

# РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**RUSSIAN  
TECHNOLOGICAL  
JOURNAL**



*Информационные системы.  
Информатика.  
Проблемы информационной безопасности*

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

*Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы*

*Микро- и нанoeлектроника.  
Физика конденсированного состояния*

*Аналитическое приборостроение и технологии*

*Математическое моделирование*

*Экономика наукоемких и высокотехнологичных  
предприятий и производств*

*Мировоззренческие основы технологии и общества*





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

# РОССИЙСКИЙ технологический журнал

**RUSSIAN  
TECHNOLOGICAL  
JOURNAL**

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

- Information systems. Computer sciences. Issues of information security
- Multiple robots (robotic centers) and systems. Remote sensing and non-destructive testing
- Modern radio engineering and telecommunication systems
- Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics
- Analytical instrument engineering and technology
- Mathematical modeling
- Economics of knowledge-intensive and high-tech enterprises and industries
- Philosophical Foundations of Technology and Society

**Российский технологический журнал =  
Russian Technological Journal  
2019, том 7, № 4**

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =  
Russian Technological Journal  
2019, vol. 7, no. 4**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4>

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



*Электронное сетевое издание*  
**Российский технологический журнал =**  
**Russian Technological Journal**  
2019, том 7, № 4

Дата опубликования 31 июля 2019 г.

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

Периодичность: 6 раз в год.

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

**Учредитель и издатель:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«МИРЭА – Российский технологический университет»  
119454, РФ, г. Москва, пр-кт Вернадского, д. 78.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК РФ, индексируется в  
DOAJ,  
РИНЦ (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.

**Ответственный секретарь:**

**Есипова Ольга Валерьевна** — к.х.н., доцент, РТУ МИРЭА, член Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), esipova@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.

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

*Electronic network journal*  
**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =**  
**Russian Technological Journal**  
2019, vol. 7, no. 4  
Publication date July 31, 2019.

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.

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).

**Founder and Publisher:**

Federal State Budget  
Educational Institution  
of Higher Education  
«MIREA – Russian Technological University»  
78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia.

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

**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.

**Executive Editor:**

**Olga V. Esipova** – Cand. of Sci. (Chemistry), Associate Professor, RTU MIREA, member of the Association of Scientific Editors and Publishers (ASEP), esipova@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.

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/0000-0003-3990-9846>, bush@mirea.ru.
- Вахрушев Сергей Борисович** проф., д.ф.-м.н., заведующий лабораторией нейтронных исследований Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, профессор кафедры Физической электроники СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия, Scopus Author ID 7004228594, ResearcherID A-9855-2011, <http://orcid.org/0000-0003-4867-1404>, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru.
- Голованова Наталия Борисовна** проф., д.э.н., заместитель первого проректора РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57191447039, golovanova@mirea.ru.
- Гуляев Юрий Васильевич** Академик РАН, член Президиума РАН, проф., д.ф.-м.н., научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия, Scopus Author ID 35562581800.
- Жуков Дмитрий Олегович** проф., д.т.н., заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 57189660218, zhukov\_do@mirea.ru.
- Кимель Алексей Вольдемарович** доцент, к.ф.-м.н., Университет Радбауд, г. Наймеген, Нидерланды, Scopus Author ID 6602091848.
- Кондратенко Владимир Степанович** проф., д.т.н., заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 15834985700, kondratenko@mirea.ru.
- Крамаров Сергей Олегович** проф., д.ф.-м.н., Южный университет (ИУБиП), Ростов-на-Дону, Россия, Scopus Author ID 56638328000.
- Мишина Елена Дмитриевна** проф., д.ф.-м.н., зав. специализированной учебно-научной лабораторией фемтосекундной оптики для нанотехнологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 7005350309, ResearcherID D-6402-2014, <http://orcid.org/0000-0003-0387-5016>, mishina@mirea.ru.
- Пасечник Сергей Вениаминович** проф., д.ф.-м.н., профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 6701559250, ResearcherID P-7239-2015, <http://orcid.org/0000-0002-6050-2761>, pasechnik@mirea.ru.
- Перно Филипп** проф., Центральная Школа г. Лилль, Франция, Scopus Author ID 7003429648.
- Романов Михаил Петрович** проф., д.т.н., директор Института кибернетики РТУ МИРЭА, Москва, Россия, Scopus Author ID 14046079000, m\_romanov@mirea.ru.
- Савиных Виктор Петрович** член-корр. РАН, Дважды Герой Советского Союза, д.т.н., профессор, президент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия, Scopus Author ID 56412838700, vp@miiigaik.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, Senior Researcher, 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*

***Андреанова Е.Г., Раев В.К., Фильгус Д.И.***

Определение кратчайших гамильтоновых путей в произвольных графах распределенных баз данных 7

***Дубов С.С., Линьков В.В., Карбаинова М.А.***

Информационная безопасность ребенка в цифровом пространстве Российской Федерации 21

### *СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ*

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

Пульсации напряжения отрицательной полярности на выходе двухполярного DC–DC преобразователя LM27762 при близком к предельному входном напряжении 31

***Гуров Е.В., Увайсов С.У., Увайсова А.С., Увайсова С.С.***

Номинальные и эффективные значения параметров катушек индуктивности и конденсаторов на высоких частотах 44

***Каганов В.И., Фам Ки***

Перераспределение мощности сигналов в многолучевых системах радиосвязи 54

***Певцов Е.Ф., Деменкова Т.А., Шнякин А.А.***

Тестопригодное проектирование интегральных схем и проблемы защиты проектов 60

### *МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ*

***Билык В.Р., Гришунин К.А.***

Комплексный показатель преломления титаната стронция в терагерцовом диапазоне частот 71

***Савельев Д.В., Фетисов Л.Ю., Чашин Д.В., Шабин П.А., Вьюник Д.А., Федулов Ф.А., Kettl W., Shamonin M.***

Метод измерения деформаций магнитоактивных эластомеров под действием магнитных полей 81

***Яшин М.М., Мирзокулов Х.Б.***

Приближение симметризованного Максвелла-Гарнетта как эффективный метод исследования нанокомпозитов 92

## CONTENTS

---

### *INFORMATION SYSTEMS. COMPUTER SCIENCES. ISSUES OF INFORMATION SECURITY*

***Andrianova E.G., Raev V.K., Filgus D.I.***  
Determination of the shortest hamilton paths in an arbitrary graph of distributed databases 7

***Dubov S.S., Linkov V.V., Karbainova M.A.***  
Child's information security in digital space of the Russian Federation 21

### *MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS*

***Bityukov V.K., Mikhnevich N.G., Petrov V.A.***  
Negative output voltage ripples of bipolar LM27762 DC–DC converter near maximum input voltage 31

***Gurov E.V., Uvaysov S.U., Uvaysova A.S., Uvaysova S.S.***  
Nominal and actual values of inductor and capacitor parameters at high frequencies 44

***Kaganov V.I., Fam Ky***  
Redistribution of signals power in multipath system radio of communication 54

***Pevtsov E.Ph., Demenkova T.A., Shnyakin A.A.***  
Design for testability of integrated circuits and project protection difficulties 60

### *MICRO- AND NANO-ELECTRONICS. CONDENSED MATTER PHYSICS*

***Bilyk V.R., Grishunin K.A.***  
Complex refractive index of strontium titanate in the terahertz frequency range 71

***Saveliev D.V., Fetisov L.Yu., Chashin D.V., Shabin P.A., Vyunik D.A., Fedulov F.A., Kettl W., Shamonin M.***  
Method of measuring deformations of magnetoactive elastomers under the action of magnetic field 81

***Yashin M.M., Mirzokulov Kh.B.***  
Symmetrized maxwell-garnett approximation as an effective method for studying nanocomposites 92

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-7-20>



УДК 621.311.6:621.3.089.2

## Определение кратчайших гамильтоновых путей в произвольных графах распределенных баз данных

**Е.Г. Андрианова,  
В.К. Раев,  
Д.И. Фильгус<sup>@</sup>**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия  
<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: dmif42@ya.ru*

Разработан метод поиска кратчайшего гамильтонова пути в произвольном графе на основе рангового подхода, который обеспечивает высокую оперативность и существенное уменьшение погрешности решения задачи организации процесса управления множеством транзакций и запросов при их реализации в сетевых базах данных. Во многих случаях существующие решения не обеспечивают необходимых результатов по времени доступа и точности найденного решения. Использование разработанного метода позволяет минимизировать время простоя вычислительных устройств, сократить объемы и время передачи данных от одних исполнительных устройств к другим, повысить общую масштабируемость, минимизировать время доступа к данным и пр. Важным достоинством предлагаемого метода является уменьшения числа элементарных операций и числа обрабатываемых векторов в процедуре формирования очереди выполнения операций запроса, что приводит к существенному уменьшению времени на реализацию этих процедур. В работе используются методы теории графов. Оценка эффективности решения задачи выполнена с использованием системного подхода, системного анализа и теории исследования операций. Обработка экспериментальных данных, полученных в ходе работы, проведена в соответствии с положениями математической статистики.

**Ключевые слова:** проблема, классификация, системная инженерия, требования, валидация, верификация.

## Determination of the Shortest Hamiltonian Paths in an Arbitrary Graph of Distributed Databases

Elena G. Andrianova,  
Vyacheslav K. Raev,  
Dmitry I. Filgus<sup>@</sup>

*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*

*@Corresponding author e-mail: dmif42@ya.ru*

A method has been developed for finding the shortest Hamiltonian path in an arbitrary graph based on the rank approach, which provides high efficiency and a significant reduction in the error in solving the problem of organizing the process of managing multiple transactions and queries when they are implemented in network databases. In many cases, existing solutions do not provide the necessary results in terms of access time and accuracy of the found solution. Using the developed method allows minimizing the idle time of computing devices, reducing the volume and time of data transfer from one device to another, increases overall scalability, minimizes data access time, etc. An important advantage of the proposed method is to reduce the number of elementary operations and the number of vectors being processed the queue of the operations of the request, which leads to a significant reduction in time to implement the procedures for the formation of echer di operations in the requests. Methods of graph theory were used in this paper. The effectiveness of the task solution was evaluated using a systems approach, system analysis and the theory of operations research. Processing of experimental data obtained during the work was carried out in accordance with the provisions of mathematical statistics.

**Keywords:** graph, Hamiltonian path, query, rank approach, short tree of paths, transaction, rank, distributed database.

### Введение

Распределенные системы управления базами данных (СУБД) являются основным компонентом современных систем обработки информации (СОИ). Все использующиеся в настоящее время модели СОИ – такие, как модель файлового сервера, модель сервера баз данных, модель сервера приложений, модель распределенных вычислений и др. – имеют в своей основе выполнение запросов к базам данных, которые обрабатываются СУБД. Существует множество определений термина «оптимизация запросов», однако наиболее часто встречающееся в литературе формулируется следующим образом: под оптимизацией запросов понимается функция распределенной СУБД, осуществляющая поиск оптимального плана выполнения запросов из всех возможных для заданного запроса, либо процесс изменения запроса и/или структуры баз данных (БД) с целью уменьшения использования вычислительных ресурсов при выполнении запроса [1–5].

Основы метода решения задачи оптимизации запросов, различные модификации которого с успехом используются во многих дорогих современных реляционных СУБД со встроенными оптимизаторами, даны в работе [4]. На практике часто приходится использовать относительно недорогие системы, не имеющие оптимизаторов, где пользователи нередко применяют семантически прозрачные запросы, но не оптимальные с точки зре-

ния их эффективности. Более того, как показывает опыт, и в системах со встроенными оптимизаторами небесполезна предварительная внешняя оптимизация. Возникает потребность в разработке программной надстройки для формирования оптимальных запросов. Здесь следует отметить, что существуют различные подходы к проблеме оптимизации запросов пользователей в СУБД. Это одна из наиболее сложных задач компьютерной обработки информации, которая является NP-полной.

Несмотря на наличие частных результатов, относящихся к специальным классам графов, в общем случае задача определения гамильтоновых циклов и гамильтоновых путей недостаточно изучена [1, 2]. Так, например, до сих пор нет эффективной процедуры нахождения гамильтонова пути в произвольном графе. Более того, нет даже хороших методов доказательства существования такого пути. Но актуальность, определяемая сложностью множества задач управления информационными системами, обуславливает необходимость нахождения новых решений, соответственно улучшающих существующие [6–11].

Создание полиномиальных алгоритмов для решения NP-полных задач может базироваться не только на идее рангового подхода. Классический подход к решению любой NP-полной задачи заключается в попытке выработать стратегию отсечения неперспективных вариантов решений на экспоненциальном множестве  $W$  допустимых решений. Применение «жадных» алгоритмов на множестве  $W$  приводит либо к необходимости полного перебора вариантов, либо к эвристическим решениям, которые могут отличаться от оптимальных на 70% и более. Поэтому и возникли алгоритмы на основе идей метода ветвей и границ. Необходимо подчеркнуть, что если на первых шагах работы алгоритма удастся найти оптимальное решение, то затем необходимо осуществить неявный полный перебор всех вариантов на множестве  $W$ , например, мощности  $2^n$ , чтобы убедиться, что данное решение действительно оптимально. В этом заключается основной недостаток метода.

Не менее важным с точки зрения практического применения разрабатываемых алгоритмов является вопрос о возможности построения параллельных алгоритмов решения задачи поиска кратчайшего гамильтонова пути, что связано с использованием концепций мультипрограммирования и многопроцессорной обработки информации управления [3]. Задача определения кратчайших гамильтоновых путей в графе с точки зрения построения параллельных алгоритмов относится к классу сильно связанных задач [4]. Как показано ранее [12, 13], для эффективного распараллеливания задачи произвольной размерности необходимо определять оптимальное число процессорных элементов, поскольку с их ростом суммарное время ее решения может резко увеличиваться из-за неоправданно растущего числа обменных операций. При этом сама задача определения оптимального числа процессорных элементов также относится к классу NP-полных задач, и эффективные методы ее решения неизвестны [5, 7, 14, 15].

#### ***Общий подход к решению задач комбинаторной оптимизации и оптимизационных задач в теории графов***

Рассмотрим конечное множество произвольных объектов теории графов или конфигураций комбинаторной оптимизации. В общем случае объект может быть произвольным, но должны быть определены конечное множество элементов  $\Omega = \{\omega_i\}$  или подмно-

жества  $L_i \in \Omega$  и правила  $R$ , позволяющие формировать объекты из исходных элементов или подмножеств  $L_i$ , принадлежащие множеству  $\Omega$ .

Пусть заданы: некоторое разбиение множества  $\Omega$  на семейства подмножеств  $\{L_i\}$  так, что  $\bigcup_i L_i = \Omega$ , и  $L_i$  описывают интересующие нас объекты, состоящие из базовых элементов  $\{l_i\}$ , таких, что  $= \bigcup_i l_i$ , а также правило  $R$ , позволяющее из базовых элементов определять весовые характеристики произвольных объединений  $L_k \cup L_p \in \Omega$ , характеризующие свойства  $\{v\}$ . Требуется определить объект с интересующим нас свойством  $v^* \in \{v\}$ .

Представим множество всех возможных объединений подмножеств  $L_i$  в виде графа  $D$  (рис. 1) с параллельно ярусной структурой, состоящей из  $n$  горизонтальных линеек с вершинами  $1, 2, \dots, n$  и  $n$  ярусами, каждый из которых содержит все вершины графа  $D$ . При этом каждой вершине графа  $D$  поставим в соответствие базовый элемент  $l_i$ . В графе  $D$  произвольная вершина  $i$  может быть достигнута путями рангов  $r = 1, r = 2, \dots, r = n-1$ , а произвольному пути  $\mu_{st}$ , удовлетворяющему правилам построения  $R$  и проходящему через вершины  $(j, p, \dots, k, t)$ , соответствует объединение базовых элементов  $(l_j \cup l_p \cup \dots \cup l_k \cup l_t)$ , определяющих некоторый объект  $L_i \in \Omega$ . Длина этого пути  $d(\mu_{st})$  определяется по правилам, принадлежащим множеству  $R$ . Следовательно, множество всех путей  $m_{st}(r)$  в графе  $D$ , удовлетворяющих правилам  $R$ , определяют область допустимых решений исходной задачи по выделению объекта с интересующим нас свойством  $v^* \in \{v\}$ . В качестве исходной вершины в графе  $D$  будем использовать фиктивную вершину  $S$ , которую в некоторых случаях удобно отождествлять с нулевым или исходным состоянием системы. Это приводит к тому, что максимальный ранг пути в графе  $D$  становится равным  $n$ , а добавление вершины  $S$  к базовым элементам системы не изменяет их свойств, определяемых правилами  $R$  [7].

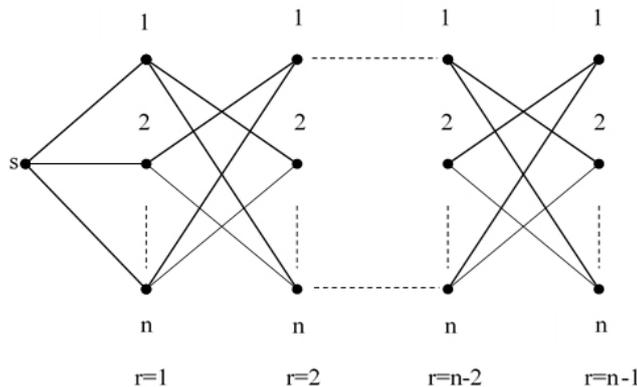


Рис. 1. Стянутое дерево всех путей  $D$  графа  $G, V, E$ .

