega_3(s_{32}d + s_{33}\eta)\} \mathbf{e}_1 + \\ & + \{\omega_1(s_{11}d + s_{13}\xi) + (\omega_2 - \dot{\vartheta})(s_{21}d + s_{23}\xi) + \omega_3(s_{31}d + s_{33}\xi)\} \mathbf{e}_2 + \\ & + \{\omega_1(s_{11}\eta - s_{12}\xi) + (\omega_2 - \dot{\vartheta})(s_{21}\eta - s_{22}\xi) + \omega_3(s_{31}\eta - s_{32}\xi)\} \mathbf{e}_3, \end{aligned} \quad (2.5)$$

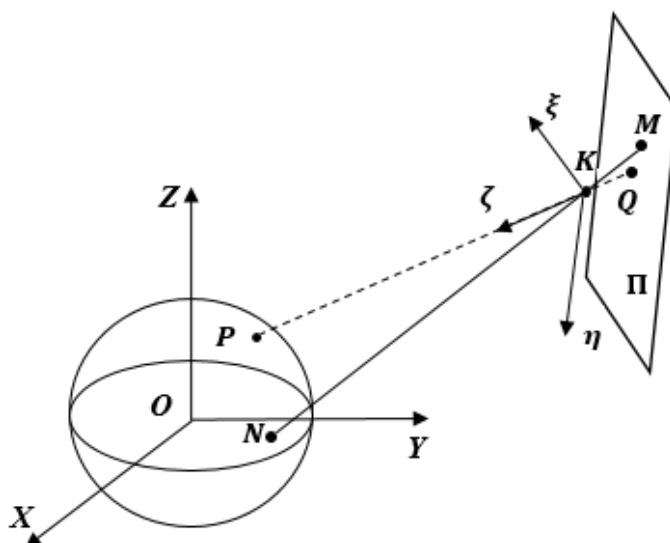


Рис. 4. Соответствие между точками земной поверхности и плоскости Π фиксации изображения (PQ – оптическая ось, $K\xi$, $K\eta$ и $K\zeta$ – оси ВСК).

где s_{ij} – элементы матрицы перехода (1.2).

Вычислим теперь производную $\frac{d}{dt} \overline{KM}$.

Векторы $\overline{KM}$ и $\overline{KN}$ лежат на одной прямой, а значит $\overline{KM} = \lambda \cdot \overline{KN}$ и

$$\frac{d}{dt} \overline{KM} = \dot{\lambda} \cdot \overline{KN} + \lambda \cdot \frac{d}{dt} \overline{KN} = \dot{\lambda} \cdot \frac{1}{\lambda} \overline{KM} + \lambda \cdot \frac{d}{dt} \overline{KN}. \quad (2.6)$$

Определим значение коэффициента λ из равенства

$$|\overline{ON}|^2 = |\overline{OK} + \overline{KN}|^2 = \left| \overline{OK} + \frac{1}{\lambda} \overline{KM} \right|^2 = R_{\oplus}^2,$$

где $R_{\oplus}$ – радиус Земли. Учитывая, что $\overline{OK} = -R\mathbf{e}_3$ и $\overline{KM} = \xi\mathbf{e}_1 + \eta\mathbf{e}_2 - d\mathbf{e}_3$, получаем для λ квадратное уравнение

$$(R^2 - R_{\oplus}^2)\lambda^2 - 2Rz\lambda + \xi^2 + \eta^2 + d^2 = 0, \quad (2.7)$$

где

$$z = (\overline{KM}, \mathbf{e}_3) = s_{31}\xi + s_{32}\eta - s_{33}d \quad (2.8)$$

является аппликатой точки M в ОСК. Уравнение (2.7) имеет два корня, отвечающие двум точкам пересечения прямой KM со сферой, при этом точке N отвечает больший по модулю корень

$$\lambda = \frac{Rz - \sqrt{(Rz)^2 - (R^2 - R_{\oplus}^2)(\xi^2 + \eta^2 + d^2)}}{(R^2 - R_{\oplus}^2)}. \quad (2.9)$$

Найдем производную

$$\frac{d}{dt} \overline{KN} = \frac{d}{dt} \overline{ON} - \frac{d}{dt} \overline{OK}. \quad (2.10)$$

Точка N , находящаяся на поверхности Земли, имеет в ИСК скорость

$$\frac{d}{dt} \overline{ON} = \boldsymbol{\omega}_{\oplus} \times \overline{ON} = \boldsymbol{\omega}_{\oplus} \times \left(\overline{OK} + \frac{1}{\lambda} \overline{KM} \right) \quad (\text{напомним, что } \boldsymbol{\omega}_{\oplus} = \omega_{\oplus} \cdot \mathbf{k} \text{ – вектор угловой скорости вращения Земли}). \text{ Отсюда с учетом (1.1) и (2.4)}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \overline{ON} = & \boldsymbol{\omega}_{\oplus} \left[\sigma_{32} \left(-s_{33} R - \frac{d}{\lambda} \right) - \sigma_{33} \left(-s_{32} R + \frac{\eta}{\lambda} \right) \right] \mathbf{e}_1 - \\ & - \boldsymbol{\omega}_{\oplus} \left[\sigma_{31} \left(-s_{33} R - \frac{d}{\lambda} \right) - \sigma_{33} \left(-s_{31} R + \frac{\xi}{\lambda} \right) \right] \mathbf{e}_2 + \\ & + \boldsymbol{\omega}_{\oplus} \left[\sigma_{31} \left(-s_{32} R + \frac{\eta}{\lambda} \right) - \sigma_{32} \left(-s_{31} R + \frac{\xi}{\lambda} \right) \right] \mathbf{e}_3, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где σ_{ij} – элементы матрицы перехода (1.5).