Множество сложных систем, обладающих различными свойствами  $\{F_i\}$ , может быть отображено с помощью некоторого подмножества графов  $\{G_i\}$ . Рассмотрим произвольный  $n$ -вершинный граф  $G(V, E) \in \{G_i\}$ , который описывает состояние системы  $F \in \{F_i\}$  с конечным числом состояний  $n$ . Вершины  $\{i\} \in V$  графа  $G(V, E)$  соответствуют возможным состояниям системы, пути в графе  $G(V, E)$ , определяемые последовательностью прохождения вершин  $\{v_i\}$  и ребер  $\{(i, j)\}$ , характеризуют возможный порядок достижения состояния  $i = p$  из некоторого исходного состояния  $s$ . Важной характеристикой пути является

ранг пути  $r$  – число ребер, образующих путь. В графе  $G(V, E)$  максимальное значение ранга  $r = n-1$ , и в общем случае ранг произвольного пути  $\mu_{sp}$  характеризует сумму начального состояния, конечного состояния и числа состояний предшествования, через которые может быть достигнуто состояние  $p$  из некоторого исходного состояния  $s$ . Тогда множества путей  $m_{sj}^r; j = \overline{(1, n)}$  определяют способы достижения состояния  $j$ . В качестве базовых элементов  $\{l_j\}$  выберем подмножество  $\{vi\} \in V$  вершин графа  $G(V, E)$ , тогда объектам  $\{L_j\}$  будет соответствовать все множество объектов  $\Omega$ , которое можно породить на множестве  $V$ , используя правила  $R$ . Например, клики в произвольных графах, независимые множества, циклы графов, вектора и матрицы, задающие некоторый объект в  $G(V, E)$ . Каждый объект будем характеризовать  $(m+1)$  весовой характеристикой, где  $m$  – это некоторые второстепенные характеристики объекта, на которые в общем случае могут быть наложены ограничения на то, что они не должны превышать некоторых величин  $\{b_i\}, i = (1, 2 \dots m)$ . И имеется один определяющий показатель качества объекта, принадлежащий множеству  $\Omega$  и обладающий определенным свойством  $v$ . Правила  $P$  определения весовых характеристик объектов естественно должны определяться в соответствии с правилами формирования самих объектов, и  $P \in R$ . Таким образом, пути  $\mu_{sj}^r$  в графе  $D$  соответствует объект  $L_j$ , который может быть построен из  $r$  базовых элементов  $\{v_j\}$ , включая элемент  $j$ , на основе правил  $R$ . Соответственно, множества путей определяют множество объектов  $L_j$ , которые можно построить из  $r$  базовых элементов  $\{v_j\}$ , включая элемент  $j$ .

Дерево всех путей  $D$  содержит  $(n-1)$  горизонтальную линейку и  $(n-1)$  ярус. При определении путей прохождение по каждой горизонтальной линейке допускается только один раз, согласно определению задачи поиска кратчайшего гамильтонова пути. Исходя из стянутого дерева путей, для произвольной вершины  $j$  множество путей, ведущих в эту вершину из некоторой вершины  $S$ , можно представить в следующем виде:

$$m_s^r(j) = m_{sj}^{r=1} \cup m_{sj}^{r=2} \cup \dots \cup m_{sj}^{r=n}, \quad j = \overline{(1, n)}, \quad (1)$$

где  $m_{sj}^r$  – подмножества путей из произвольной вершины  $s$  в некоторую вершину  $j$  графа  $G(V, E)$ , ранга  $r$ . Таким образом, используя граф  $D$  и введя правила формирования путей следующего ранга, можно из произвольной вершины  $S$  поэтапно строить пути произвольного ранга вплоть до ранга  $r = n-1$ . При таком подходе для решения задачи определения кратчайшего гамильтонова пути в графе  $D$  нужно построить кратчайшие пути ранга  $r = n-1$  от вершины  $1, 2 \dots n$  ко всем остальным вершинам графа и затем среди них выбрать кратчайший. То есть, если на основе подмножеств путей  $m_{sj}^{r=1}$  в графе  $D$  строить подмножества  $m_{sj}^{r=2}$  и так далее до  $m_{sj}^{r=n-1}$ , то мы будем вынуждены построить  $(n-1)!$  путей:

$$m_s(j) = m_{sj}^{r=1} \cup m_{sj}^{r=2} \cup \dots \cup m_{sj}^{r=n-1}; \quad j = \overline{(1, n-1)}; \quad S = \overline{(1, n-1)}, \quad (2)$$

С целью сокращения алгоритмической и вычислительной сложности разрабатываемых алгоритмов поиска кратчайшего гамильтонова пути (ПКГП) для формирования путей введем процедуру  $A$ , позволяющую отсекалть неперспективные пути ветвления дерева путей. Для отсекалния неперспективных вариантов в процедуре  $A$  предлагается использовать принцип оптимизации по направлению к вершине  $p$  при формировании путей следующего ранга  $m_{sp}^{r+1}$  на основе путей предыдущего ранга  $m_{sj}^r$ .

**Разработка обобщенной процедуры  $A_0$**

Введем правила формирования путей ветвления с использованием процедуры  $A$ :

1. Пути, формируемые на рангах  $r = 1$  и  $r = 2$ , зависят от исходных значений весов и числа вершин  $n$  графа  $D(V, E)$ ;
2. Пути, формируемые на рангах  $r = 3, \dots, r = n-1$ , зависят от значений весовых характеристик множества  $m_{sj}^r$ , где  $r = 2$ , т. е. путей, сформированных на ранге 2;
3. Выбор подмножества точек исхода ветвления в сформированном множестве  $m_{sj}^r$ , согласно определенного критерия эффективности, производится по правилу:

$$\min\{\mu_{sj}^r\} \tag{3}$$

4. Выбор точек входа в структуру ветвления по направлению к некоторой вершине  $p$  на ранге  $r = r+1$ , производится по правилу:

$$\min(j, p) \tag{4}$$

где  $(j, p)$  – ребро графа  $D$ .

Таким образом, сформулированные правила ветвления 1–4 позволяют построить рекуррентное соотношение, определяющее сущность реализации процедуры  $A$ :

$$\mu_{sp}^{r+1} = \min_j \{ \mu_{sj}^r \cup (j, p) \}; j = (\overline{1, n}); p = (\overline{1, n}); j \neq p, \tag{5}$$

где  $(j, p)$  – ребро графа  $D$ ;  $n$  – число различных вершин в графе  $D$ .

Стянутое дерево путей с применением процедуры  $A$  соответственно будет иметь вид, представленный на рис. 2.

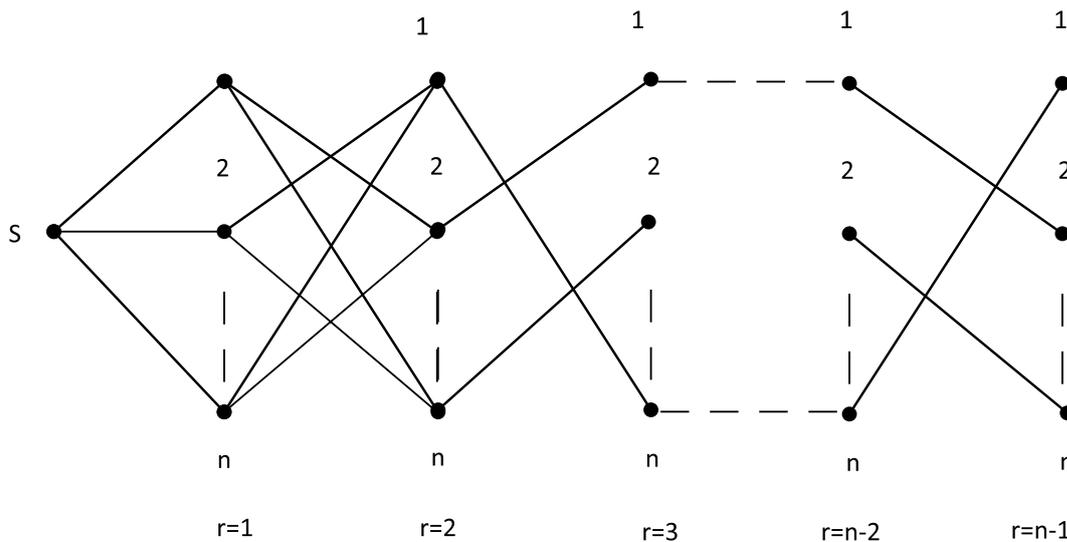


Рис. 2. Стянутое дерево всех путей  $D$  графа  $G(V, E)$  с применением процедуры  $A$ .

Рассмотрим порядок реализации процедуры  $A$  в графах поиска кратчайшего гамильтонова пути для произвольного числа вершин.

Исходя из отсутствия какой-либо существующей методики начала поиска кратчайшего гамильтонова пути, примем допущение, что поиск может начинаться с любой вершины без влияния на конечный результат. Такое допущение часто принимается при использовании алгоритмов, основанных на методе ветвей и границ. В нашем случае введение процедуры  $A$  предполагает некоторое отсечение неперспективных направлений поиска. Как следствие приведенного допущения и предназначенности процедуры отсечения, за исходную примем любую из вершин графа, а поиск на первых двух рангах будем производить по направлению ко всем возможным вершинам. То есть, из произвольной вершины  $S$  строятся все возможные пути ранга  $r = 1$  ко всем вершинам графа  $D$ , далее, используя пути ранга  $r = 1$ , строятся все возможные пути ранга  $r = 2$ , на их основе формируются пути следующего ранга с использованием рекуррентного соотношения (5), и т. д. до построения путей ранга  $r = n-1$ .

Следует отметить, что если в процессе применения рекуррентного соотношения (5) возникает несколько кратчайших путей одинаковой длины, то необходимо их все строить на следующем ранге.

Выделим следующие особенности работы процедуры  $A$ . В процессе ее реализации может возникать две ситуации. Первая – когда процедура  $A$  на каждом шаге построила пути в множества  $m_{sj}^r$ , т. е. принцип оптимальности работы процедуры не нарушался, и вторая – когда к одной из вершин ни одного пути построить нельзя. Последнее обстоятельство возможно в двух случаях:

а) если анализируемый граф неполный, и к вершине  $p$  не существует пути некоторого ранга  $r = k$ ;

б) когда некоторая вершина  $p$  войдет во все пути предыдущего ранга.

Нетрудно видеть, что в первой ситуации процедура  $A$  не теряет оптимальное решение, а во второй ситуации (случай б) оптимальное решение может быть потеряно, поскольку принцип оптимальности работы процедуры нарушается (рис. 3). Это означает, что на основе процедуры  $A$  может быть построен только приближенный алгоритм решения задачи. Однако после нарушения принципа оптимальности последующее продление путей с использованием рекуррентного соотношения (5) позволит минимально отклоняться от оптимального решения. Блок-схема алгоритма процедуры  $A$  представлена на рис. 4.

#### ***Разработка алгоритма ПКГП решения задачи определения кратчайших гамильтоновых путей в произвольных графах***

В качестве исходных данных для разработки алгоритма ПКГП будем использовать следующие характеристики графа  $G(V, E)$ :

– матрицу связности, определяющую наличие перехода между вершинами графа  $G$ :  $G^{ce} = \left\| v_{ij}^{ce} \right\|$ , где  $v_{ij}^{ce} = 1$ , если существует связь между  $i$ -й и  $j$ -й вершинами графа  $G$ , в противном случае  $v_{ij}^{ce} = 0$ .

– весовые характеристики нагрузки на дугах, определяемые некоторой неотрицательной величиной  $C > 0$ . Данная величина имеет некоторые особенности, которые определяются исходя из следующих соображений:

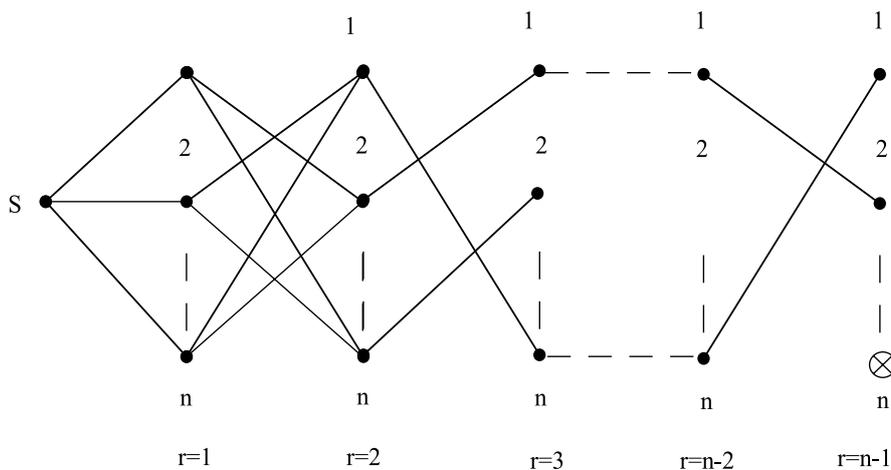


Рис. 3. Стянутое дерево путей  $D$  графа  $G(V, E)$ , с применением процедуры  $A$  (случай б).

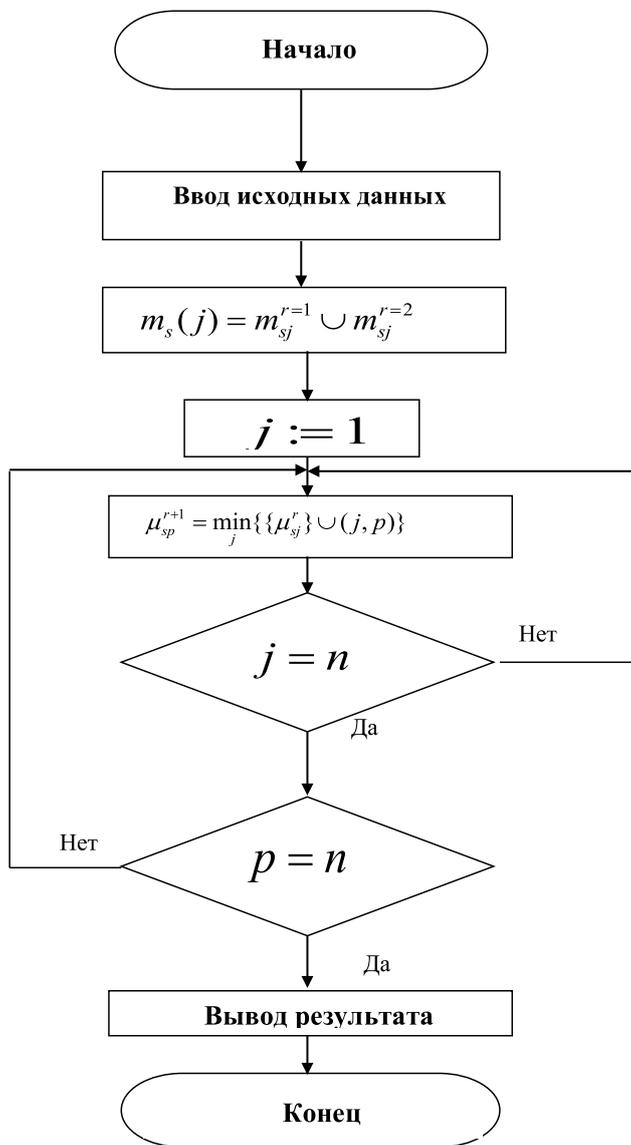


Рис. 4. Блок-схема алгоритма процедуры  $A$ .

1. Если характеристическая нагрузка определяется числом элементарных операций, необходимых для выполнения заданной операции в алгоритме процедуры  $A$ , то величина  $C$  принимает следующие значения:  $C > 0$ ,  $C = int$ .

2. Если характеристическая нагрузка определяется временем выполнения заданной операции, то величина  $C > 0$ ,  $C$  – определена на всем множестве действительных чисел.

3. Для вершин, между которыми отсутствуют связь  $i \leftrightarrow j$ , принимается  $C = \infty$ .

В качестве исходной примем любую точку графа  $G$ , обозначив ее переменной  $s$ , физический смысл которой заключается в следующем: «вершина, от которой производится поиск» в процессе реализации алгоритма, принимает соответствующие значения, равные номерам вершин графа вплоть до некоторой вершины  $n$ . Временной точкой изменения состояния системы при переходе поиска от вершины  $s$  к вершине  $s+1$  принимается условие окончания работы процедуры  $A$  по выполнению поиска кратчайшего гамильтонова пути от вершины  $s$ . В итоге работы алгоритма образуется некоторое множество путей с суммарной оценкой каждого:

$$C_{сум} = \sum_{r=1}^{n-1} \{C_{sj}^r\} \quad (6)$$

Данная суммарная оценка и является той характеристикой, которая предполагает нижнюю границу времени реализации каждого из путей. В соответствии с выбранным критерием эффективности определим оптимальный путь  $\Pi_{sj}^r$  из соотношения:

$$\Pi_{sj}^r = \mu_{sj}^r \in m_{sj}^r \equiv \min \sum_{r=1}^{n-1} \{C_{sj}^r\} \quad (7)$$

Тогда алгоритм ПКГП примет следующую последовательность операций, соответствующую приведенному описанию:

Шаг 1. Присваиваем значение  $S := 1$  переменной  $S$ .

Шаг 2. В графе  $D$ , используя процедуру  $A$ , определяем кратчайшие пути ранга  $r = n-1$  от вершины  $S$  ко всем остальным вершинам графа, используя рекуррентное соотношение (5).

Шаг 3. Увеличиваем значение  $S := S+1$ .

Шаг 4. Проверяем  $S = n$ , если нет, то переходим к выполнению шага 2, в противном случае – выполняем следующий шаг.

Шаг 5. Среди всех построенных кратчайших путей ранга  $r = n-1$  на шагах 1 и 2 выбираем самый короткий из соотношения (7).

Шаг 6. Вывод результата  $\Pi_{sj}^r$ .

Шаг 7. Конец работы алгоритма. Схема работы алгоритма поиска кратчайшего гамильтонова пути с использованием процедуры  $A$  представлена на рис. 5.

Если существует  $Q$  вершин  $i$ , удовлетворяющих соотношению (5), то это означает, что существует  $Q$  минимально равноудаленных вершин от вершины  $s$ , определяемой вектором  $X_s$ . Определив вершину  $i$  входа для графа, можно решать задачу определения кратчайшего гамильтонова пути за один проход процедуры  $A_1$ . При этом погрешность по сравнению с  $n$ -проходной процедурой, как будет показано ниже, увеличивается не более, чем на один процент, а сложность алгоритма понижается в  $(n-1)$  раз. Алгоритм с использованием минимально удаленной точки обозначим  $A_2$ .

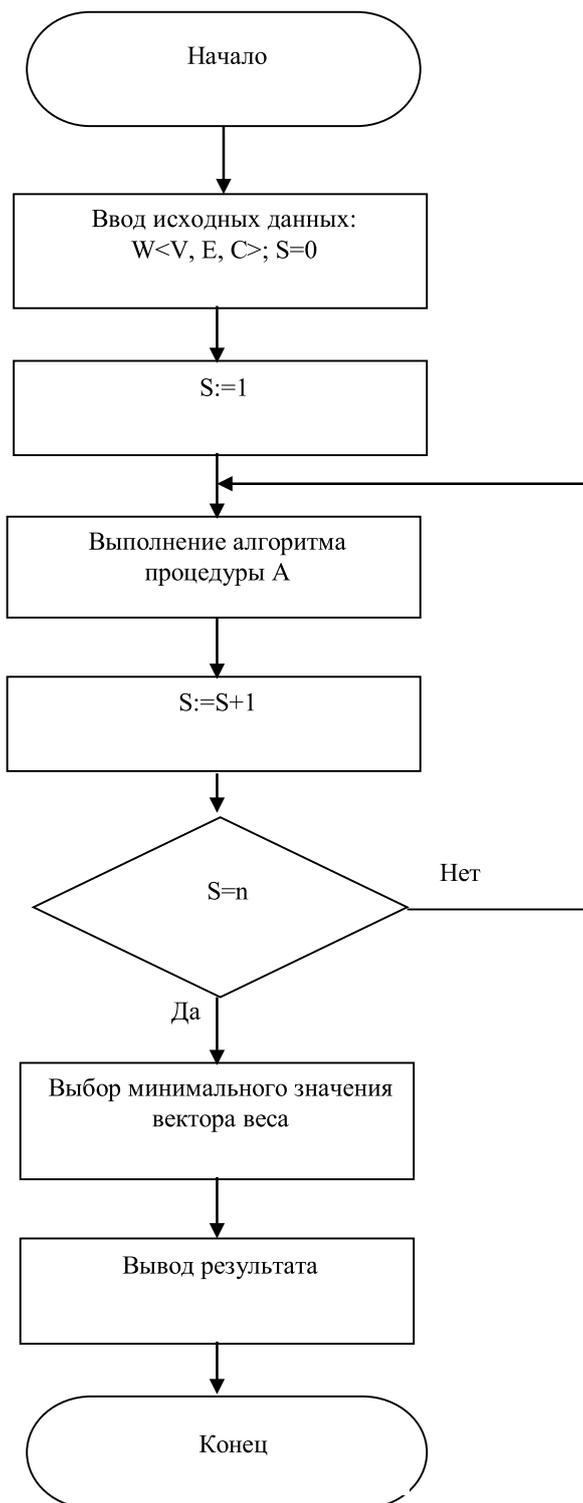


Рис. 5. Схема алгоритма ПКГП.

***Результаты экспериментального исследования разработанных алгоритмов***

Для получения аналитических результатов экспериментального исследования алгоритма решения задачи поиска кратчайшего гамильтонова пути разработана программная модель, реализованная в прикладной тестирующей программе с условным названием *Analizator*.

Прикладная тестирующая программа *Analizator* предназначена для проведения тестов разработанного алгоритма и обработки результатов тестирования. Исходя из основного назначения прикладной программы, предложено выделить три основных части программы, выполняющие функциональную нагрузку:

1. Область формирования исходных данных и настройки тестов;
2. Область анализа полученных результатов и их отображения на графиках;
3. Область отображения поранговых результатов тестирования и формирования записей в базе данных.

Использование указанных областей позволяет контролировать промежуточные значения реализации алгоритма, получать конечные результаты в виде графиков и таблиц базы данных. При этом дополнительно обеспечиваются следующие возможности:

- автоматический ввод расчетных данных;
- ручной ввод расчетных данных;
- отображение статистики;
- запись результатов в базу данных;
- простой и интуитивно доступный интерфейс.

При экспериментальном сравнении разработанных алгоритмов с известными веса ребер графа генерировались по равномерному закону распределения в диапазоне (0–50). Для получения среднего значения каждой точки графиков всех анализируемых характеристик решалось по 100 тестовых задач, все результаты статистического анализа получены с доверительной вероятностью 0.95. На всех рисунках разработанные алгоритмы  $A_1$  и  $A_2$  обозначены как метод 1 и метод 2.

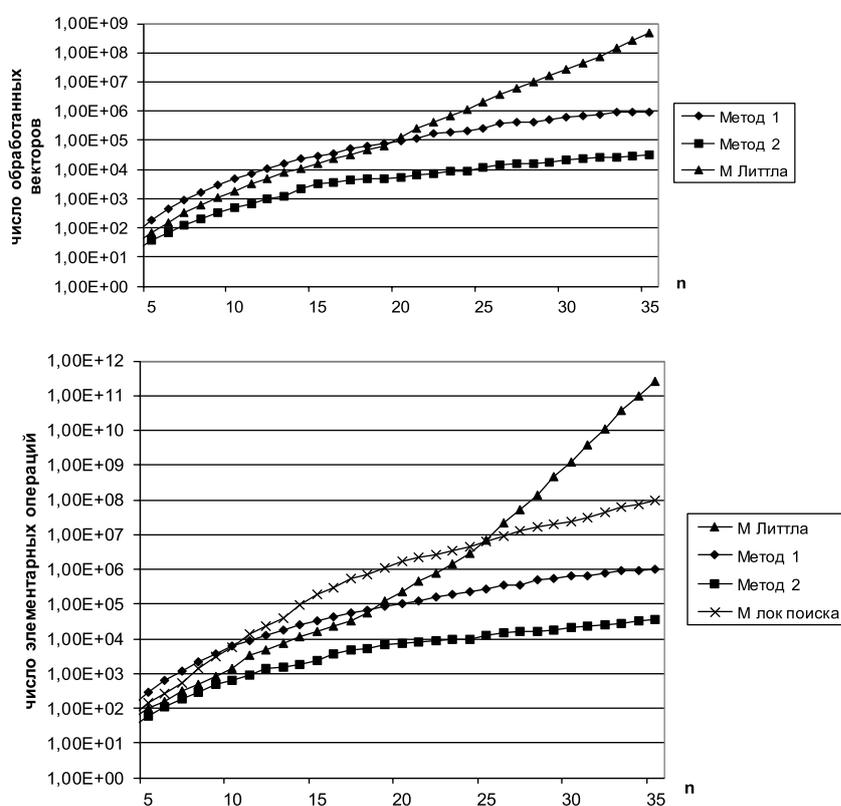


Рис. 6. Зависимости числа обрабатываемых векторов и элементарных операций от размерности решаемой задачи.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 6, при  $n \geq 27$  алгоритмы Литтла и локального поиска имеют существенно более высокую временную сложность по сравнению с разработанными.

При этом алгоритмы локального поиска имеют погрешность, лежащую в диапазоне от 5 до 27% и возрастающую с увеличением размерности решаемых задач. В то же время в разработанных алгоритмах на основе идей рангового подхода погрешность с увеличением размерности задачи стабилизируется и не превышает 2% (рис. 7).

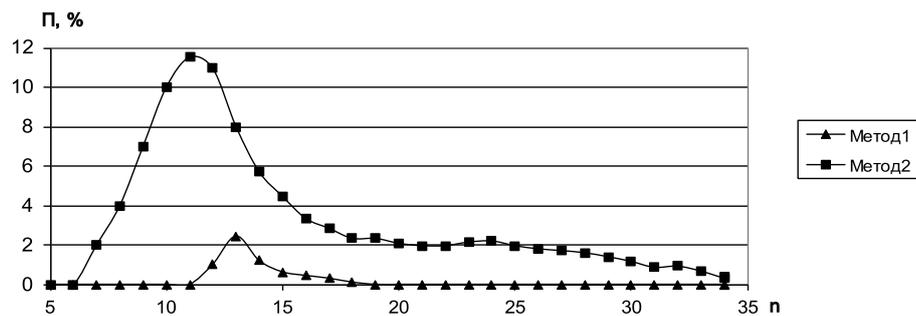


Рис. 7. Зависимость относительной погрешности от размерности решаемой задачи.

Из графиков, приведенных на рис. 8, видно, что процент неточных решений для алгоритма  $A_1$  при  $n \geq 27$  очень низок.

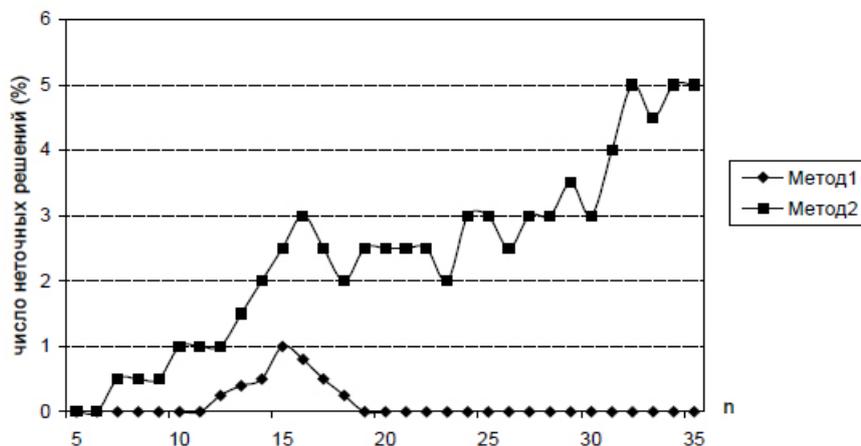


Рис. 8. Зависимость числа неточных решений (в процентах) от размерности решаемой задачи.

Экспериментальное исследование на 2000 тестовых задач показало, что при  $n \geq 27$  в среднем только 3 давали приближенное решение, при этом погрешность не превышала 1-2%. Использование эвристического правила в алгоритме  $A_2$  позволило существенно уменьшить временную сложность этого алгоритма по сравнению с  $A_1$ , но при этом возрастает погрешность и число неточных решений с увеличением размерности решаемой задачи (см. рис. 8).

### Заключение

Таким образом, предлагаемый способ решения задачи поиска кратчайшего гамильтонова пути может быть использован в сетевых базах данных для составления оптималь-

ных расписаний выполнения запросов к базам данных, как на этапах реорганизации, так и на этапах сопровождения функционирования СУБД. При этом предполагается существенное уменьшение времени на реализацию процедуры формирования очереди выполнения операций в запросах за счет уменьшения числа элементарных операций и числа обрабатываемых векторов в данной процедуре.

Из экспериментального исследования разработанного алгоритма решения задач поиска кратчайшего гамильтонова пути следует, что в большинстве случаев удается уменьшить временную сложность решения при незначительном увеличении вносимой погрешности.

### Литература:

1. Аббасов М.Э. Методы оптимизации: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во «ВВМ», 2014. 64 с.
2. Буй Д.Б., Скобелев В.Г. Модели, методы и алгоритмы оптимизации запросов в базах данных (обзор) // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2014. № 2 (66). С. 43–58. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs\\_2014\\_2\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2014_2_8)
3. Бердников В.П. Модифицированный алгоритм определения полных областей устойчивости нестационарных нелинейных систем // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 3. С. 39–53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-3-39-53>
4. Пастушков А.А., Батоврин В.К. Выбор решений при проектировании сложных систем на основе анализа вариантов со случайными весами // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 4. С. 78–88. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-78-88>
5. Горобец В.В. Облачная модель транзакционной системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 4. С. 19–24.
6. Мендкович Н.А., Кузнецов С.Д. Обзор развития методов лексической оптимизации запросов // Труды Института системного программирования РАН. 2012. Т. 23. С. 195–214. <https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2012-23-12>
7. Листровой С.В., Минухин С.В., Листровая Е.С. Разработка метода мониторинга распределенной вычислительной системы на основе определения кратчайших путей и кратчайших гамильтоновых циклов в графе // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 6. № 4 (78). С. 32–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56247>
8. Замбицкий Д.К., Лозовану Д.Д. Алгоритмы решения оптимизационных задач на сетях. Кишинев: Штиница, 1983. 116 с.
9. Фильгус Д.И., Андрианова Е.Г., Раев В.К. Развитие методов параллельных вычислений для фрагментации данных сетевой базы данных на основе рангового подхода // Cloud of Science. 2018. Т. 5. № 3. С. 532–550. URL: [https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS\\_5\\_532.pdf](https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_5_532.pdf)
10. Listrovoy S.V., Golubnichiy D.Y., Listrovaya E.S. Solution method on the basis of rank approach for integer linear programming problems with Boolean variables // Engineering Simulation. 1999. V. 16. № 6. P. 707–725.
11. Listrovoy S.V., Tretiak V.F., Listrovaya E.S. Parallel algorithms of calculation process optimization for the boolean programming problems // Engineering Simulation. 1999. V. 16. № 5. P. 569–579.
12. Федорин А.Н. Многокритериальные задачи ранцевого типа: разработка и сравнительный анализ алгоритмов: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2010. 132 с.
13. Лыфарь Д.А. Параллельные алгоритмы обработки реляционных баз данных // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2010. Т. 8. Вып. 4. С. 72–80. URL: <http://www.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/307>
14. Фраленко В.П., Агроник А.Ю. Средства, методы и алгоритмы эффективного распараллеливания вычислительной нагрузки в гетерогенных средах // Программные системы: теория и приложения. 2015. Т. 6. № 3(26). С. 73–92. <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2015-6-3-73-92>
15. Жуков В.С. Исследование методов оптимального размещения базы данных по узлам вычислительной сети // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2010. № 4 (10). С. 75–76.

### References:

1. Abbasov M. Optimization Methods. St. Petersburg: «VVM» Publ., 2014. 64 p., (in Russ.).
2. Buy D.B., Skobelev V.G. Models, methods and algorithms for query optimization in databases (a survey). *Радіоелектронні і комп'ютерні системи* [Radioelectronic and Computer Systems]. 2014; 2 (66):43-58 (in Russ.). [http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs\\_2014\\_2\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2014_2_8)
3. Berdnikov V.P. Modified algorithm for determination of full stability areas in nonstationary nonlinear systems. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2018; 6(3):39-53, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-3-39-53>

4. Pastushkov A.A., Batovrin V.K. Selection of solutions for designing open systems based on analysis of variants with random weights. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2018; 6(4):78-88, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-4-78-88/>
5. Gorobets V.V. Cloud model of on-line transaction processing system. *Vestnik komp'uternykh i informatsionnykh tekhnologii* [Herald of Computer and Information Technologies]. 2013; 4:19-24, (in Russ.).
6. Mendkovich N.A., Kuznetsov S.D. Overview of evolution of lexical query optimization techniques. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming RAS]. 2012; 23: 195-214, (in Russ.) <https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2012-23-12>
7. Listrovoy S.V., Minukhin S.V., Listrovaya E.S. Monitoring distributed computing systems on the basis of the determined shortest paths and shortest Hamiltonian cycles in a graph. *Eastern-European Journal of Enterprise technologies*. 2015; 6/4(78):32-4., (in Russ.). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56247>
8. Zambitsky D.K., Lozovanu D.D. Algorithms for solving optimization problems on networks. Chisinau: Shtinitsa Publ., 1983. 116 p., (in Russ.).
9. Filgus D.I., Andrianova E.G., Raev V.K. Development of parallel computing methods for fragmentation of network database data based on the rank approach. *Cloud of Science*. 2018; 5(3):532-559, (in Russ.). URL: [https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS\\_5\\_532.pdf](https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_5_532.pdf)
10. Listrovoy S.V., Golubnichiy D.Y., Listrovaya E.S. Solution Method for the linear programming problems with boolean variables. *Engineering Simulation*. 1999; 16(6): 707-725.
11. Listrovoy S.V., Tretiak V.F., Listrovaya E.S. Parallel algorithms of calculation process optimization for the boolean programming problems. *Engineering Simulation*. 1999; 16(5):569-579.
12. Fedorin A.N. Multi-criteria tasks of the backpack type: development and comparative analysis of algorithms: dis. ... Cand. of Sci. (Engineering). N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2010. 132 p., (in Russ.).
13. Lyfar D.A. Parallel GPU algorithms of relational databases processing. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii* [Herald of NSU. Series: Information Technologies]. 2010; 8(4):72-80, (in Russ.). URI: <http://www.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/307>
14. Fralenko V.P., Agronik A.Yu. Tools, methods and algorithms for efficient parallelization of computational loading in heterogeneous environments. *Programmye sistemy: teoriya i primeneniye* [Program Systems: Theory and Applications]. 2015; 6(3(26)):73-92, (in Russ.). <https://doi.org/10.25209/2079-3316-2015-6-3-73-92>
15. Zhukov V.S. Study of methods for optimal placement of a database on nodes of a computer network. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2010; 4(10):75-76, (in Russ.).

#### **Об авторах:**

**Андреанова Елена Гельевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры корпоративных информационных систем Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78). Scopus author ID 57200555430, ResearcherID T-7908-2018, <https://orcid.org/0000-0001-6418-6797>

**Раев Вячеслав Константинович**, доктор технических наук, профессор кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78).

**Фильгус Дмитрий Игоревич**, аспирант кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0001-6984-2933>

#### **About the authors:**

**Elena G. Andrianova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Chair of Corporate Information Systems, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus author ID 57200555430, ResearcherID T-7908-2018, <https://orcid.org/0000-0001-6418-6797>

**Vyacheslav K. Raev**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Chair of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Dmitry I. Filgus**, Postgraduate Student of the Chair of Instrumental and Applied Software, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0001-6984-2933>

**Для цитирования:** Андреанова Е.Г., Раев В.К., Фильгус Д.И. Определение кратчайших гамильтоновых путей в произвольных графах распределенных баз данных // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 7–20. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-7-20>

**For citation:** Andrianova E.G., Raev V.R., Filgus D.I. Determination of the shortest Hamiltonian paths in an arbitrary graph of distributed databases. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):7-20, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-7-20>

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-21-30>



УДК 621.311.6:621.3.089.2

## Информационная безопасность ребенка в цифровом пространстве Российской Федерации

**С.С. Дубов<sup>@</sup>,**  
**В.В. Линьков,**  
**М.А. Карбаинова**

*Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва 105064, Россия*

*<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: Dubovss@gmail.com*

В наше время стремительного развития социальных ресурсов интернет-технологий резко увеличивается количество пользователей всех возрастов, которые являются активными потребителями различного, в том числе и деструктивного, контента. Бурное развитие такого рода технологий порождает все новые и новые угрозы. Совершенствуются технологии информационных атак, направленных не только на программно-аппаратные платформы, но и непосредственно на пользователей информационных продуктов, распространяемых в среде Интернет. Изменяются инструменты информационного и психологического воздействия на пользователей Интернета. Различного рода мошенники и преступники в своей противоправной деятельности ищут и находят потенциальные «жертвы» в цифровой глобальной среде. Одной из самых уязвимых возрастных групп являются дети и подростки. Поэтому наиболее остро стоит вопрос о защите ребенка, «живущего» в такой среде. Настоящая статья посвящена проблеме обеспечения информационной безопасности детей и подростков в нашей стране в условиях формирования глобального информационного общества. Отражено основное противоречие существования и поведения ребенка в новом цифровом пространстве. Оно выражается в том, что, с одной стороны, виртуальная социальная активность ребенка – это залог его развития и процветания в будущем, а, с другой стороны, он подвергается рискам воздействия через неконтролируемые коммуникации и возможности открытого доступа к запрещенному контенту, которые в совокупности несут угрозы его психическому здоровью и благополучию. Сформулированы и проанализированы основные угрозы информационной безопасности ребенка в цифровом пространстве Российской Федерации. Даны предложения по созданию средств защиты подрастающего поколения от нового типа информационно-психологических угроз.