Далее, $\frac{d}{dt} \overline{OK} = -\dot{R} \mathbf{e}_3 - R \dot{\mathbf{e}}_3$. Заметим, что в силу (1.3) и (1.4) $\dot{\mathbf{e}}_3 = -\dot{\theta} \mathbf{e}_1$. Отсюда

$$\frac{d}{dt} \overline{OK} = -\dot{R} \mathbf{e}_3 + R \dot{\theta} \mathbf{e}_1 \quad \text{или в ВСК}$$

$$\frac{d}{dt} \overline{OK} = (-s_{31} \dot{R} + s_{11} R \dot{\theta}) \mathbf{e}_1 + (-s_{32} \dot{R} + s_{12} R \dot{\theta}) \mathbf{e}_2 + (-s_{33} \dot{R} + s_{13} R \dot{\theta}) \mathbf{e}_3. \quad (2.12)$$

Из (2.10), (2.11) и (2.12)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \overline{KN} = & \left\{ \boldsymbol{\omega}_{\oplus} \left[\sigma_{32} \left(-s_{33} R - \frac{d}{\lambda} \right) - \sigma_{33} \left(-s_{32} R + \frac{\eta}{\lambda} \right) \right] + s_{31} \dot{R} - s_{11} R \dot{\theta} \right\} \mathbf{e}_1 + \\ & + \left\{ \boldsymbol{\omega}_{\oplus} \left[\sigma_{31} \left(-s_{33} R - \frac{d}{\lambda} \right) + \sigma_{33} \left(-s_{31} R + \frac{\xi}{\lambda} \right) \right] + s_{32} \dot{R} - s_{12} R \dot{\theta} \right\} \mathbf{e}_2 + \\ & + \left\{ \boldsymbol{\omega}_{\oplus} \left[\sigma_{31} \left(-s_{32} R + \frac{\eta}{\lambda} \right) - \sigma_{32} \left(-s_{31} R + \frac{\xi}{\lambda} \right) \right] + s_{33} \dot{R} - s_{13} R \dot{\theta} \right\} \mathbf{e}_3. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Наконец, найдем производную λ . Для этого воспользуемся отсутствием нормальной составляющей к плоскости Π у вектора $\mathbf{v}_M$ (точка M движется по плоскости Π): $(\mathbf{v}_M, \mathbf{e}_3) = 0$, откуда с учетом (2.3) и (2.6) получим

$$\dot{\lambda} = \frac{\lambda(\boldsymbol{\Omega} \times \overline{KM}, \mathbf{e}_3) - \lambda^2 \left(\frac{d}{dt} \overline{KN}, \mathbf{e}_3 \right)}{(\overline{KM}, \mathbf{e}_3)}.$$

Из последнего равенства в силу (2.5), (2.13) и (2.4)

$$\dot{\lambda} = -\frac{\lambda}{d} \left\{ \omega_1 (s_{11}\eta - s_{12}\xi) + (\omega_2 - \dot{\vartheta})(s_{21}\eta - s_{22}\xi) + \omega_3 (s_{31}\eta - s_{32}\xi) - \right. \\ \left. - \lambda \omega_{\oplus} \left[\sigma_{31} \left(-s_{32}R + \frac{\eta}{\lambda} \right) - \sigma_{32} \left(-s_{31}R + \frac{\xi}{\lambda} \right) \right] - \lambda (s_{33}\dot{R} - s_{13}R\dot{\vartheta}) \right\}. \quad (2.14)$$

Окончательно, учитывая (2.3), (2.5), (2.4), (2.6) и (2.13), приходим к следующему выражению для вектора $\mathbf{v}_M = \mathbf{v}(\xi, \eta)$ в ВСК:

$$\mathbf{v}(\xi, \eta) = \left\{ \frac{\dot{\lambda}}{\lambda} \xi + \lambda \omega_{\oplus} \left[\sigma_{32} \left(-s_{33}R - \frac{d}{\lambda} \right) - \sigma_{33} \left(-s_{32}R + \frac{\eta}{\lambda} \right) \right] + \lambda (s_{31}\dot{R} - s_{11}R\dot{\vartheta}) + \right. \\ + \omega_1 (s_{12}d + s_{13}\eta) + (\omega_2 - \dot{\vartheta})(s_{22}d + s_{23}\eta) + \omega_3 (s_{32}d + s_{33}\eta) \Big\} \mathbf{e}_1 + \\ + \left\{ \frac{\dot{\lambda}}{\lambda} \eta + \lambda \omega_{\oplus} \left[\sigma_{31} \left(s_{33}R + \frac{d}{\lambda} \right) + \sigma_{33} \left(-s_{31}R + \frac{\xi}{\lambda} \right) \right] + \lambda (s_{32}\dot{R} - s_{12}R\dot{\vartheta}) - \right. \\ \left. - \omega_1 (s_{11}d + s_{13}\xi) - (\omega_2 - \dot{\vartheta})(s_{21}d + s_{23}\xi) - \omega_3 (s_{31}d + s_{33}\xi) \right\} \mathbf{e}_2.$$

Здесь $\dot{\vartheta}$ задается формулой (2.2), λ – формулами (2.9) и (2.8), $\dot{\lambda}$ – формулой (2.14), а R и $\dot{R}$, согласно [7, 8], выражаются через параметры орбиты и истинную аномалию формулами $R = \frac{a(1-e^2)}{1+e \cos \vartheta}$ и $\dot{R} = \frac{ane \cdot \sin \vartheta}{\sqrt{1-e^2}}$ соответственно.

В заключение приведем примеры расчета поля скоростей движения точек изображения в плоскости Π для различных наборов значений параметров $\alpha, \beta, \gamma, \omega_1, \omega_2$ и ω_3 . Все расчеты выполнены при следующих значениях исходных данных: $f = 6.67428 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ (универсальная гравитационная постоянная), $M_{\oplus} = 5.9736 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ (масса Земли), $\omega_{\oplus} = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ (средняя угловая скорость вращения Земли), $R_{\oplus} = 6.371 \cdot 10^6 \text{ м}$ (средний радиус Земли). Параметры орбиты: $a = R_{\oplus} + h_0$, где $h_0 = 3 \cdot 10^5 \text{ м}$ – максимальная высота полета спутника над поверхностью Земли, $e = 0.01$, $i = \pi/3$, $g = 0$. Значение истинной аномалии ϑ взято равным нулю, а фокусное расстояние $d = 1.5 \text{ м}$.

Для наглядности результаты расчетов представлены в графическом виде, при этом в точке (ξ, η) плоскости Π строится не сам вектор $\mathbf{v}(\xi, \eta)$, а разность его и вектора скорости в начале координат $\mathbf{v}(\xi, \eta) - \mathbf{v}(0, 0)$. Под каждой иллюстрацией указаны значения параметров, при которых производился расчет.