**Ключевые слова:** ИТ-образование, средства обеспечения информационной безопасности, социальная инженерия, взлом, аудит, уязвимости, защита.

## Child's Information Security in Digital Space of the Russian Federation

**Sergey S. Dubov<sup>@</sup>,**  
**Valeriy V. Linkov,**  
**Mariya A. Karbainova**

*Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow 105064, Russia*  
*@Corresponding author e-mail: sDubovss@gmail.com*

Our time is the time of rapid technological development. The Internet is becoming available to everyone, and it is expanding its influence in various fields. In addition, the number of users who are using the Internet and who are active consumers of different content is increasing. But the rapid development of technology has created new security problems. New types of threats are emerging, attack techniques are improving. Criminals are now trying to find their «victim» not only in the real world, but also in the digital world. So, today special attention is given to the issue of ensuring the user's information security and user's security in the digital world. One of the most vulnerable age groups are children. That is why one of the most important issues is the issue of protecting a child in such an environment. This article is devoted to the problem of information security of children and adolescents in our country. The article describes the main problem of the child in such an environment. On one hand, the virtual activity of the child is the key to its successful education. But, on the other hand, there are risks and problems in the digital world, such as access to prohibited content, that can cause harm to the mental health of a child. This article describes vulnerabilities in the information environment of students and educational institutions, as well as ways to counter the described vulnerabilities.

**Keywords:** IT education, information security tools, social engineering, hacking, auditing, vulnerabilities, protection, countering violations.

Хочешь победить врага, воспитай его детей.  
*Восточная мудрость*

### Введение

**В**о время формирования глобального информационного общества всеобщей компьютеризации и виртуализации, а также активного внедрения инструментов цифровой экономики во все аспекты жизни населения развитых стран как никогда остро встает вопрос обеспечения безопасности личных данных пользователей от компьютерных атак, а также самих пользователей от деструктивных информационно-психологических воздействий. По данным аналитического агентства WeAreSocial и крупнейшей SMM-платформы Hootsuite, представленном в отчетах о глобальном цифровом рынке GlobalDigital 2018<sup>1</sup>, сегодня во всем мире Интернетом пользуются более 4 млрд человек. Одним из ключевых факторов роста интернет-аудитории стали доступные смартфоны и недорогие тарифы на мобильный Интернет. Теперь две трети из 7.6 млрд мирового населения имеют мобильные телефоны. Более половины из используемых сегодня мобильных устройств относятся к классу «умных», поэтому людям стано-

<sup>1</sup><https://www.web-canape.ru/business/internet-2017-2018-v-mire-i-v-rossii-snatistika-i-trendy/>

вится все проще получить доступ ко всем возможностям, которые предлагает Интернет, где бы они не находились. Значительный рост происходит и в аудитории социальных сетей. За последние 12 месяцев количество людей на самых популярных социальных площадках увеличивалось ежедневно почти на 0.1 млн новых пользователей. Каждый месяц с соцсетями взаимодействуют более 3 млрд человек, при этом 9 из 10 – через мобильные устройства. По данным, приведенным в вышеуказанном отчете, почти половина (47%) населения России зарегистрирована в соцсетях и активно ими пользуется. 55.9 млн человек попадают туда с мобильных устройств. Среднестатистический россиянин проводит в соцсетях значительное количество времени – 2 часа 19 минут в сутки, а в Интернете – почти 6.5 часов в сутки. Стоит также отметить, что 85% россиян выходят в Интернет каждый день.

К сожалению, данные о процентном содержании возрастных групп в таком бурно растущем информационном обмене практически отсутствуют. Однако можно гарантированно утверждать, что подавляющее большинство школьников и подростковой молодежи имеют доступ к этим ресурсам и практически «живут» в глобальном виртуальном пространстве. К этому контингенту, не без участия родителей, активно подключаются и дети старших групп детского возраста.

Механизмы глобальной визуализации, созданные маркетологами, графическими дизайнерами и визуальными инженерами в «умных» устройствах, позволяют снизить требования к квалификации своих пользователей настолько, что даже дети, еще не умеющие читать и писать, уже могут просматривать, передавать и даже размещать в Интернете фотографии и видеозаписи.

Масштабное профессиональное исследование вопросов, связанных с использованием Интернет-ресурсов детьми, было проведено компанией RUметрика<sup>2</sup>. Главными критериями анализа полученных данных, положенных в основу выводов, стали статистические показатели, виды доступа в Интернет (самостоятельно или под надзором родителей), а также анализ доступного материала, содержащего запрещенные элементы. В результате исследования сделаны некоторые выводы, в частности, статистика указывает на почти девятимиллионную детскую аудиторию Интернета, причем учтены только дети младше 14 лет, из которых три четверти пользуются Интернет-ресурсами без контроля со стороны родителей. Среди всей детской аудитории есть пользователи младше пяти лет, причем порядка 90% из них просматривают сайты под присмотром старших либо совместно с родителями; около 40% детей посещают сайты, где размещены порнографические материалы; примерно 20% детей просматривали в Интернете видео, содержащее сцены насилия и другие нежелательные материалы. Только половина детей не встречала в сети ссылок или ресурсов, содержание которых не предназначено для просмотра детям.

Защита детей и подростков от новых информационных угроз является неотъемлемой составляющей системы обеспечения информационной безопасности в Российской Федерации. Согласно действующей Доктрине информационной безопасности, принятой в России [1], под информационной безопасностью понимают состояние защищенности личности, общества и государства от внутренних и внешних информационных угроз, при котором обеспечиваются реализация конституционных прав и свобод человека и гражданина, достойные качество и уровень жизни граждан, суверенитет, территориальная целостность и устойчивое социально-экономическое развитие Российской Федерации, оборона

<sup>2</sup>[https://studylib.ru/doc/866969/masshtabnoe-professional.\\_noe-issledovanie-voprosov--svyazan...](https://studylib.ru/doc/866969/masshtabnoe-professional._noe-issledovanie-voprosov--svyazan...)

и безопасность государства. Постулируя, что ребенок – это личность, член общества и гражданин, обладающий определенными правами и обязанностями (хотя и неполными до достижения возраста дееспособности), мы принимаем и интересы ребенка в информационной сфере как объект защиты. Кроме того, никто не станет спорить с истиной, что дети – наше будущее. Закладывая основы информационной безопасности на уровне информационных интересов детей, мы формируем стратегию информационной безопасности России [2].

Достижению этой важной задачи служит и подписанный совсем недавно Федеральный закон от 01.05.2019 № 93-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» и отдельные законодательные акты Российской Федерации». Закон регулирует отношения, связанные с защитой детей от информации, причиняющей вред их здоровью и (или) развитию, в том числе от такой информации, содержащейся в информационной продукции. В Законе, в том числе, определен порядок реализации запрета на распространение среди детей информации, содержащей изображение или описание сексуального насилия<sup>3</sup>.

### Постановка проблемы

С приходом интернет-технологий в повседневную жизнь людей появились не только новые возможности, но и новые угрозы. С одной стороны, виртуальная социальная активность ребенка – это залог его развития и процветания в будущем, с другой стороны, появились риски использования им неконтролируемых коммуникаций и доступа к запрещенному контенту, которые угрожают его психическому здоровью и благополучию.

### Обзор социальных уязвимостей школьника

Сегодня размещение информации о себе в сети не представляет никакой сложности: это можно сделать с компьютера, смартфона и других гаджетов, которые появляются у детей с раннего возраста. Однако дети они не всегда понимают, что можно, а что нельзя выкладывать в сеть, какие это несет последствия – в этом проблема. Уже сформировалось такое понятие, как цифровая репутация. Данное понятие применимо к юридическим и физическим лицам и отражает их деятельность в сети Интернет. Цифровая репутация играет важную роль в жизни человека. Корректно представленная позитивная информация дает преимущества и расширяет возможности. Благодаря грамотно созданному профилю в интернет-пространстве, можно достигнуть успеха в своей деятельности, найти единомышленников, партнеров, работодателей. Подростковая молодежь – особенно – находит таким образом возможность самовыражения через виртуальный мир, не находя понимания в мире реальном.

Многие пользователи используют социальные сети для передачи различной информации, в том числе, передают информацию, представляющую врачебную тайну, пароли, сведения о доходах и имуществе семьи, планируемых поездках и увлечениях. И такая информация, в зависимости от целей и намерений тех, кто получил к ней доступ, может быть использована по-разному. Стоит отметить факт того, что информация, попавшая в Интернет, остается там навсегда: «...копии информации делаются на множество сервер-

---

<sup>3</sup><https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc72135250/>

ров. История ваших действий – также пишется и протоколируется» [3].

Если человек намеренно оставляет информацию о себе в сети Интернет, то найти ее не сложно: для этого даже есть специальные программные сервисы, например, Яндекс. Люди, SocialMention и др. Во Всемирной паутине есть особые категории пользователей, которые собирают информацию о субъекте для совершения мошеннических действий. И чем больше данных о субъекте они смогут найти в интернет-пространстве, тем более широкий спектр мошеннических действий они смогут реализовать.

Подрастающему поколению важно понимать, что количество персональной информации о себе в интернет-пространстве стоит ограничить, чтобы не стать потенциальной жертвой злоумышленника. Возможностью для атаки могут послужить: фотографии дорогих приобретений, видео с близкими людьми, паспортные данные, адрес места жительства или регистрации, семейное положение, образование, сведения о доходах, номера мобильных телефонов друзей и родственников и т. п. Получив доступ к такого рода информации, злоумышленник может использовать ее не только против конкретного человека (ребенка), но и против его близких.

То, что происходит в сети, комментарии в адрес ребенка, подростка, так или иначе оказывают на него сильное социальное влияние, так как в школьном возрасте формируются сознание, мировоззрение, нравственные аспекты личности взрослого человека. В преобладающей степени это зависит от социальных составляющих, однако, не только от ближайшего окружения, но и глобального социально-культурного влияния.

Сейчас интернет-сервисы являются основным поставщиком информации, способом досуга. Важно понимать риски интернет-пространства: продолжительное пользование Интернетом несет вред физическому здоровью и психическому сознанию человека, особенно ребенка. Оно обусловлено контентом, который не предназначен для той или иной категории пользователей.

Вот несколько серьезных рисков злоупотребления использованием Интернетом:

- риск быть вовлеченным в секты, терроризм;
- доступ к материалам, повышающим риск подросткового суицида;
- искажение нравственных ценностей на основе увиденного контента;
- нанесение вреда физическому здоровью.

Действительно, в условиях формирования глобального информационного общества и, соответственно, создания сферы глобального информационного противоборства основными объектами интересов распространителей идеологии терроризма и экстремизма является массовое и индивидуальное сознание подростков и молодежи. Информационное воздействие осуществляется как на фоне информационного шума существующих и создаваемых технологий «BigData», так и в условиях информационного вакуума (внедрение измененных моральных ценностей). Совершенствуются практики внедрения психокомпьютерных технологий в социальные ресурсы Интернета с целью навязывания чуждых целей, вербовки адептов экстремистских идей, навязывания культа силы и безнаказанности. Побуждающей мотивацией инициаторов в качестве целеуказания при работе с массовыми молодежными аудиториями являются жажда власти и материального обогащения, а путями достижения целей – новые компьютерные технологии информационно-психологического воздействия на формирующиеся «малые миры», сообщества

юных пользователей социальных ресурсов по интересам.

Социальные сети – это еще один аспект Всемирной паутины, в которых присутствуют риски, связанные с общением, начиная от рекламы платных подписок до общения с посторонними, которые нередко присылают контент порнографического содержания или пропагандируют материалы, повышающие риск подросткового суицида. Массовую привязанность школьников к социальным сетям «ВКонтакте», «Facebook», «Одноклассники» можно объяснить наличием массы удобных сервисов так называемого «социального софта» [4]. Но отсутствие цензуры и безнаказанность зачастую приводят к неприятным, а порой и трагичным, инцидентам. Такие сети снабжены системами современной контекстной рекламы, с использованием которых можно без труда навязывать молодежи чуждые мысли и идеи и делать это максимально эффективно (распределение рекламы по целевым аудиториям: возраст, место жительства, учебы и др.). Крупные игроки рекламной сферы готовы раскрутить любую идею, не задумываясь о моральной составляющей [5]. Так, в рекламу внедряются не только порнография, но и пропаганда алкоголя, а также игры, провоцирующие насилие.

Запуская новые социально-ориентированные проекты в социальных ресурсах, которые интересны школьникам, инициаторы стремятся достичь максимального психологического воздействия на неустойчивую психику подростков, зачастую используя молодежный сленг, ненормативную лексику, скрытые и явные призывы к расизму, ксенофобии и национальной нетерпимости.

Когда ребенок погружается в общение в цифровом пространстве, то не задумывается о том, кто сидит по ту сторону экрана. При общении он использует ассоциативное мышление, что может быть крайне опасно. Большинство профессиональных мошенников и манипуляторов сознания обладают навыками социальной инженерии. Самый простой объект их «охоты» – ребенок, ведь к нему так просто войти в доверие. Существует множество случаев, в которых дети подвергаются социальному насилию. Грамотный социальный инженер может за небольшой промежуток времени довести ребенка до неуравновешенного состояния, после которого может произойти что-либо – от суицидов и преступлений до вымогательства, социальной изоляции не только в виртуальной, но и в реальной среде.

Закулисные специалисты и их публичные представители целенаправленно воспитывают российскую молодежь в деструктивном ключе. Они разрабатывают и реализуют «увлекательные» методики, специально рассчитанные их «педагогами» и «психологами» для незрелых умов и бурлящих чувств. Социотехнологии антигуманного характера оттачиваются на участниках молодежных «клубов самоубийц» в социальных сетях. Таким образом отрабатываются инструменты «расчеловечивания» молодого поколения, превращения его в слепое орудие чужой воли [6-9].

### **Невозможность контролировать виртуальные контакты ребенка**

Если в реальной жизни мы можем запретить ребенку разговаривать с незнакомцами, то в виртуальной среде взрослый человек достаточно легко может замаскироваться. Регулирование круга общения ребенка в виртуальной среде для многих родителей является сложной, а порой и невыполнимой задачей, а если родители не следят за кругом общения

ребенка, он может не только попасть под плохое влияние, но и быть ввязан в политические дискуссии, завербован или психически сломлен.

Пока в образовании и в обществе в целом наблюдается «воспитательный вакуум», его заполняют весьма сомнительные, а зачастую и, несомненно, вредные «источники». Это «чернушные» кинофильмы, «рэп-культура», терпимость к «легким наркотикам», к половой неразборчивости, «европейская» мода на «унисекс». В компьютерном мире это социал-дарвинистские компьютерные игры-«стрелялки» и сектантские группы в социальных сетях. В качестве примера можно привести онлайн-игры. Ключевая опасность в них заключается именно в социальной части игр. В эти игры играют разные люди, из разных стран мира, в том числе и злоумышленники, и каждый из них может напрямую поговорить с ребенком.

Серьезную опасность для детей таит Даркнет (Darknet) – скрытая сеть интернет-соединений. Для одних – это зашифрованный мир скрытых сервисов Tor, в котором нельзя вычислить пользователей, для других – это те сайты, которые не индексируются обычными поисковыми системами: таинственные дебри запароленных веб-ресурсов, не связанных друг с другом страниц и скрытого контента, доступного только «своим», для кого-то – это просто общее понятие, под которым подразумевается вся та бездна шокирующих, пугающих и провокационных уголков Интернета, где обитают воображаемые преступники и злодеи всех мастей и калибров. Гораздо важнее суть данного явления: это не просто подполье, изолированное от привычного нам Интернета, и при том все же являющееся его частью, царством полной свободы и анонимности, где пользователи говорят и думают то, что им нравится, без цензуры, без правил, без общественных рамок. Эта реальность, столь же шокирующая и пугающая, сколь и прогрессивная, и творческая, и она гораздо ближе к нам, чем мы думаем.

Даркнет редко сходит с новостных заголовков – молодые люди выкладывают любительскую порнографию, кибербуллеры (люди, насмешками и угрозами пугающие или унижающие человека) и тролли досаждают незнакомым людям, политические экстремисты занимаются пропагандой, контрабанда, наркотики и секретные документы можно купить в один-два клика – все эти рассказы каждый день мелькают на первых полосах. Но как ни странно, этот мир практически не изведен и непонятен большинству из нас. Немногие решались погрузиться в глубины Интернета и хоть одним глазком поглядеть на эти сайты [10].

Эта неизвестность сильно привлекает подростков, но из-за чересчур открытого информационного пространства и весьма простого доступа к любым данным, все найденное в Даркнете становится свободно от норм и правил. Это большая опасность даже для взрослого человека, а для подростка данная доступность может оказаться критической. Подростковая психика может не выдержать порцию очередного контента, подросток может потерять связь с реальностью и, сам того не подозревая, стать оружием в руках профессиональных вербовщиков Даркнета [11].

В связи с геометрическим ростом количества пользователей, их потребностей и возможностей в цифровом пространстве появилась потребность и в их защите.

### **Защита ребенка в цифровом пространстве**

Детские психологи выделяют главный метод защиты ребенка от социальных угроз – общение с ребенком. Общаться с ребенком нужно все время, причем и в реальном, и в

виртуальном пространстве. Необходимо стать не только его родителем, но и его старшим другом, который сможет не только объяснить ребенку, что ему делать, но и понять его психологию и, следовательно, его слабости. Только родитель сможет оградить ребенка от опасности как в реальной, так и в виртуальной жизни. Однако в настоящее время многие родители не имеют навыков для обеспечения контроля поведения ребенка в цифровом пространстве.