Прокомментируем полученные результаты. На рис. 5а–г представлено изменение поля скоростей при увеличении угла крена γ от 0° до 1° при нулевых значениях остальных параметров. Как видим, в указанном диапазоне изменения γ поле эволюционирует достаточно быстро; дальнейшее же увеличение угла крена принципиально картину не меняет.

Рис. 5д и 5е иллюстрируют поворот на 90° вокруг визирной оси и вращение вокруг нее же с угловой скоростью $\omega = 0.5 \text{ рад/с}$ при нулевых значениях остальных параметров. Влияние указанных действий на картину поля вполне предсказуемо, и полученные результаты соответствуют ожидаемым.

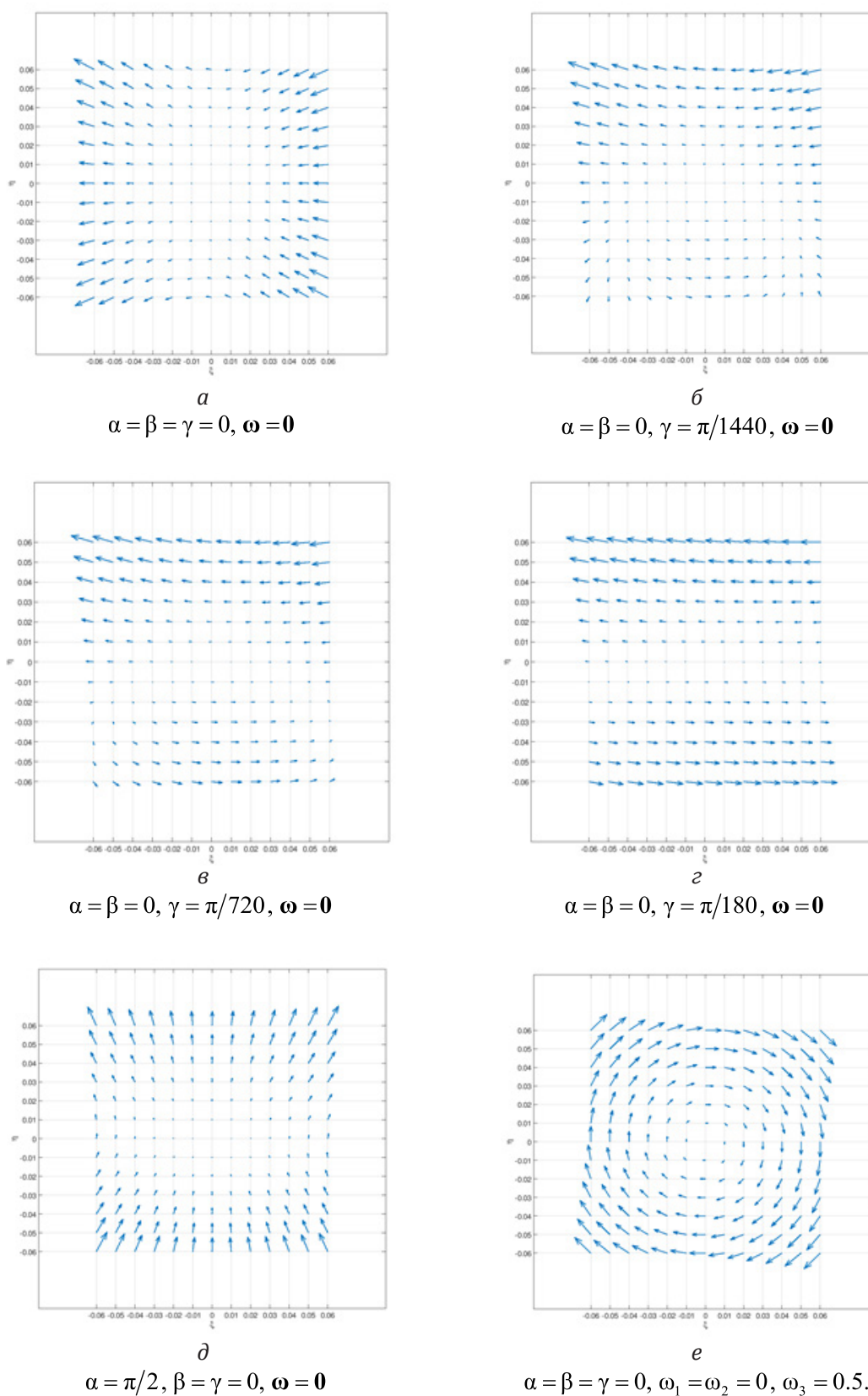


Рис. 5. Поле скоростей движения точек изображения в плоскости Π

Обратим внимание, что на рис. 5а фактически изображено поле скоростей для случая съемки «в надир» в отсутствие вращения съемочного аппарата, т. е. в ситуации, изучавшейся в работе [1], и полученный здесь результат в точности совпадает с результатом из [1] для соответствующего значения истинной аномалии ($\vartheta = 0$).

Литература:

1. Геча В.Я., Жиленев М.Ю., Федоров В.Б., Хрычев Д.А., Худак Ю.И., Шатина А.В. Скорость движения изображения при оптико-электронной съемке поверхности планеты. *Российский технологический журнал*. 2018;6(4):65-77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-65-77>
2. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли, Под ред. В.В. Еремеева. М.: Физматлит, 2015. 460 с. ISBN 978-5-9221-1596-4
3. Somov Ye., Butyrin S., Somov S., Hajiyeve C. Attitude guidance, navigation and control of land-survey mini-satellites. In: Proceedings of IFAC international workshop on advanced control and navigation for autonomous aerospace vehicles. Seville, 2015. P. 222–227. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.087>
4. Showengerdt R.A. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. Burligton: Academic Press, 2007. 515 p.
5. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В. Обратные задачи обработки фотоизображений / Некорректные задачи естествознания. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 185–195.
6. Petit G., Luzum B. (Eds.) IERS Conventions (2010). (IERS Technical Note No.36). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p. ISBN 3-89888-989-6
7. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1975. 800 с.
8. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: Физматлит, 2010. 588 с.
9. Вильке В.Г. Теоретическая механика: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Издательство Юрайт, 2016. 311 с. ISBN 978-5-534-03481-3

References:

1. Gecha V.Y., Zhilenev M.Y., Fyodorov V.B., Khrychev D.A., Khudak Y.I., Shatina A.V. The image speed during the optical-electronic surfacing the planet. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(4):65-77 (in Russ.) <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-65-77>
2. Eremeeva V.V. (Ed.). *Sovremennye tekhnologii obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Modern Data Processing Technologies for Remote Sensing of the Earth). Moscow: Fizmatlit; 2015. 460 p. (in Russ.) ISBN 978-5-9221-1596-4
3. Somov Ye., Butyrin S., Somov S., Hajiyeve C. Attitude guidance, navigation and control of land-survey mini-satellites. In: Proceedings of IFAC international workshop on advanced control and navigation for autonomous aerospace vehicles. Seville, 2015. P. 222–227. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.087>
4. Showengerdt R.A. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. Burligton: Academic Press; 2007. 515 p.
5. Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V. Inverse problems of image processing. In: *Nekorrektnye zadachi estestvoznaniya* (Incorrect Tasks of Natural Science). Moscow: MGU Publishing House; 1987. P. 185–195 (in Russ.)
6. Petit G., Luzum B. (Eds.) IERS Conventions (2010). (IERS Technical Note No.36). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie; 2010. 179 p. ISBN 3-89888-989-6
7. Duboshin G.N. *Nebesnaya mekhanika. Osnovnye zadachi i metody* (Celestial Mechanics. Main tasks and methods). Moscow: Nauka; 1975. 800 p. (in Russ.)
8. Murray Carl D. Solar system dynamics Cambridge: Cambridge university press; 2009. 588 p. ISBN 978-5-9221-1121-8
9. Vil'ke V.G. *Teoreticheskaya mekhanika: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* (Theoretical Mechanics: a textbook and a practical work for academic baccalaureate). Moscow: Yurait Publ.; 2016. 311 p. (in Russ.) ISBN 978-5-534-03481-3

Об авторах:

Геча Владимир Яковлевич, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора, главный конструктор открытого акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ») (107078, Россия, Москва, Хоромный тупик, д. 4, строение 1).

Жиленев Михаил Юрьевич, старший научный сотрудник открытого акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ») (107078, Россия, Москва, Хоромный тупик, д. 4, строение 1).

Федоров Виктор Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Института кибернетики РТУ МИРЭА («МИРЭА – Российский технологический университет») (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Хрычев Дмитрий Аркадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Института кибернетики РТУ МИРЭА («МИРЭА – Российский технологический университет») (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Худак Юрий Иосифович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Института кибернетики РТУ МИРЭА («МИРЭА – Российский технологический университет») (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Шатина Альбина Викторовна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики Института кибернетики РТУ МИРЭА («МИРЭА – Российский технологический университет») (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vladimir Ya. Gecha, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy General Director, Chief Designer of Open Joint Company ‘Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A.G. Iosifian’ (‘VNIIE Corporation’ JC) (4/1, Khoromny tupik, Moscow 107078, Russia).

Mikhail Yu. Zhilenev, Senior Researcher of Open Joint Company ‘Research and Production Corporation’ Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A.G. Iosifian’ (‘VNIIE Corporation’ JC) (4/1, Khoromny tupik, Moscow 107078, Russia).

Viktor B. Fyodorov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics of the Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Dmitry A. Khrychev, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics of the Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Yury I. Hudak, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Higher Mathematics of the Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Albina V. Shatina, Dr.Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department of Higher Mathematics of the Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-110-119>



УДК 81'42

Академическая коммуникация в дискурсивных практиках университетов Германии: гендерный аспект

**И.С. Редькова,
Н.И. Чернова[@],
Н.В. Катахова**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

Данное исследование посвящено проблеме гендерной асимметрии в языковых структурах как отражению социальных и дискурсивных практик в немецком языке в контексте немецкой академической среды. Концепт «гендер» как социокультурный конструкт отображает социокультурные различия между «женским» и «мужским». С его помощью выявляются и анализируются случаи гендерной асимметрии в немецком языке, изучаются морфологические, грамматические и синтаксические особенности выражения «женского» и «мужского», исследуется отношение социума к данным категориям. В статье рассматриваются истоки возникновения гендерного дискурса в контексте Нового феминистского движения и возникновения «феминистской лингвистики», а также изучается процесс, как феминистская лингвистическая теория получает выход в феминистскую социальную и политическую практику. Немецкие университеты, укорененные в традиции общеевропейской академической культуры, сильно отличались от других европейских университетов по количеству женщин в научном сообществе. Сравнительно слабая представленность женщин в немецкой академической системе обусловлена рядом факторов. Академические институты не конкурируют между собой за будущих студентов. Профессионализация науки, достижения в научных исследованиях обусловили высокий статус ученого в немецком обществе и престиж академической карьеры. Карьера на академическом поприще стала привлекательной для социальных элит. Университетский бум привел

к значительному росту числа студенток, а также увеличению числа женщин в профессорско-преподавательском составе. Это привело к переосмыслению места и роли женщины в социуме, в том числе и в языковых структурах и нашло свое отражение в академических дискурсивных практиках, в частности в применении принципов т.н. *geschlechtsgerechte Sprache*, то есть «равноправия в языке».

Ключевые слова: гендер, гендерная асимметрия, академическая среда, феминистская лингвистика, Германия, наука, профессорско-преподавательский состав.

Для цитирования: Редькова И.С., Чернова Н.И., Катахова Н.В. Академическая коммуникация в дискурсивных практиках университетов Германии: гендерный аспект. *Российский технологический журнал*. 2020;8(1):110-119. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-110-119>

German academic communication in discourse practices: gender policy

Irina S. Redkova,
Nadezhda I. Chernova,
Nataliya V. Katakhova

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

This article focuses on gender discourse genesis in the context of both a new feminist movement and the emergence of feminist linguistics. The process of feminist linguistic theory conversion into the feminist social and political practices has also been revealed in the paper. German universities committed to all-European academic cultural tradition differed greatly from other European educational institutions by the number of women in the academic community. The low women representation in German academic environment is due to the following several factors:

- academic institutions do not compete with each other for future students;
- professionalization of science, achievements in scientific researches have caused the high status of a scientist in the German society, as well as the prestige of the academic career;
- the academic career has become attractive for social elites;
- the university boom has led to a dramatic increase of the number of female students and the number of women in the academic staff as well.