В связи с этим предлагается создать инструмент, позволяющий контролировать социальную активность ребенка, размещаемую и просматриваемую им информацию в сети Интернет. Этот инструмент может быть построен по принципу DLP-систем: учитывать частоту, время использования гаджета, анализировать содержание просматриваемого контента, идентифицировать контакты, просматривать входящие и исходящие SMS, отслеживать интернет-трафик, геолокацию телефона и др. Архитектура такого инструмента должна быть построена на модели клиент–сервер (клиент – это гаджет ребенка, сервер – это гаджет родителя). Инструмент должен иметь возможность установки на любую платформу и отвечать системным требованиям устройств родителей и детей. У родителей должен быть способ изменять и дополнять базы данных с разрешенным и запрещенным контентом, опираясь на статистику активности ребенка, будь то игры, чаты, звонки, время использования гаджета на различных ресурсах и т. д. Оповещение и контроль над действиями ребенка могут осуществляться как через SMS-оповещения, так и через онлайн-мониторинг в приложении. SMS-оповещения могут быть полезны для своевременного реагирования, когда устройство родителя находится в офлайн-режиме.

Подобный инструмент контроля должен быть скрыт от ребенка, так как в большинстве случаев дети негативно реагируют на запреты и ограничения. Этот инструмент позволит, кроме того, родителям, страдающим цифровой безграмотностью, «не упустить» ребенка, защитить его и помогать активно развиваться в слабо доступной для родителей среде, проводя комплексный воспитательный процесс. Ведь «лучший способ защиты детей – правильное воспитание» [12].

### Выводы

Негативные информационные воздействия для современных школьников, осуществляемые посредством доступных интернет-сервисов и мобильных платформ, к сожалению, начинают играть роль основного воспитателя. Разрабатываемая система мониторинга социальной активности ребенка, размещаемой и просматриваемой им информации в сети Интернет должна укрепить связь с родителями, защитить учащихся от негативных информационно-психологических воздействий и противодействовать им.

### Литература:

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 г. № 646. URL: <https://rg.ru/2016/12/06/doktrina-infobezobasnost-site-dok.html> (дата обращения: 15.06.2019).
2. Шпагина Е.М. Информационная безопасность в контексте защиты прав детей в Российской Федерации [Электронный ресурс] // Психология и право. 2016. Т. 6. № 4. С. 86–94. <https://doi.org/10.17759/psylaw.2016060409>

3. Ли П. Архитектура интернета вещей: пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2018. 456 с. ISBN: 978-5-97060-672-8.
4. Грингард С. Интернет вещей. Будущее уже здесь. М.: Альпина Паблишер, 2016. 188 с.
5. Маркелов А. Openstack. Практическое знакомство с облачной операционной системой. М.: ДМК Пресс, 2018. 306 с. ISBN 978-5-97060-652-0.
6. Посыпкина Александра, Баленко Евгения. Профиль в цифрах: как будет работать база данных о россиянах в 2023 году. 2018 г. [Электронный ресурс] – [https://www.rbc.ru/technology\\_and\\_media/20/09/2018/5ba262ef9a7947c2ab193522](https://www.rbc.ru/technology_and_media/20/09/2018/5ba262ef9a7947c2ab193522) (дата обращения: 17.06.2019).
7. Хапаев Дмитрий. Как узнать, какие данные собирает о вас гугл... 2018 г. [Электронный ресурс] – <https://liferhacker.ru/slezhka-google/> (дата обращения 15.06.2019).
8. Защита детей от вредной информации в сети интернет [Электронный ресурс] – <http://www.internet-kontrol.ru/> (дата обращения: 10.06.2019).
9. Чернова Ирина. 15 фишек для сбора информации о человеке в интернете. 2016 г. [Электронный ресурс] – <https://www.iphones.ru/iNotes/533552> (дата обращения: 15.06.2019).
10. Бартлетт Д. Подпольный Интернет. Тёмная сторона мировой паутины. Сivilизация: пер. с англ. М.: Изд-во ЭКСМО, 2017. 352 с. ISBN: 978-5-699-85457-8.
11. Идалго С. Как информация управляет миром и определяет историю нашей вселенной и живущих в ней видов: Сivilизация: пер. с англ. М.: Изд-во ЭКСМО, 2016. 256 с. ISBN: 978-5-699-85453-0.
12. Игнатова Наталья. Ваш цифровой портрет в сети. 2015 г. [Электронный ресурс] – [https://geekbrains.ru/posts/digital\\_portrait](https://geekbrains.ru/posts/digital_portrait) (дата обращения: 11.06.2019).

## References:

1. Doctrine of Information Security of the Russian Federation (App. Decree of the President of the Russian Federation, December 5, 2016, no. 646) URL: <https://rg.ru/2016/12/06/doktrina-infobezobasnost-site-dok.html>. Accessed June 15, 2019 (in Russ.).
2. Shpagina E.M. Information security in the context of the protection of children's rights in the Russian Federation [Electronic resource]. *Psikhologiya i pravo* [Psychology and Law], 2016; 6(4):86-94. <http://dx.doi.org/10.17759/psylaw.2016060409> (in Russ.).
3. Lea P. Internet of Things for Architects. Packt Publishing, 2018.
4. Greengard S. The Internet of Things. Moscow: Alpina Publisher, 2016. 188 p., (in Russ.).
5. Markelov A. Openstack. Practical familiarity with the cloud operating system. Moscow: DMK Press Publ., 2018. 306 p., (in Russ.).
6. Posypkina A., Balenko E. Profile in Figures: How the Database of Russians Will Work in 2023. 2018. URL: [https://www.rbc.ru/technology\\_and\\_media/20/09/2018/5ba262ef9a7947c2ab193522](https://www.rbc.ru/technology_and_media/20/09/2018/5ba262ef9a7947c2ab193522). Accessed June 17, 2019 (in Russ.).
7. Khapaev D. How to Find out What Data Google Collects about You... 2018. URL: <https://liferhacker.ru/slezhka-google/>. Accessed June 15, 2019 (in Russ.).
8. Children' Protection from Harmful Information in the Internet. URL: <http://www.internet-kontrol.ru/>. Accessed June 10, 2019 (in Russ.).
9. Chernova I. 15 Pieces to Collect Information about a Person in the Internet. 2016. URL: <https://www.iphones.ru/iNotes/533552>. Accessed June 15, 2019 (in Russ.).
10. Bartlett D. The Dark Net: Inside the Digital Underworld. London: Melville House Publishing, 2015. 310 p. ISBN: 978-1-61219-489-9.
11. Hidalgo C. Why Information Grows: The Evolution of Order from Atoms to Economies. New York: Basic Books, 2015. ISBN 978-0465048991
12. Ignatova N. Your Digital Portrait Online. 2015. URL: [https://geekbrains.ru/posts/digital\\_portrait](https://geekbrains.ru/posts/digital_portrait). Accessed June 11, 2019 (in Russ.).

### Об авторах:

**Дубов Сергей Сергеевич**, кандидат технических наук, директор центра отраслевых мониторинговых систем и информационной безопасности, доцент кафедры информационно-измерительных систем Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) (Россия, 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4).

**Линьков Валерий Владимирович**, студент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), сетевой инженер Cisco по направлениям CCNA, CCNA Security, CCNA Cyber Ops, Инструктор сетевой академии Cisco «Learning Resource Center «Ramix» (Россия, 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4).

*Карбаинова Мария Александровна*, студент Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК) (Россия, 105064, Москва, Гороховский пер., д. 4).

**About the authors:**

*Sergei S. Dubov*, Cand. of Sci. (Engineering), Director of the Center for Sectoral Monitoring Systems and Information Security, Associate Professor, Chair of Information and Measuring Systems, Moscow State University of Geodesy and Cartography (МИИГАиК) (4, Gorokhovskii per., Moscow, 105064, Russia). E-mail: Dubovss@gmail.com.

*Valeriy V. Linkov*, Student of Moscow State University of Geodesy and Cartography (МИИГАиК), Network Cisco Engineer in CCNA, CCNA Security, CCNA Cyber Ops, Instructor of Cisco Academy «Learning Resources Center «Ramix» (4, Gorokhovskii per., Moscow, 105064, Russia).

*Mariya M. Karbainova*, Student of Moscow State University of Geodesy and Cartography (МИИГАиК) (4, Gorokhovskii per., Moscow, 105064, Russia).

**Для цитирования:** Дубов С.С., Линьков В.В., Карбаинова М.А. Информационная безопасность ребенка в цифровом пространстве Российской Федерации // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 21–30. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-21-30>

**For citation:** Dubov S.S., Linkov V.V., Karbainova M.A. Child's information security in digital space of the Russian Federation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):21-30, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-21-30>

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-31-43>



УДК 621.311.6:621.3.089.2

## Пульсации напряжения отрицательной полярности на выходе двухполярного DC–DC преобразователя LM27762 при близком к предельному входном напряжении

**В.К. Битюков,  
Н.Г. Михневич,  
В.А. Петров<sup>@</sup>**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*

*<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: vpetrov@mirea.ru*

Представлены результаты исследований работы инвертирующего DC–DC преобразователя с накачкой заряда и LDO, входящих в состав комбинированного двухполярного источника вторичного электропитания LM27762, в предельном режиме при входном напряжении 5.5 В и выходном напряжении –4.9 В. Измерялись пульсации напряжений при различных токах нагрузки от 10 до 250 мА на положительном полюсе летающего конденсатора, на выходе из системы накачки заряда и на выходе микросхемы. На основе полученной информации впервые показано, что при малых токах нагрузки примерно до 107 мА система накачки заряда работает в режиме пачек импульсов, а при токах выше 109 мА – в режиме накачки заряда с постоянной частотой. Результаты не подтверждают имеющееся в документации на микросхему сведения о том, что при предельном входном напряжении 5.5 В накачка заряда может войти в режим широтно-импульсной модуляции в горячих условиях. При работе в режиме пачек импульсов наличие LDO в микросхеме LM27762 уменьшает пульсации отрицательного напряжения на выходе, однако они значительно превышают значения, приведенные в документации на микросхему. При переходе в режим постоянной частоты уровень пульсаций отрицательного напряжения на выходе микросхемы резко уменьшается, однако при дальнейшем увеличении тока нагрузки увеличивается и превышает величины, приведенные в документации.

**Ключевые слова:** микросхема, DC–DC преобразователь, накачка заряда, инвертор, летающий конденсатор, LDO, режимы пачки импульсов и постоянной частоты.

## Negative Output Voltage Ripples of Bipolar DC-DC Converter LM27762 near Maximum Input Voltage

Vladimir K. Bityukov,  
Nikolay G. Mikhnevich,  
Vadim A. Petrov<sup>@</sup>

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: vapetrov@mirea.ru

The paper presents the results of studies of the operation of the inverting DC-DC converter with charge pump and LDO, which are part of the combined bipolar secondary power supply LM27762, at the near to maximum input voltage of 5.5 V and an output voltage of -4.9 V. The ripple voltages were measured at various load currents from 10 to 250 mA at the positive pole of the flying capacitor, at the output of the charge pump system and at the output of the microcircuit. It was shown for the first time on the basis of the obtained information that at low load currents up to about 107 mA the charge pump system operates in the burst mode, and at currents greater than 109 mA – in the charge pump mode with a constant frequency. The results do not confirm the information in the documentation on the microcircuit that, at the maximum input voltage of 5.5 V, the charge pump can enter the PWM mode in hot conditions. When working in burst mode, the presence of LDO in the LM27762 chip reduces the ripples of the negative voltage at the output. However, they significantly exceed the values given in the documentation on the chip. During switching to the constant-frequency mode, the level of negative voltage ripples at the output of the microcircuit decreases sharply, but it increases with further increase of the load current and exceeds the values given in the documentation.

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

### Введение

Двухполярное электропитание необходимо для многих мобильных устройств современной техники. К ним, в частности, относятся операционные усилители источников электропитания, различные устройства систем беспроводной связи, усилители наушников, электропитание интерфейсов и преобразователей данных, переносные измерительные приборы, причем в большинстве случаев первичным источником энергии являются литий-ионные батареи или перезаряжаемые аккумуляторы. Их напряжение изменяется, уменьшаясь в процессе эксплуатации. Для создания источников электропитания со стабильным выходным напряжением используются микросхемы вторичных DC-DC преобразователей. Основными требованиями, предъявляемыми к таким преобразователям, являются стабильность выходного напряжения и малая величина его пульсаций, а также высокие значения КПД при работе в различных режимах. Одним из видов микросхем, обеспечивающих получение стабилизированного напряжения положительной или отрицательной полярности, являются микросхемы с накачкой заряда. Большинство производителей электронных компонентов предлагает микросхемы, предназначенные для построения либо повышающих, либо понижающих, либо полярно-инвертирующих

преобразователей. И лишь небольшое число микросхем может использоваться для получения регулируемого однополярного стабилизированного напряжения как в режиме понижения, так и в режиме повышения входного напряжения. Анализ работы подобных микросхем представлен в [1–3]. Основными недостатками разработанных в начале 2000-х годов и выпускаемых вплоть до настоящего времени микросхем, использующих классическую технологию накачки заряда, являются достаточно большая величина пульсаций выходного напряжения, обычно составляющая 20...40 мВ, и значительное уменьшение КПД при отклонениях соотношений между входным и выходным напряжением от оптимальных.

Микросхемы двухполярных DC–DC преобразователей, в которых используется накачка заряда, появились совсем недавно. Вероятно, первой из них была микросхема LTC3260 (Linear Technology) [4]. Эта микросхема является комбинированной. Отрицательное напряжение вырабатывает инвертор с накачкой заряда, за которым следует LDO (low dropout linear regulator - 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 импульсов.

По-видимому, самой новой разработкой двухполярного комбинированного источника электропитания, в котором используется накачка заряда, является микросхема LM27762 (Texas Instruments) [5], исследованная в настоящей работе.

### Объект и методика исследований

В соответствии с [5], LM27762 может вырабатывать напряжение положительной и отрицательной полярности, величины которых в диапазонах от  $\pm 1.5$  до  $\pm 5.0$  В могут устанавливаться отдельно с помощью необходимых резисторов в цепях обратной связи выходных напряжений LDO. Диапазон входного напряжения от 2.7 до 5.5 В. Выходные токи не должны превышать  $\pm 250$  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, имеющаяся в [5], показана на рис. 1. Из этого рисунка видно, что в верхней части блок-схемы представлена инвертирующая накачка заряда с использованием внешнего летающего конденсатора (выводы C1+ и C1–). Ниже показан LDO, выходом которого является напряжение отрицательной полярности. Выходное напряжение положительной полярности без накачки заряда создается с помощью LDO, показанного в средней части блок-схемы.

LM27762 имеет также 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. К сожалению, имеющееся в [5] описание блок-схемы очень краткое, и по нему трудно представить алгоритм ее работы.

Использованный в LM27762 принцип работы системы накачки заряда с инвертированием напряжения показан на рис. 2.

**Пульсации напряжения отрицательной полярности на выходе двухполярного DC-DC преобразователя LM27762 при близком к предельному входном напряжении**

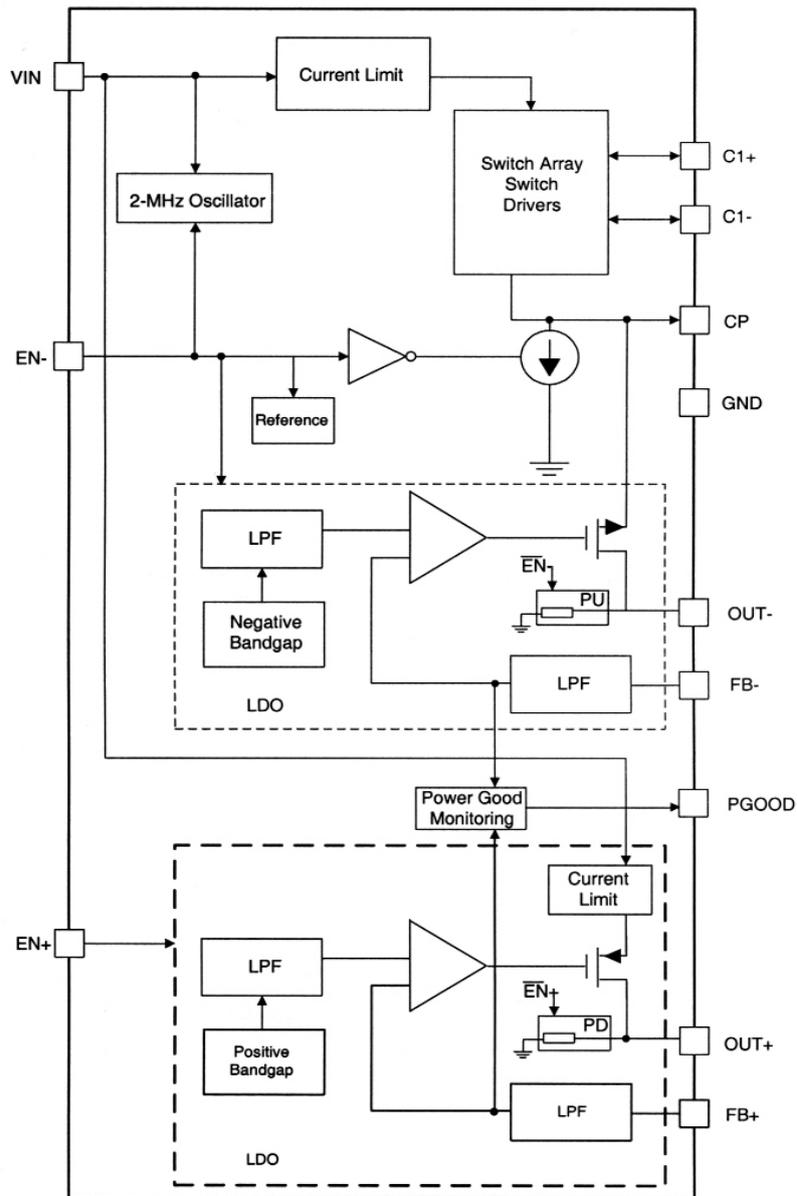


Рис. 1. Блок-схема LM27762 [5].

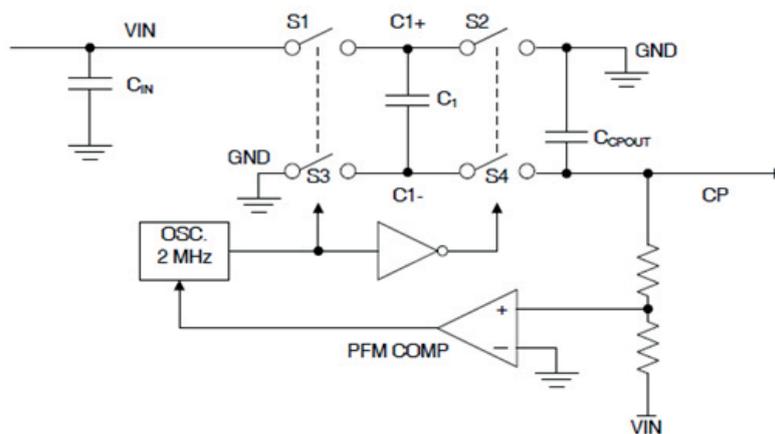


Рис. 2. Принцип инвертирования напряжения [5].

Схема инвертора имеет три внешних конденсатора – входной  $C_{IN}$ , летающий  $C_1$ , и стоящий перед LDO конденсатор  $C_{CPOUT}$  иногда обозначаемый в [5] как  $C_{cp}$ . Инvertируемое 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  $C_{CPOUT}$ . Цикл переноса состоит из двух стадий. В первой происходит заряд летающего конденсатора  $C_1$  от входного напряжения на  $C_{IN}$  при замыкании ключей  $S1$  и  $S3$ , во второй происходит перенос заряда от  $C_1$  к  $C_{CPOUT}$  при замыкании ключей  $S2$  и  $S4$ . Поскольку при этом положительный полюс  $C_{CPOUT}$  подсоединен к земле, напряжение на его отрицательном полюсе, близкое к значению  $-V_{IN}$ , подается на выход и на систему регулирования через цепь обратной связи. Алгоритм работы системы регулирования и компаратора частотно-импульсной модуляции (PFM COMP) в [5] не описан.

К сожалению, приводимые в [5] 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 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 до 4.1 В слегка увеличиваются от 1.2 до 1.3 мВ. Эта информация по пульсациям выходного напряжения явно недостаточна для того, чтобы судить о пульсациях отрицательного напряжения на выходе микросхемы в различных режимах. В связи с тем, что в примечании (1) к таблице электрических характеристик, имеющейся в [5], было отмечено, что при входном напряжении 5.5 В накачка заряда может входить «в горячих условиях» в режим широтно-импульсной модуляции (ШИМ, PWM mode), целью настоящей работы было детальное исследование работы микросхемы при предельном значении входного напряжения 5.5 В в широком диапазоне изменения токов нагрузки от 10 до 250 мА.

Весьма важным при проведении таких исследований стала возможность получения от производителя LM27762 готовой тестовой платы – тестового модуля LM27762EVM [6]. Принципиальная электрическая схема этого модуля показана на рис. 3. Там же показано размещение контрольных точек для подключения измерительных приборов.

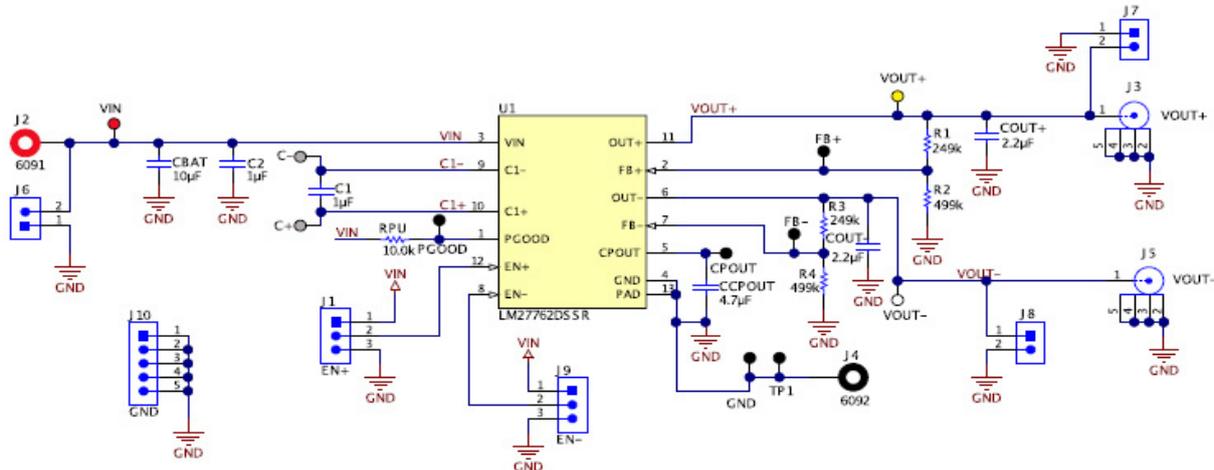


Рис. 3. Схема платы модуля LM27762EVM [6].

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– равно 1.8 В.

В настоящей работе предельный режим был реализован при входном напряжении 5.5 В и выходном напряжении –4.9 В. Это было осуществлено путем замены резисторов R2 и R4 на резисторы величиной 82 кОм, рассчитанной в соответствии с рекомендацией [5].

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. Для изучения этих причин использовались измерения временных зависимостей напряжения на положительном  $U_{flyDC+}$  полюсе летающего конденсатора  $C_1$  емкостью 1 мкФ при открытом входе осциллографа и переменные составляющие напряжения на выходе из системы регулирования на конденсаторе  $C_{CPOUT}$  емкостью 4.7 мкФ  $U_{out-}$  и на выходе микросхемы  $V_{out-}$  (рис. 2 и 3) при закрытом входе осциллографа.

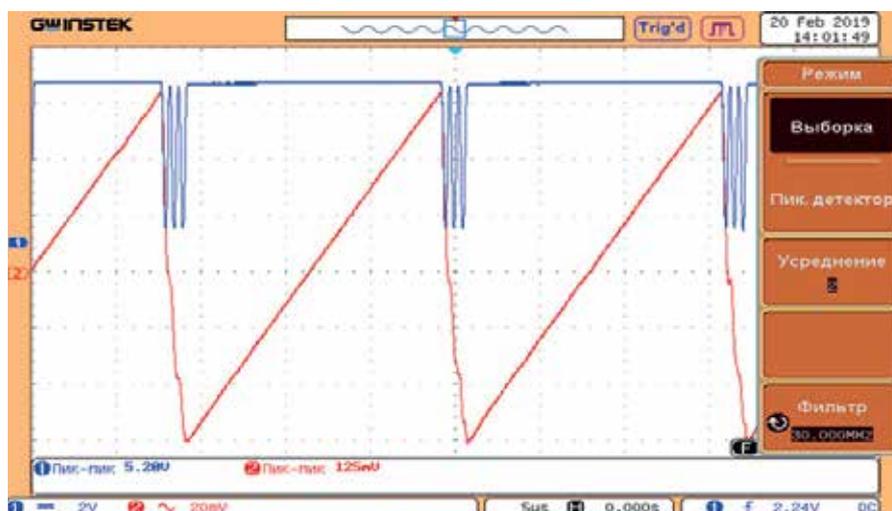
Формы напряжений регистрировались осциллографом GDS-72202 компании GW instek с использованием программного обеспечения FreeWave. В качестве триггера обычно использовалось напряжение  $U_{flyDC+}$ . Для обеспечения высокого качества регистрации сигналов использовались имеющиеся в осциллографе GDS-72202 возможности цифровой фильтрации и однократного запуска.

### Результаты измерений

На рис. 4 и 5 показаны результаты измерений для режима, в котором ток нагрузки составлял 10 мА.

В левом поле рисунков показаны нулевые уровни сигналов. Здесь и далее сигналы, обозначенные цифрой 1, соответствуют напряжениям на положительном полюсе летающего конденсатора, а цифрой 2 – переменной составляющей напряжения  $U_{out-}$  на выходе системы накачки заряда, как это представлено на рис. 4, или переменной составляющей отрицательного выходного напряжения микросхемы  $V_{out-}$ , как представлено на рис. 5. При этих измерениях использовался цифровой отрезающий фильтр с частотой 30 МГц.

Рисунки 4 и 5 показывают, что при токе 10 мА перенос заряда осуществляется пачками импульсов разряд–заряд летающего конденсатора. Во время разряда напряжение на



**Рис. 4.** Формы сигналов (5 мкс/дел) напряжений  $U_{flyDC+}$  (2 В/дел) и  $U_{out-}$  (20 мВ/дел) при токе нагрузки 10 мА.

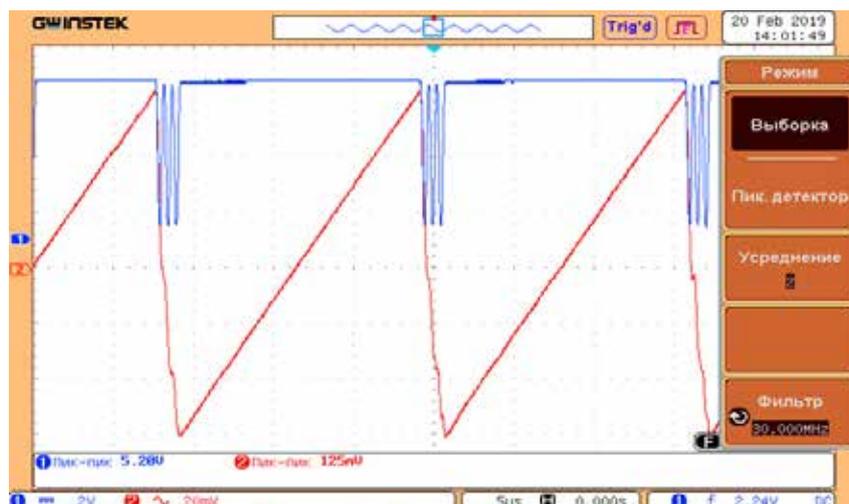


Рис. 5. Формы сигналов (5 мкс/дел) напряжений  $U_{fyDC+}$  (2 В/дел) и  $V_{out-}$  (1 мВ/дел) при токе нагрузки 10 мА.

положительном полюсе летающего конденсатора равно нулю, так как с целью инвертирования выходящего из микросхемы напряжения, как показано на рис. 2, положительный полюс при переносе заряда соединен с землей. Трех циклов разряд–заряд суммарной продолжительностью 1500 нс в пачке при токе нагрузки 10 мА оказалось достаточным, чтобы на выходе микросхемы поддерживать постоянным и равным  $-4.9$  В отрицательное выходное напряжение. При этом промежуток времени между пачками составлял около 15 мкс, за 3 цикла в пачке отрицательное напряжение на выходе из системы регулирования уменьшалось на 125 мВ, а размах колебаний отрицательного напряжения на выходе микросхемы не превышал 1.8 мВ.

На рис. 6 и 7 представлены результаты, полученные при токе нагрузки 50 мА.

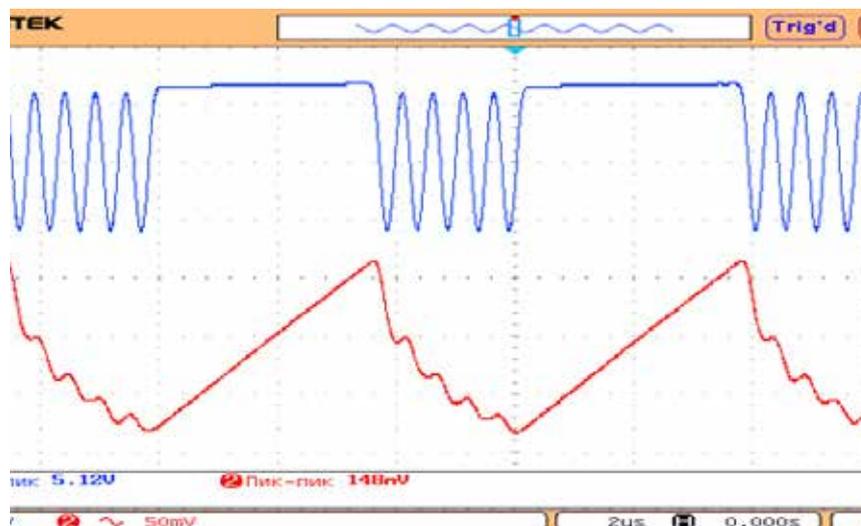


Рис. 6. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений  $U_{fyDC+}$  (2 В/дел) и  $U_{out-}$  (50 мВ/дел) при токе нагрузки 50 мА.

Для поддержания стабильного напряжения на выходе микросхемы равным  $-4.9$  В при этом токе нагрузки пачка импульсов разряд–заряд летающего конденсатора состояла из 5 циклов. За это время напряжение на выходе из системы накачки заряда уменьшалось на 148 мВ, а размах пульсаций напряжения на выходе микросхемы увеличился и составлял 5.52 мВ.

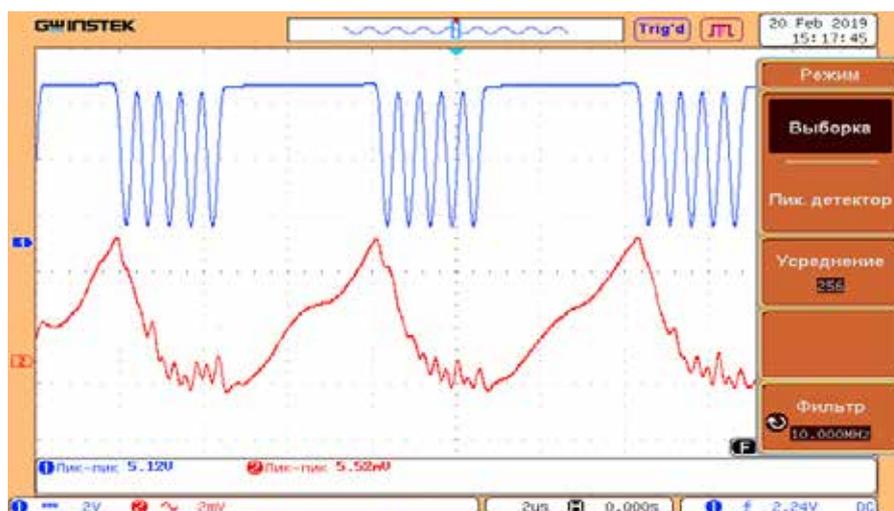


Рис. 7. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений  $U_{f_{DC+}}$  (2 В/дел) и  $V_{out-}$  (2 мВ/дел) при токе нагрузки 50 мА.

Временной промежуток между пачками в этом режиме уменьшился и составлял примерно 4 мкс.

При дальнейшем увеличении тока нагрузки ситуация с увеличением числа циклов разряд-заряд в пачках импульсов, уменьшением промежутка времени между пачками и увеличением размаха пульсаций напряжения на выходе микросхемы сохранялась. В качестве примера на рис. 8 показан результат для тока нагрузки 100 мА.

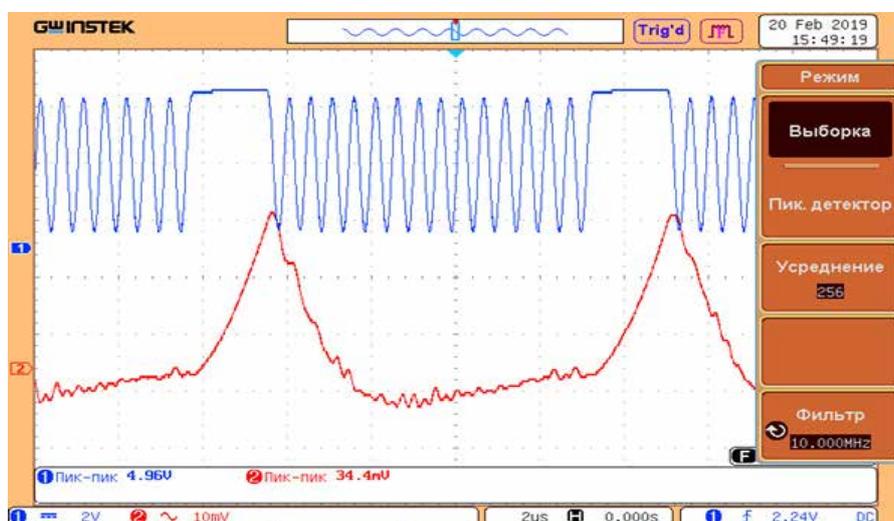


Рис. 8. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений  $U_{f_{DC+}}$  (2 В/дел) и  $V_{out-}$  (10 мВ/дел) при токе нагрузки 100 мА.

Эта тенденция сохранялась вплоть до тока нагрузки 107 мА (рис. 9 и 10).

Однако при токе нагрузки 109 мА характер работы системы регулирования выходного напряжения принципиально изменился. Полученные для этого значения тока результаты показаны на рис. 11 и 12.

Из рис. 11 видно, что нет режима переноса пачками, а циклы разряд-заряд летающего конденсатора следуют с постоянной частотой 2 МГц, соответствующей тактовой частоте осциллятора. Существенно уменьшилась величина пульсаций напряжения на вы-

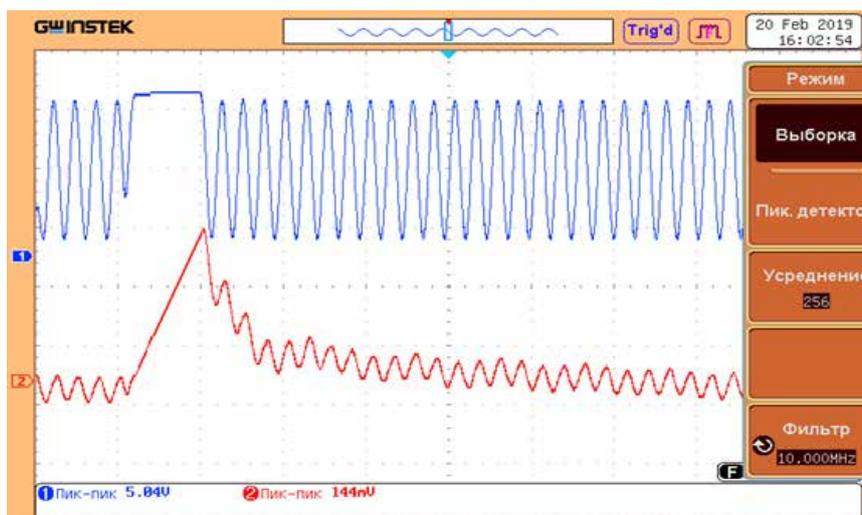


Рис. 9. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений  $U_{fbDC+}$  (2 В/дел) и  $U_{out-}$  (50 мВ/дел) при токе нагрузки 107 мА.