These have resulted in the re-evaluation of a woman's place and role in the society including the language structures and reflected by the academic discourse practices and notably in the so called *geschlechtsgerechte Sprache*, i. e. "equity in languages" principles.

Keywords: gender, gender asymmetry, academia, feminist linguistics, Germany, science, academic staff.

For citation: Redkova I.S., Chernova N.I., Katakhova N.V. German academic communication in discourse practices: gender policy. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(1):109-119 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-1-110-119>

Введение и постановка проблемы

В современных гуманитарных исследованиях язык трактуется как культурный код нации, «дом бытия» человека, по определению Мартина Хайдеггера, путь, по которому мы проникаем в современную ментальность, познаем мир, общество и самих себя. Язык отражает и создает ту реальность, в которой мы существуем, превращаясь в средство классификации и упорядочения мира. Именно язык определяет горизонты и границы нашего бытия и конструирует нашу реальность, позволяет осознать себя и свое место в этой реальности.

Взаимодействие людей в социуме, в частности, в профессиональной среде, можно описать как иерархическую структуру социальных групп. Каждая такая социальная страта является формой социального взаимодействия, системой отношений, которые могут регулироваться как формально, так и неформально. В процессе социального взаимодействия каждая группа вырабатывает свое понимание и свое видение морфологии общества в целом, и своей ниши в частности, однако возможность публично артикулировать свои идеи получают лишь доминирующие страты. Способы и средства языкового выражения находятся под их контролем, а менее влиятельные группы становятся, таким образом, «немыми» [6]. Их реальность не получает репрезентации, и они вынуждены кодировать ее в терминах реальности доминирующей группы. До настоящего времени во всех обществах мужчины занимали высшие ступени в социальной иерархии. Женщины только в конце XX века получили доступ ко всем ступеням социальной иерархии, и сосуществование (осознание себя) в языковых категориях в профессиональной среде стало вызовом для них. В данной статье, на примере академической среды Германии, предпринята попытка взглянуть на проблему отражения в языке гендерного неравенства в социуме, а также пути его преодоления.

Понятие гендера

Гендер – это социокультурный конструкт, который аккумулирует представления о мужественности и женственности, характерные для общества в определенный период его развития [2]. Понятие «гендер» стало переосмыслением английского слова *gender*, обозначающего категорию рода в грамматике языка. Оно было перенесено в исследовательское поле социальных наук, таких как социальная философия, социология, история, политология, чтобы разграничить понятия биологического (*sexus*) и социального пола (то есть гендер) [5]. В основу термина «гендер» легло осознание межполовых различий как социокультурного, а не природного феномена [6]. В немецком языке наряду с термином *Gender* используются номинации *Geschlecht*, *das soziale Geschlecht*. Гендер понимается как продукт социальной интеракции, возникший в результате повседневных практик взаимодействия мужского и женского, и осмысливается как системная характеристика социологического порядка, которая постоянно воспроизводится в структурах сознания и в структурах интеракции. Язык и гендер являются неотъемлемой частью социальных практик, а конструирование гендерных смыслов – это когнитивная деятельность, направленная на соотнесение языковых моделей, форм и единиц с данными, присутствующими в корпусе языка, например, в виде языковой системы взаимосвязанных гендерных категорий. Теория языкового конструирования гендера утверждает, что высказывания – это

не просто речевые акты, а элементы, из которых складываются социальные отношения, образ «себя» и «другого», воссоздаваемые и проживаемые в каждой коммуникативной интеракции. Язык здесь, во-первых, является неосознаваемый фоном, где фиксируются гендерные стереотипы, а во-вторых, становится инструментом, дающим возможность производства и воспроизводства гендерных смыслов в социальной практике. Чтобы увидеть процесс конструирования гендера на примере немецкой академической среды, требуется провести анализ выбора языковых приемов и средств, которыми пользуется индивид для описания себя и других, а затем исследовать и социокультурные факторы, определяющие данный выбор, в частности, особенности развития немецких академических институций, положения и статуса ученых, тенденции развития университетского сообщества.

История вопроса

Взаимодействие языка и гендера стало изучаться на Западе в 1970-х гг. Интерес к гендерным штудиям был обусловлен развитием Нового женского движения. Возникнув в США на политической платформе, требующей развития гражданских прав, особое распространение оно получило в Германии в рамках студенческого движения 1967–1968 гг. В это время в ФРГ возникают различные женские центры, политические объединения, группы по интересам, где женщины обменивались своими знаниями и опытом. Эксплицитная рефлексия относительно патриархальных основ немецкого общества в 1970-х гг. породила идею о необходимости конструирования женской идентичности в языке, в результате чего в языкознании зародилась «феминистская лингвистика» или «феминистская критика языка». Первой работой, которая стала исходной точкой появления в истории феминистской лингвистики, стал труд Робин Лакофф «Язык и место женщины». Исследовательница убедительно показала андроцентричность языка и ущербность образа женщины, ее более низкий социальный статус в картине мира, воспроизводимый в языке [10].

Для немецкоговорящего научного сообщества исходной точкой для гендерных исследований стали труды Сенты Тремель-Плец [13] и Луизы Пуш [11]. Исследовательницы оспорили тезис о нейтральности существительных мужского рода при обозначении лица, представленный в структурной лингвистике. Сента Тремель-Плец обратила внимание на неоднозначность существительных мужского рода, которые во многих контекстах имплицитно реферируют к лицам мужского пола и игнорируют лица женского пола в картине мира. Ущербность «женского языка», по мнению исследовательниц, была связана с социальным положением женщины, а не с ее природой.

В гендерных исследованиях активно используются понятия политического дискурса. Термин «сексизм» впервые был использован в США, он стал дериватом от слова «расизм», и был использован для обозначения человека, который испытывает дискриминацию по признаку пола. Исследователи, применяющие данное понятие, основываются на убеждении в андроцентричности языка, фиксирующего мужскую перспективу и мужскую субъектность, отводя женщинам маргинальную роль и статус объекта [13]. Исследователи, придерживающиеся сдержанной позиции, с осторожностью используют термин «сексизм» в научном описании, предпочитая заменять его понятием «гендерная асимметрия».