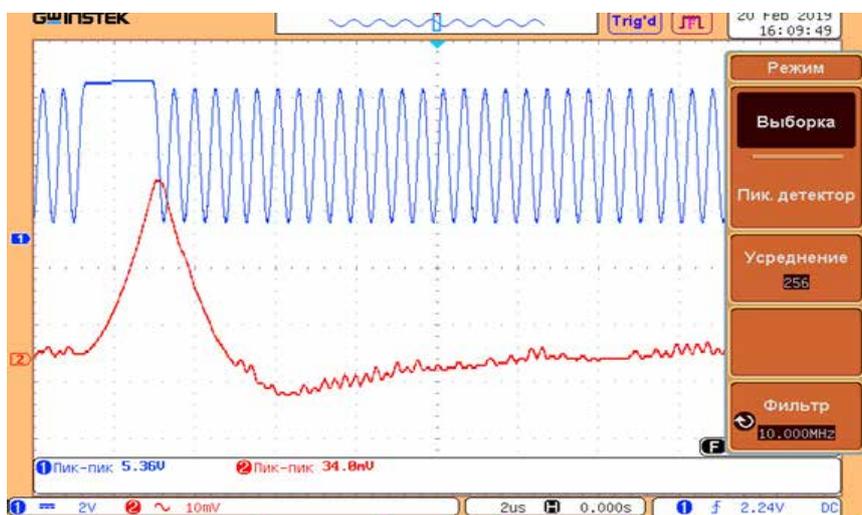


Рис. 10. Формы сигналов (2 мкс/дел) напряжений  $U_{fbDC+}$  (2 В/дел) и  $U_{out-}$  (10 мВ/дел) при токе нагрузки 107 мА.

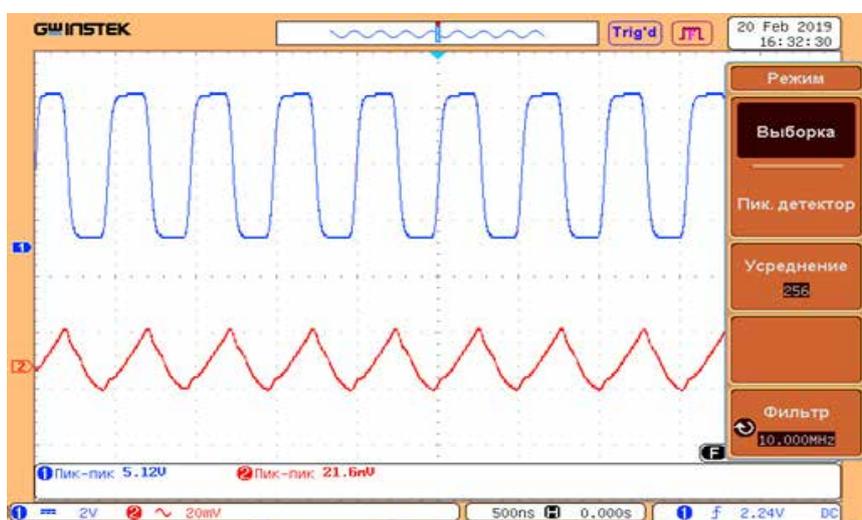


Рис. 11. Формы сигналов (500 нс/дел) напряжений  $U_{fbDC+}$  (2 В/дел) и  $U_{out-}$  (20 мВ/дел) при токе нагрузки 109 мА.

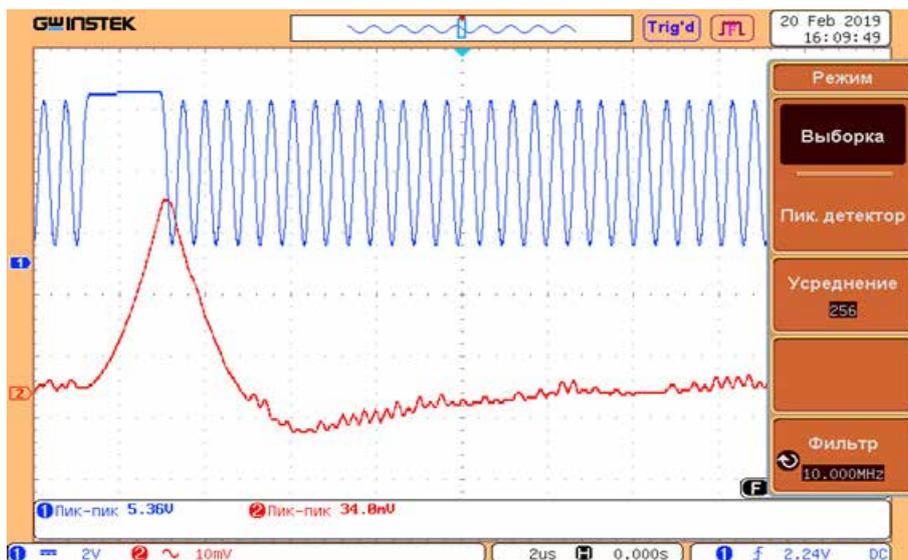


Рис. 12. Формы сигналов (500 нс/дел) напряжений  $U_{\text{f}y\text{DC}+}$  (2 В/дел) и  $V_{\text{out}}\sim$  (1 мВ/дел) при токе нагрузки 109 мА.

ходе микросхемы. Если при токе нагрузки 107 мА размах напряжения пульсаций составлял 34 мВ, то при токе нагрузки 109 мА он составляет всего 2.2 мВ.

При токах нагрузки больше 109 мА режимы накачки заряда с постоянной частотой, равной 2 МГц, сохраняются. На рис. 13 и 14 в качестве примера показаны результаты измерений для токов нагрузки 152 и 250 мА.

При этом с увеличением тока нагрузки немного уменьшается напряжение на летающем конденсаторе при окончании его заряда и несколько увеличивается размах пульсаций напряжения на выходе микросхемы. При максимальном токе нагрузки 250 мА его величина составляет 7.28 мВ.

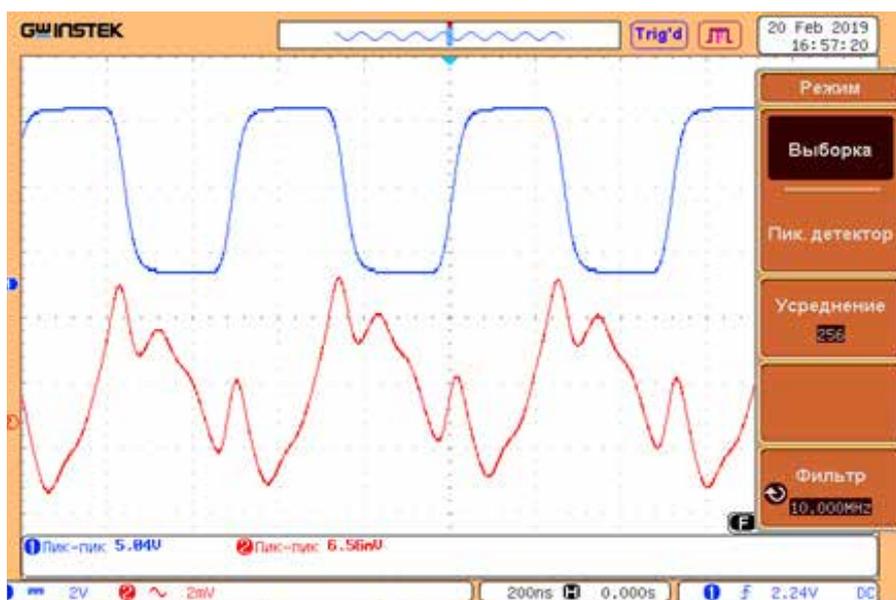


Рис. 13. Формы сигналов (200 нс/дел) напряжений  $U_{\text{f}y\text{DC}+}$  (2 В/дел) и  $V_{\text{out}}\sim$  (1 мВ/дел) при токе нагрузки 152 мА.

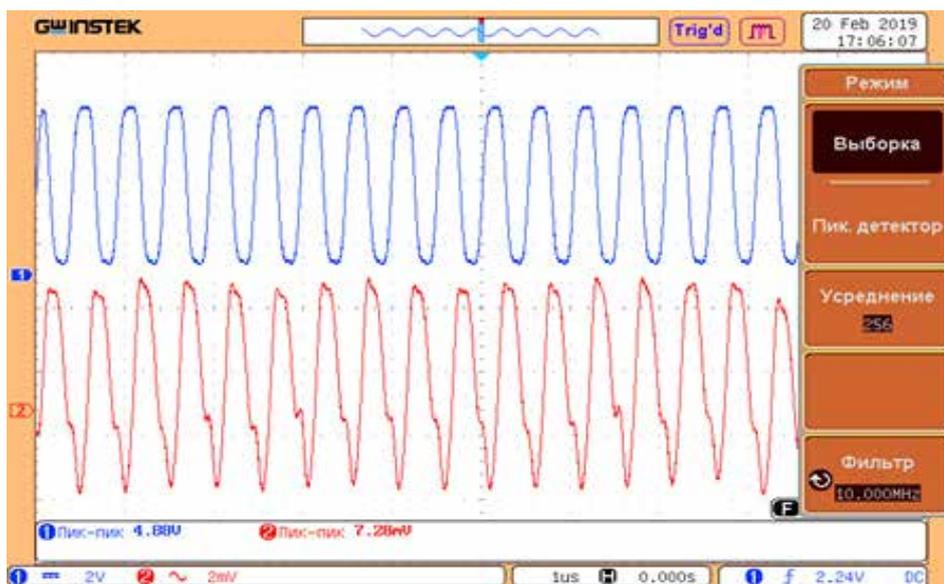


Рис. 14. Формы сигналов (1 мкс/дел) напряжений  $U_{f_{yDC+}}$  (2 В/дел) и  $V_{out\sim}$  (1 мВ/дел) при токе нагрузки 250 мА.

### Анализ полученных результатов

Полученные в настоящей работе результаты экспериментального исследования не подтверждают имеющееся в [5] примечание к таблице с электрическими характеристиками LM27762 о том, что при предельном входном напряжении 5.5 В накачка заряда может войти в режим ШИМ в горячих условиях. При таком входном напряжении обнаружено лишь два режима работы системы регулирования отрицательного выходного напряжения. При относительно малых токах нагрузки до 107 мА система работает с использованием пачек импульсов накачки, разделенных промежутками времени, в которых перенос заряда отсутствует. Длительность этих промежутков времени уменьшается по мере увеличения токов нагрузки, а число циклов разряд–заряд в пачке увеличивается.

Необходимо отметить, что использование режима пачки импульсов при накачке заряда в случае малых токов нагрузки, по-видимому, впервые было применено компанией Linear Technology в преобразователе LTC3245 [7]. Оно получило название Burst Mode® Operation. Применение пачки импульсов накачки при малых токах в [7] реализовано на основе совместного использования обычной системы регулирования накачки по верхнему и нижнему пределу совместно с контролем и регулированием заряда, переносимого за один цикл. Когда преобразователь LTC3245 находится в Burst Mode® Operation, при легких нагрузках за один цикл переносится минимальное количество заряда. Регулировка тока заряда в пачке позволяет без использования LDO держать пульсации выходного в пределах 50 мВ.

Производитель микросхемы LM27762 не называет алгоритм ее работы при малых токах режимом пачки. Но из наших измерений следует, что в ней используется именно такой режим. Однако пульсации напряжения на выходе из системы накачки заряда у LM27762, во-первых, много больше, чем у LTC3245, и, во-вторых, они зависят от тока нагрузки. Заряд, передаваемый за один цикл в режиме пачки, может зависеть от ряда факторов, в частности, от сопротивления ключей, характеристик использованных кон-

денсаторов, величины напряжения на входе в инвертор и др. Поэтому контроль за количеством передаваемого заряда или за током при такой передаче является очень важным. По-видимому, в LM27762 такого контроля нет. Здесь осуществляется лишь постоянный контроль величины выходного напряжения. Именно этим объясняются полученные в настоящей работе и показанные на рис. 4, 6 и 9 большие колебания напряжения на выходе из системы накачки. Наличие LDO в микросхеме LM27762 уменьшает пульсации отрицательного напряжения на выходе микросхемы, однако, как это видно из рис. 7, 8 и 10, они могут значительно превышать значения, показанные в [5] на рис. 1 и 2.

Важным разделом, связанным с алгоритмом работы микросхемы LM27762, является ее переход при увеличении тока нагрузки от режима пачек к режиму накачки с постоянной тактовой частотой 2 МГц. При предельном входном напряжении 5.5 В такой переход в настоящей работе имел место в промежутке значений между токами нагрузки 107 и 109 мА. Здесь возникают два вопроса. Первый связан с условием перехода, а второй – за счет чего поддерживается постоянное напряжение на выходе при дальнейшем увеличении тока нагрузки. Из полученных результатов видно, как с увеличением тока нагрузки при работе в режиме пачек уменьшаются промежутки времени между пачками, что позволяет считать переход системы от режимов пачек в режим постоянной частоты накачки плавным. При переходе в режим постоянной частоты уровень пульсаций отрицательного напряжения на выходе микросхемы, как показано на рис. 12, резко уменьшается. Необходимо, однако, отметить, что при дальнейшем увеличении тока нагрузки размах колебаний напряжения на выходе увеличивается и при токе 152 мА составляет 6.56 мВ, а при предельном токе 250 мА он составляет 7.28 мВ. Оба эти значения существенно превышают величины, приведенные в документации [5].

Из полученных в настоящей работе результатов можно сделать вывод о том, что при предельном входном напряжении 5.5 В микросхема LM27762 работает с большими отличиями от имеющихся в [5] ее описания и основных характеристик.

### ***Благодарности***

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. Битюков В.К., Миронов А.В., Михневич Н.Г., Петров В.А. Работа системы накачки заряда DC-DC преобразователя MAX1759 в режиме повышения напряжения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2017. № 1. С. 48–59.
2. Битюков В.К., Петров В.А., Сотникова А.А. Работа системы накачки заряда DC-DC преобразователя MCP1253 в режиме понижения напряжения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2018. № 1. С. 10–22.
3. Битюков В.К., Петров В.А., Сотникова А.А. Алгоритм работы микросхемы DC-DC преобразователя MCP1253 в режиме повышения напряжения // Радиотехника. 2018. № 9. С. 178–184. <https://doi.org/10.18127/j00338486-201809-29>
4. Low Noise Dual Supply Inverting Charge Pump LTC3260. Datasheet 3260fa. Linear Technology. 2012. 19 p. URL: <http://www.datasheet-pdf.com/PDF/LTC3260-Datasheet-Linear-717626>
5. LM27762 Low-Noise Positive and Negative Output Integrated Charge Pump Plus LDO. Datasheet SNVSAF7B. Texas Instruments Incorporated. 2016 (Rev. 2017). 29 p. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm27762.pdf>

6. Using the LM27762EVM Evaluation Module. User's Guide, SNVU534, Texas Instruments, 2016. 19 p. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/snvu534/snvu534.pdf>
7. Wide VIN Range, Low Noise, 250 mA Buck-Boost Charge-Pump LTC3245. Datasheet 3245fa. Linear Technology. 2013. 18 p. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/1726405.pdf>

### References:

1. Bityukov V.K., Mironov A.V., Mikhnevich N.G., Petrov V.A. Charge pump system operation of DC–DC converter MAX1759 in the voltage boost mode. *Vestnik Kontserna PVO «Almaz-Antey»* [Bulletin of Concern PVO «Almaz-Antey»]. 2017; 1:48-59, (in Russ.).
2. Bityukov V.K., Petrov V.A., Sotnikova A.A. Charge pumping system operation in the buck mode of the MCP1253 DC–DC converter. *Vestnik Kontserna PVO «Almaz-Antey»* [Bulletin of Concern PVO «Almaz-Antey»]. 2018; 1:10-22, (in Russ.).
3. Bityukov V.K., Petrov V.A., Sotnikova A.A. Algorithm of operation of DC–DC converter MCP1253 in the boost mode. *Radiotekhnika* [Radio Engineering]. 2018; 9:178-184. <https://doi.org/10.18127/j00338486-201809-29>, (in Russ.).
4. Low Noise Dual Supply Inverting Charge Pump LTC3260. Datasheet 3260fa. Linear Technology. 2012. 19 p. URL: <http://www.datasheet-pdf.com/PDF/LTC3260-Datasheet-Linear-717626>
5. LM27762 Low-Noise Positive and Negative Output Integrated Charge Pump Plus LDO. Datasheet SNVSAF7B. Texas Instruments Incorporated. 2016 (Rev. 2017). 29 p. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm27762.pdf>
6. Using the LM27762EVM Evaluation Module. User's Guide, SNVU534, Texas Instruments, 2016. 19 p. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/snvu534/snvu534.pdf>
7. Wide VIN Range, Low Noise, 250 mA Buck-Boost Charge-Pump LTC3245. Datasheet 3245fa. Linear Technology. 2013. 18 p. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/1726405.pdf>

### Об авторах:

**Битюков Владимир Ксенофонович**, доктор технических наук, профессор кафедры телекоммуникаций и радиотехники Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 6603797260, ResearcherID Y-8325-2018.

**Михневич Николай Григорьевич**, заведующий лабораторией кафедры телекоммуникаций и радиотехники Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, д. 78).

**Петров Вадим Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры телекоммуникаций и радиотехники Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, д. 78).

### About the authors:

**Vladimir K. Bityukov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Chair of Telecommunications and Radio Engineering, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Nikolay G. Mikhnevich**, Head of Laboratory, Chair of Telecommunications and Radio Engineering, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

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

**Для цитирования:** Битюков В.К., Михневич Н.Г., Петров В.А. Пульсации напряжения отрицательной полярности на выходе двухполярного DC–DC преобразователя LM27762 при близком к предельному входном напряжении // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 31–43. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-31-43>

**For citation:** 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>

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-44-53>



UDC 621.3.049.774

## Nominal and Actual Values of Inductor and Capacitor Parameters at High Frequencies

Egor V. Gurov<sup>1,@</sup>,  
Saygid U. Uvaysov<sup>1</sup>,  
Aida S. Uvaysova<sup>1</sup>,  
Svetlana S. Uvaysova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

<sup>2</sup>National Research University «Higher School of Economics», Moscow 123592, Russia

@Corresponding author e-mail: [gurov.yegor@gmail.com](mailto:gurov.yegor@gmail.com)

Coil inductance and capacitor capacitance depend on overall dimensions, structure, and ambient factors. They do not vary with frequency. Reactive component impedance is determined by inductance or capacitance respectively, if active resistance is not considered. This is true for the frequencies which are significantly lower than the self-resonant frequency of the component. Parasitic parameters contribution increases on approaching the self-resonant frequency. Therefore, the component's actual inductance and actual capacitance on operating frequency are defined. They are provided by manufacturers and differ from the nominal values. The actual values provide more accurate impedance of components near the considered frequency. Significant deviation from the considered frequency can cause impedance mismatch even more than the nominal values can provide. Frequency response of the high-frequency circuits such as analog filters and impedance match networks are determined by components impedance, not the nominal values. Thus, calculated values must be close to the actual values. The purpose of this article is to justify actual values application instead of nominal values.