Проблема гендерной асимметрии в немецком языке

В немецком языке понятие *Genus* (грамматический род) в отличие от понятия *Sexus* (биологический пол) не прижилось в качестве родового понятия социального и культурного пола, оно остается тесно связанным с грамматикой. Проблему взаимосвязи рода и пола в немецком языке впервые подняла в своих работах Луиза Пуш [10]. В настоящее время в немецком выделяются следующие признаки андроцентризма:

Во-первых, отождествление понятий человек и мужчина – *Mann*. В немецком языке существует также еще одно обозначение человека – *Mensch*. Это слово этимологически восходит к древневерхненемецкому *mannisco*, т.е. «мужской», относящийся к «мужчине».

Во-вторых, обозначение лиц женского пола образуется от существительных мужского рода с помощью суффикса феминизации «-in», например, *Lehrer / Lehrerin* (учитель / учительница), *Maler / Malerin* (художник / художница), *Arbeiter / Arbeiterin* (работник / работница). Если исходное слово означает по профессии лицо женского рода (достаточно редкие случаи), мужское наименование не производится от него, вместо этого вводится новое обозначение для лица мужского рода, которое затем допускает образование формы женского рода как, например, *Hebamme / Entbindungspfleger / Entbindungspflegerin* (акушерка / акушер). Для обозначения малопrestiжных «женских» профессий, таких как *Putzfrau* (уборщица), существительных мужского рода не существует вообще [10].

В-третьих, синтаксическое согласование происходит по форме грамматического рода соответствующей части речи, а не по реальному полу референта. Например, в предложении «*Wer hat hier seinen Lippenstift vergessen?*» (букв.: «Кто забыл здесь его помаду?»), используется притяжательный артикль *sein*, а не *ihr*, хотя речь идет о женщине.

В-четвертых, существительные мужского рода могут употребляться для обозначения лиц любого пола. В этом случае действует механизм включенности в грамматический мужской род (*das generische Masculinum*). Язык предпочитает мужские формы для обозначения лиц любого пола или группы лиц разного пола. Так, если имеются в виду художники и художницы, достаточно сказать «художники». Обозначения «престижных» профессий в феминизированной форме часто имеет оттенок пренебрежительности (ср. профессор / профессорша). Таким образом, по мнению социолингвистов, язык в массе случаев игнорирует женщин. Эта тенденция сохраняется до сих пор в официальных документах. Например, в данных, которые приводит Федеральное бюро статистики ФРГ за 2018 год по численности научных сотрудников (см. таблицу): *Professoren, Dozenten, Assistenten, Mitarbeiter*.

Профессорско-преподавательский состав немецких университетов
по данным Федерального бюро статистики за 2018 г.

Академический статус	Общее число	Из них: женщин
<i>Professoren</i> / Профессора	24656	6077
<i>Dozenten</i> / Доценты	2183	862
<i>Wissenschaftliche Mitarbeiter</i> / Научные сотрудники	176539	75450
<i>Lehrkräfte für besondere Aufgabe</i> / Преподаватели с особыми задачами	6218	3521
Итого	209596	85910

Данные, приведенные в этой таблице, отражают феномен *das generische Masculinum*, когда слова мужского рода используют для обозначения и лиц женского рода. Кроме того, они показывают неравномерность присутствия мужчин и женщин на высших ступенях академической иерархии: лишь 24.6% женщин получают профессорские должности, при этом количество женщин на низшей нише академической иерархии почти в два раза больше: 42.7% научных сотрудников в академических структурах ФРГ являются представительницами прекрасного пола.

Исследования феминистской лингвистики 1970–1980-х гг. сфокусировались на выявлении доминирующих патриархальных канон и моделей языкового выражения, в частности, в денотации явлений социальной реальности. Феминистская лингвистическая теория оказалась тесно связанной с социальной и политической практикой. Феминистская критика языка нашла отражение и в немецкой академической культуре, и в дискурсивной практике немецких университетов.

Гендер в профессиональной академической коммуникации

Немецкие университеты, укорененные в традиции общеевропейской академической культуры, сильно отличались от других европейских университетов по количеству женщин в научном сообществе, согласно статистическим данным Европейской комиссии от 2000 г. [9]. Гендерная сегрегация продолжает оказывать огромное влияние на научную сферу в Германии. Женщины подвергаются как «горизонтальной сегрегации», оказавшись исключенными из самых престижных и прибыльных отраслей науки, так и по вертикали, когда их не допускают на высшие академические позиции внутри своей дисциплины [8, 9].

Сравнительно слабая представленность женщин в немецкой академической системе обусловлена рядом факторов. Практически все академические институты ФРГ полностью финансируются и управляются отдельными федеральными землями [8]. Федеральный закон стандартизировал систему, допустив взаимное признание дипломов и гарантировав высокий образовательный стандарт на национальном уровне. Однако в целом университеты обладают широкой автономией [9].

Академические институты не конкурируют между собой за будущих студентов. Школьник, закончивший гимназию, сдавший экзамены по школьным предметам и получивший аттестат зрелости, имеет право на зачисление в университет по своему выбору. Однако спрос на место обучения (*Studienplatz*) часто превосходит возможности университета, например, по таким направлениям, как право, медицина, психология, экономика [8].

Главным принципом, которым руководствуются немецкие университеты, являются идеалы В. Гумбольдта о единстве научной исследовательской деятельности и преподавания. Созданные еще в XIX в. научные лаборатории и научные школы принесли всемирное признание немецкой академической системе, которая была воспринята и другими странами [4, 9]. Эпоха между 1831 и 1933 гг. стала столетием неоспоримого мирового господства немецкоязычной университетской науки. Профессионализация науки, достижения в научных исследованиях обусловили высокий статус ученого в немецком обществе и престиж академической карьеры. Карьера на академическом поприще стала привлекательной для социальных элит, что вызвало высокую конкуренцию в данной сфере,

и таким образом, общество не испытывало необходимости включения женщин в академический процесс.

При правительстве социал-демократов в 1970-е гг. Германия переживала университетский бум. В то время создавались новые университеты, что привело к росту количества студенток в последующие 40 лет с 25% до 44.5% [8] и дальнейшему продвижению женщин в структурах академической иерархии.

Данное явление отразилось и на языковом уровне: если сравнить статистику употребления феминизированной формы понятия профессор – *Professorin*, то можно увидеть сравнительно редкое употребление данных словоформ в еще в середине XX века и тенденцию постоянного и стремительного увеличения его частотности, которое пришлось на вторую половину XX и начало XXI вв. (см. рис. 1).

Эта же тенденция фиксируется в частотности употребления таких понятий, как доцент (*Dozentin*) (рис. 2) или хирург (*Chirurgin*) (рис. 3) [14].

Гендерная динамика, а именно постоянное увеличение числа женщин, задействованных в академической среде, отраженная в данных графиках, привела к переосмыслению

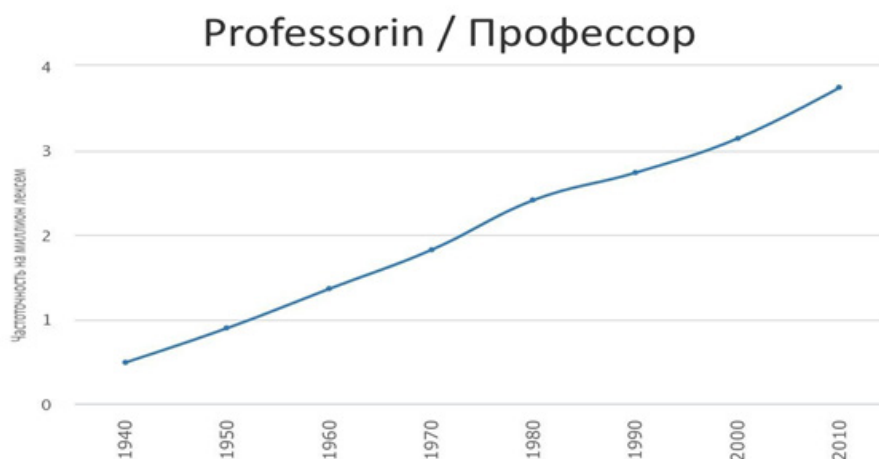


Рис. 1. Динамика использования термина *Professorin* – профессор (женщина) в корпусе немецкого языка [14].



Рис. 2. Динамика употребления слова *Dozentin* – доцент (женщина) в корпусе немецкого языка [14].

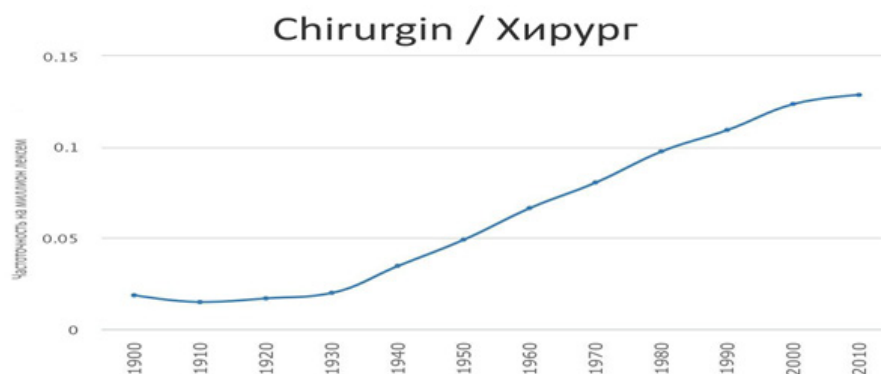


Рис. 3. Динамика употребления слова *Chirurgin* – хирург (женщина) в корпусе немецкого языка [14].

места и роли женщины в социуме, в том числе и в языковых структурах. Женщины все чаще выражают протест против существующих способов языкового выражения и ищут альтернативные модели фиксации своего присутствия в академических дискурсивных практиках. Это обусловило появление принципов т.н. *geschlechtsgerechte Sprache*, то есть «равноправия в языке».

Университеты Германии начали публиковать брошюры с рекомендациями по академической коммуникации, как, например,

- использование нейтральных формулировок *Dozierende* (преподающие), *Studierende* (обучающиеся) вместо *Dozenten* (доценты), *Studenten* (студенты);
- переформулирование *Personen, die sich bewerben* (лица, подающие заявку) вместо *Bewerber* (заявитель);
- использование специальных знаков (нижнее подчеркивание, звездочки) в качестве маркировки гендерного разрыва, который позволяет обратиться в тексте одновременно как к женской, так и мужской части аудитории (*Mitarbeiter_innen*, *Mitarbeiter*innen*) [15].

Принцип «равноправия в языке» повлек за собой увеличение употребления терминов, не предполагающих гендерной маркировки: например, *das Team* вместо *die Mannschaft* (команда).

Статистические данные, с одной стороны, свидетельствуют о резком увеличении частотности использования феминизированных форм для обозначения коллег-женщин в академической среде, с другой, говорят о сохраняющемся неравенстве «по вертикали»: менее 20% женщин занимают профессорские должности в немецких университетах.

Заключение

Вопрос гендерного равноправия осмысливается в немецком обществе не только на социальном и политическом уровне, но также и на уровне языковых структур и дискурсивных практик. Последовательное увеличение числа женщин среди профессорско-преподавательского состава немецких университетов на протяжении всей второй половины XX века, с одной стороны, стало следствием социальных и политических трансформаций, которые переживала Германия в эту эпоху, а также развития феминизма на Западе, с другой, представляло вызов консервативной немецкой академической среде, которая,

будучи представленной преимущественно мужчинами, определяла, осознавала и позиционировала себя в языковых структурах, несущих отпечаток гендерной принадлежности и исключавших «видимое» присутствие женщин. Борьба за равные права отразилась и на дискурсивных практиках: в немецком языке появляется новый феномен – *geschlechtsgerechte / gendergerechte Sprache* – особый тип академической коммуникации, требующий соблюдения принципов равноправия полов в языковых формулировках.

Литература:

1. Гладышева Е.В. Влияние нравственных ценностей на успешность экономической деятельности (на примере отечественных предпринимателей XIX – XX вв.). *Российский технологический журнал*. 2017;5(4):67-76. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-4-67-76>
2. Гриценко Е.С. Становление гендерной лингвистики в контексте общего развития науки о языке. Нижний Новгород: Изд-во ГОУ ВПО НГЛУ, 2007. 121 с. ISBN 978-5-85839-162-3
3. Гриценко Е.С., Лалетина А.О., Сергеева М.В. Гендер в английской лингвокультуре. Нижний Новгород: Нижегородский гос. лингвистический ун-т им. Н.А. Добролюбова, 2008. 214 с. ISBN 978-5-85839-181-4
4. Гриценко С.А., Чернова Н.И., Катахова Н.В. Диалог культур России и Швеции в контексте формирования мировоззрения студенческой молодежи. *Российский технологический журнал*. 2018;6(5):77-88. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-5-77-88>
5. Кирилина А.В. Гендер. Лингвистические аспекты. М.: Ин-т социологии РАН, 1999. 189 с. ISBN 5-89697-42-0
6. Кирилина А.В. Гендерные исследования в лингвистических дисциплинах / В кн. Гендер и язык. М.: Языки славянской культуры, 2005. С. 7–31.
7. Сидорова В.В. Гуманитарий и общество: в ответе ли мы? *Сократ*. 2016;5(Измерения науки):80-85.
8. Ausgaben, Einnahmen und Personal der öffentlichen und öffentlich geförderten Einrichtungen für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung. Fachserie 11. Reihe 4.4. Bildung und Kultur. Personal an Hochschulen. 2019. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Hochschulen/Publikationen/Downloads-Hochschulen/personal-hochschulen-2110440187004.pdf?__blob=publicationFile
9. Costas I. Women in Science in Germany. *Science in Context*. 2002;15(4):557-576. <https://doi.org/10.1017/S0269889702000649>
10. Lakoff R. Language and women's Place. *Language in Society*. 1973;2(1):45-79. <https://doi.org/10.1017/S0047404500000051>
11. Pusch L. Das Deutsch als Männersprache. *Linguistische Berichte*. 1981;69:59-74.
12. Samel I. Einführung in die feministische Sprachwissenschaft. Berlin: Schmidt Erich Verlag, 2000. 240 p. ISBN 3 503 04978 9
13. Trömel-Plötz S. Linguistik und Frauensprache. *Linguistische Berichte*. 1978;57:49-68.
14. Das Wortauskunftssystem zur deutschen Sprache in Geschichte und Gegenwart [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dwds.de/> (дата обращения 12.12.2017).
15. Orientierungshilfe für eine gerechte Gendersprache. An den Hochschulen im Land Bremen. Bremen, 2014. 22 s.

References:

1. Gladysheva E.V. Influence of moral values on the success of economic activity (on the example of domestic entrepreneurs of the XIX-XX centuries). *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2017;5(4):67-76 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2017-5-4-67-76>
2. Gritsenko E.S. *Stanovlenie gendernoi lingvistiki v kontekste obshchego razvitiya nauki o yazyke* (The formation of gender linguistics in context of the general development of the science of and language). Nizhnii Novgorod: NGLU Publishing House; 2007. 121 p. (in Russ.). ISBN 978-5-85839-162-3
3. Gritsenko E.S., Laletina A.O., Sergeeva M.V. *Gender v angliiskoi lingvokul'ture*. (Gender in English linguistic culture). Nizhnii Novgorod: Nizhny Novgorod Dobrolyubov State Linguistic University; 2008. 214p. (in Russ.). ISBN 978-5-85839-181-4
4. Gritsenko S.A., Chernova N.I., Katahova N.V. Dialogue of cultures of russia and sweden in the context of formation of the world outlook of students. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(5):77-88 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-5-77-88>
5. Kirilina AV. *Gender. Lingvisticheskie aspekty*. (Gender. Linguistic Apects). Moscow: Institute of Sociology RAS; 1999. 189 p. (in Russ.). ISBN 5-89697-42-0
6. Kirilina AV. *Gendernye issledovaniya v lingvisticheskikh distsiplinakh*. V kn. *Gender i yazyk*. (Gender Studies in Linguistics. In: Gender and Language). Moscow: Yazyki slavyanskoi kul'tury; 2005. P. 7–31 (in Russ.).
7. Sidorova V.V. Humanities and society: are we in response? *Sokrat = Socrates*. 2016;5:80-5 (in Russ.).
8. Ausgaben, Einnahmen und Personal der öffentlichen und öffentlich geförderten Einrichtungen für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung. Fachserie 11. Reihe 4.4. Bildung und Kultur. Personal an Hochschulen. 2019. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Hochschulen/Publikationen/Downloads-Hochschulen/personal-hochschulen-2110440187004.pdf?__blob=publicationFile

www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Hochschulen/Publikationen/Downloads-Hochschulen/personal-hochschulen-2110440187004.pdf?__blob=publicationFile

9. Costas I. Women in Science in Germany. *Science in Context*. 2002;15(4):557-76. <https://doi.org/10.1017/S0269889702000649>

10. Lakoff R. Language and women's Place. *Language in Society*. 1973;2(1):45-79. <https://doi.org/10.1017/S0047404500000051>

11. Pusch L. Das Deutsch als Männersprache. *Linguistische Berichte*. 1981;69:59-74.

12. Samel I. Einführung in die feministische Sprachwissenschaft. Berlin, Schmidt Erich Verlag; 2000. 240 p. ISBN 3 503 04978 9

13. Trömel-Plötz S. Linguistik und Frauensprache. *Linguistische Berichte*. 1978;57:49-68.

14. Das Wortauskunftssystem zur deutschen Sprache in Geschichte und Gegenwart. Available from: <https://www.dwds.de/>

15. Orientierungshilfe für eine gerechte Gendersprache. An den Hochschulen im Land Bremen. Bremen, 2014. 22 s.

Об авторах:

Ирина Сергеевна Редькова, кандидат исторических наук, доцент кафедры иностранных языков Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Надежда Ивановна Чернова, доктор педагогических наук, профессор, заведующая кафедрой иностранных языков Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Наталья Владимировна Катахова, кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Irina S. Redkova, Cand. Sci. (History), Associate Professor of the Department of Foreign Languages, Institute of Radioengineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Nadezhda I. Chernova, Dr. Sci. (Pedagogical Sciences), Full Professor, Head of the Department of Foreign Languages, Institute of Radioengineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Nataliya V. Katakova, Cand. Sci. (Pedagogical Sciences), Associate Professor of the Department of Foreign Languages, Institute of Radioengineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС 77-74578 от 14 декабря 2018 г.

Дата опубликования 31 января 2020 г.

МИРЭА – Российский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

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