**Keywords:** inductor, inductance, capacitor, MLCC, capacitance, impedance, reactance.

## Номинальные и эффективные значения параметров катушек индуктивности и конденсаторов на высоких частотах

Е.В. Гуров<sup>1,®</sup>,  
С.У. Увайсов<sup>1</sup>,  
А.С. Увайсова<sup>1</sup>,  
С.С. Увайсова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия,

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва 123592, Россия

®Автор для переписки, e-mail: gurov.yegor@gmail.com

Индуктивность катушек и емкость конденсаторов представляются физическими величинами, зависящими от геометрических размеров, конфигурации компонентов, параметров окружающей среды, причем эти величины не зависят от частоты протекающего через них переменного тока. Полное сопротивление реактивных компонентов, без учета активной составляющей, определяется их индуктивностью или емкостью, соответственно. Такое утверждение справедливо для частот, значительно более низких по сравнению с собственной резонансной частотой компонента, ближе к которой всё больший вклад вносят паразитные параметры. Поэтому вводятся понятия эффективной индуктивности и эффективной емкости, значения которых отличаются от номинальных и зависят от частоты. Данные величины предоставляются производителями компонентов. Эффективные индуктивность и емкость дают более точное значение полного сопротивления в окрестности рассматриваемой частоты. Если имеет место существенное отклонение частоты от рассматриваемой, ошибка может оказаться даже больше, чем при использовании номинальных значений. При проектировании высокочастотных цепей, таких, как аналоговые фильтры и согласующие цепи, частотную характеристику определяют импедансы компонентов, а не их номинальные значения. Таким образом, расчетные значения должны быть близки именно к эффективным номиналам. Целью данной статьи является обоснование случаев необходимости применения эффективных значений реактивных компонентов взамен номинальных.

**Ключевые слова:** катушка индуктивности, индуктивность, конденсатор, керамический конденсатор, емкость, полное сопротивление, реактивное сопротивление.

### Introduction

Unlike resistors that dissipate energy, inductors and capacitors accumulate it. They are used in analog filters, matching circuits, delay circuits, and energy storage. The practically used inductance of coils in the high-frequency range (more than 10 MHz) usually lies below 1  $\mu\text{H}$ , since the parasitic parameters significantly distort the characteristics with increasing frequency. For a similar reason, at high frequencies, ceramic multilayer capacitors with a capacity of up to 1  $\mu\text{F}$  are used.

The characteristics of radio frequency filters and matching circuits are determined by the impedances of the used components. Real coils and capacitors have reactance as well as resistance, and the latter dissipates energy. It is not equal to the resistance at a constant current and depends on the frequency due to the influence of the skin effect and the proximity effect [1, 2]. Both inductors and capacitors have such a parasitic characteristic as the resonant frequency, that is, the coil has a capacitance, and the capacitor has an inductance [3–6].

For the analysis of electrical circuits at frequencies more than 10 times lower than the resonant frequency, a model with a Q-factor (or Q-model) is used, which is an indicator of active losses. Q-model consists of a series-connected ideal reactive component and resistance. At higher frequencies, the parasitic reactive component is introduced. Thus, the RLC model is obtained [6].

However, even the RLC-model may not provide sufficient accuracy for describing the real component. Manufacturers provide S-parameters (which are experimental results) as models closest to the real components, and also SPICE models based on them [7, 8].

The ideal coil inductance can be defined as the ratio of impedance to frequency. If we substitute the real measured resistance instead of the impedance, we obtain the so-called effective inductance, which depends on the frequency and is applied only at frequencies below the resonant frequency. Definitions of initial and effective inductance are also given in GOST 20718-75<sup>1</sup>. Similarly, the concept of effective capacity can be introduced for a capacitor.

In addition to the above parasitic characteristics, MLCC has a capacitance dependence on voltage and temperature [9], the coil resistance depends on the current flowing through it. These parameters are not considered in this article. It is assumed that the components operate at a fixed temperature with low voltage and current signals.

When designing radio-frequency filters and matching circuits, it may be necessary to select the inductance coils and capacitors. SPICE models or S-parameters have the highest accuracy. However, the search process can be very difficult or impossible. The RLC model has good accuracy at frequencies close to the resonant ones. However, with variation of the nominal, the nominal value of the parasitic reactive component also has to be varied, which also causes additional difficulties. The Q-model does not provide acceptable accuracy at high frequencies. As a satisfactory solution, it is proposed to use a Q-model and effective nominal value (QA-model), which can provide acceptable accuracy in a small arbitrary frequency range. That may be sufficient to solve a specific problem.

This article presents the dependence of the impedance on the frequency for the previously described inductors and capacitors models, a comparison with experimental values, for example, a specific coil and capacitor. Conclusions about the feasibility of using QA-models compared to other models of reactive components in the field of high frequencies are made.

### Inductors models

#### *Ideal inductor*

The inductance of an ideal inductor depends only on its geometric dimensions, configuration, and magnetic properties of the surrounding space. Resistance is purely reactive and is determined

---

<sup>1</sup>GOST 20718-75. Interstate Standard. Inductance coils for telecommunication equipment. Terms and definitions. Moscow: Standartinform Publ., 2005. 54 p.

[ГОСТ 20718-75. Межгосударственный стандарт. Катушки индуктивности аппаратуры связи. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2005. 54 с.]

by the formula:

$$Z(\omega) = j\omega L = j2\pi fL \quad (1)$$

where  $j$  is complex unit;  $\omega$  is circular frequency, rad/sec;  $f$  is frequency, Hz;  $L$  is inductance, H.

*Q-model (model with a quality factor)*

Q-model considers the active resistance of a real inductor. It describes well the behavior at low frequencies up to about 1/10 of the resonant frequency (Fig. 1). The impedance is determined by the formula:

$$Z(\omega) = R(\omega_0) + j\omega L \quad (2)$$

where  $R$  is Equivalent Series Resistor (ESR). The ESR is not equal to DC resistance and depends on frequency. In a Q-model the ESR is determined at a specific frequency  $\omega_0$ , which is selected depending on the frequency range under consideration.



Fig. 1. Coil model with Q-factor.

The quality factor of the passive component is defined as the reactance to resistance ratio [10].

$$Q(\omega) = \frac{\text{Im}[Z(\omega)]}{\text{Re}[Z(\omega)]} = \frac{\omega L}{R(\omega_0)} \quad (3)$$

The quality factor is often indicated in the documentation for inductors and capacitors. Some simulators, for example, Keysight Genesys and Advanced Design System have a coil model with good quality in the standard library, where it is necessary to indicate its value at a specific frequency. In terms of quality, the total resistance can be determined by the formula:

$$Z(\omega) = \omega L \left( \frac{1}{Q(\omega_0)} + j \right) \quad (4)$$

*RLC model*

This model considers the influence of parasitic capacitance and has a resonant frequency (Fig. 2).

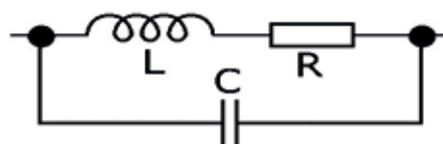


Fig. 2. RLC coil model.

Initially, the coil's own capacity was explained by inter-turn capacity [11]. However, the experimental results did not confirm this [12]. According to the results of more recent studies [13], it is proposed to abandon the static capacitance, considering the inductance coil as a long transmission line, and its own capacity depends on frequency [14].

Impedance is determined by the formula:

$$Z(\omega) = (j\omega L + R(\omega_0)) \parallel \left( \frac{1}{j\omega C} \right) = \frac{R(\omega_0) + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega CR(\omega_0)} \quad (5)$$

Resistance  $R$  and parasitic capacitance are frequency dependent. To simplify the calculations, we can take both parasitic values static. Active resistance can be chosen at the frequency of interest to us, as in a Q-model. The capacitance can be determined from the resonance frequency  $\omega_{res}$ :

$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \Rightarrow C = \frac{1}{\omega_{res}^2 L} \quad (6)$$

*Q-model with effective inductance (QA-model)*

The impedance of an ideal inductance coil is determined by formula (1). Hence, as the dependence of the impedance on the frequency is known, we can determine the inductance:

$$L = \frac{Z(\omega)}{j\omega} \quad (7)$$

Substituting the experimental dependence instead of the ideal resistance  $Z$ , we obtain the so-called effective inductance, which depends on the frequency. It already includes the influence of parasitic capacitance.

QA-model is a model with a quality factor, in which the nominal component value is replaced by a constant value of the effective nominal at a specific frequency. Resistance is constant, determined at the same frequency.

$$Z_{QA}(\omega) = R(\omega_0) + j\omega L_{eff}(\omega_0) \quad (8)$$

## Capacitor models

*Ideal capacitor*

In the case when the dielectric constant of the dielectric does not depend on the frequency, the capacitor capacitance is determined only by the geometric dimensions, the configuration of the capacitor, the properties of the dielectric and the surrounding space. Resistance is purely reactive and is determined by the formula:

$$Z(\omega) = \frac{1}{j\omega C} \quad (9)$$

where  $C$  is capacitance, F.

*Q-model*

Q-model considers the resistance of a real ceramic capacitor. It describes well the behavior at low frequencies up to about 1/10 of the resonant frequency (Fig. 3). The impedance is determined by the formula:

$$Z(\omega) = \frac{1}{j\omega C} + R(\omega_0) = \frac{1}{\omega C} \cdot \left( \frac{1}{Q(\omega_0)} - j \right) \quad (10)$$



Fig. 3. RLC coil model.

*RLC model*

This model takes into account the influence of parasitic inductance, and it has a resonant frequency (Fig. 4).

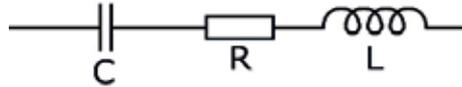


Fig. 4. RLC capacitance model.

The impedance is determined by the formula:

$$Z(\omega) = R(\omega_0) + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \tag{11}$$

The inductance of a capacitor is due to the inductance of the plates and outlets [15]. The resistance is due to the resistance of the plates and losses in the dielectric. Unlike inductors, these parasitic parameters are less dependent on frequency, and the RLC model describes the behavior of a capacitor more accurately than for an inductance coil.

*Q-model and effective inductance (QA-model)*

The impedance of an ideal capacitor is determined by the formula (9). As the dependence of the impedance on the frequency is known, we can determine the inductance:

$$C = \frac{1}{j\omega Z} \tag{12}$$

Substituting the experimental dependence instead of the ideal resistance  $Z$  we obtain the so-called effective capacitance depending on frequency. It already includes the influence of parasitic inductance.

The QA model of the capacitor is similar to the QA model of the coil. Impedance is determined by the formula:

$$Z_{QA}(\omega) = R(\omega_0) + \frac{1}{j\omega C_{eff}(\omega_0)} \tag{13}$$

**Comparison between considered and experimental results**

The S-parameters or SPICE models can be used as experimental results. Murata provides for its products experimental frequency dependencies for impedance, active and reactive resistance, effective capacitance and inductance, quality factor and other parameters.

Consider an inductance coil for surface mounting 0603 100 nH ± 5% LQG18HNR10J00 and a capacitor 0402 C0G 100 pF ± 5% 50 V GRM1555C1H101JA01. Let us estimate the deviations of the models considered earlier from the experimental characteristics provided by the manufacturer as an example of these two components.

The deviation from the experimental characteristics at a particular frequency is determined by the formula:

$$\delta = \frac{|ex - m|}{ex} \cdot 100\%, \tag{14}$$

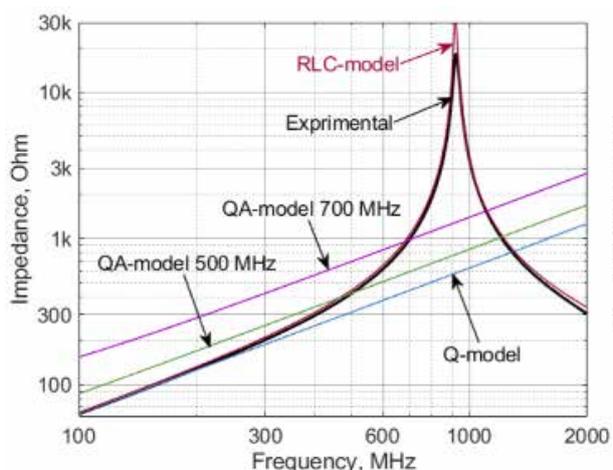
where  $ex$  is the experimental value;  $m$  is the calculated value. The estimate of the simulation results deviation from the experimental values in the frequency range is determined by the formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=a}^b (ex_i - m_i)^2}{b - a}}, \tag{15}$$

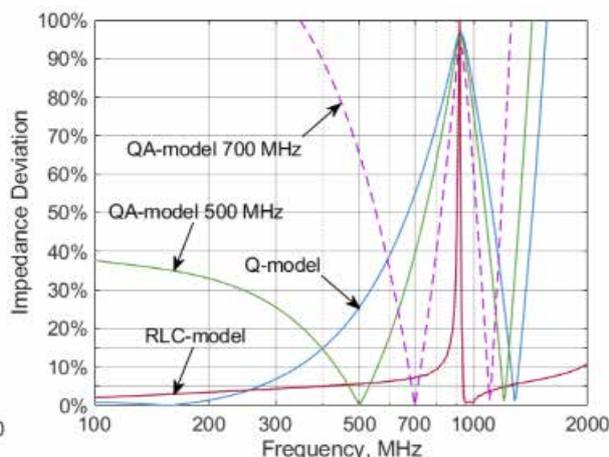
where  $a$  is the number of the lower frequency in the range,  $b$  is the number of the upper frequency in the range. Here the deviation is given in absolute units.

### Inductor

The dependence of the impedance on the frequency for different models of the inductor, as well as the experimental characteristic is shown in Fig. 5. The deviation of the calculated values from the experimental values is presented in Fig. 6.



**Fig. 5.** Dependence of the impedance of the inductor models on the frequency.



**Fig. 6.** Deviation of the calculated inductance impedance from experimental values.

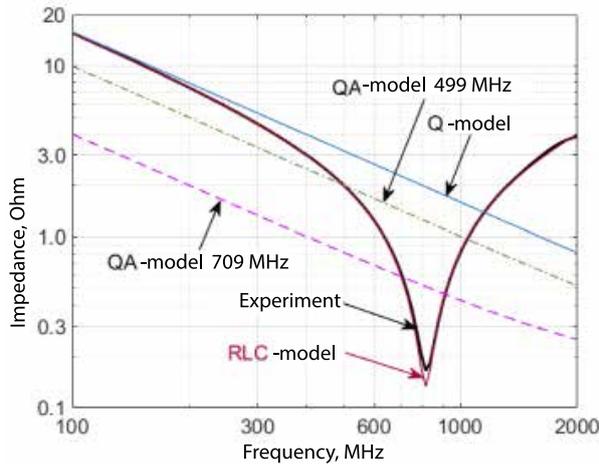
Table 1 shows the impedances deviations of the inductance models under consideration from the experimental values in several frequency ranges. The second column «Capacitance» indicates the experimental coil resistance at the edges of the frequency range.

**Table 1.** Deviations of the impedance of various models of inductance from experimental values

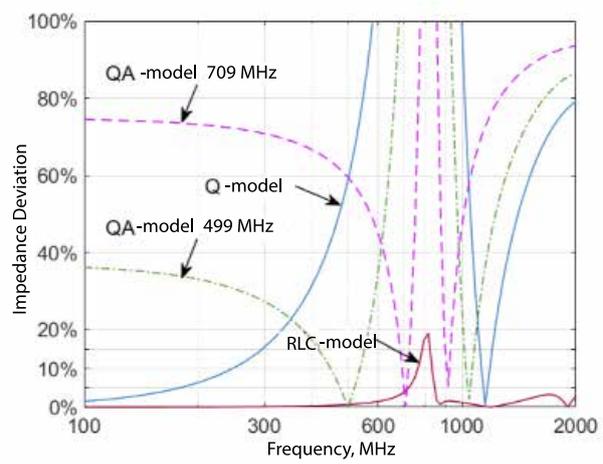
Range, MHz	Capacitance, Ohm	Q-model	RLC-model	QA-model, 500 MHz	QA-model, 700 MHz
30...100	20...63	0.8	1.1	19.0	78.8
100...300	63...202	5.7	5.3	42.5	165.9
300...450	202...353	42.1	14.1	46.6	261.4
450...550	353...508	120.8	25.2	23.7	285.4
650...750	765...1303	605.2	78.2	451.3	133.5

*Capacitance*

The dependence of the impedance on the frequency for different models of the ceramic capacitor, as well as the experimental characteristic is shown in Fig. 7. The deviation of the calculated values from the experimental ones is presented in Fig. 8.



**Fig. 7.** Dependence of the impedance of ceramic capacitor models on the frequency.



**Fig. 8.** Deviation of the calculated impedance of a ceramic capacitor from the experimental values.

Table 2 shows the deviations of the impedances of the considered models of a ceramic capacitor from the experimental values in several frequency ranges by analogy with Table 1.

**Table 2.** Deviations of the impedance of various models of ceramic capacitor from the experimental values

Range, MHz	Capacitance, Ohm	Q-model	RLC-model	QA-model, 500 MHz	QA-model, 700 MHz
100...310	15.68...4.40	0.54	0.005	3.24	6.94
310...457	4.40...2.40	0.98	0.011	0.78	2.46
457...562	2.40...1.50	1.33	0.016	0.19	1.27
646...751	0.94...0.37	1.80	0.027	0.99	0.19

**Conclusion**

In this article, three models of an inductance coil and a capacitor were considered: a Q-model, an RLC-model and a Q-model with effective value. The deviation error of the impedance was compared with the experimental data using the example of an inductor LQG18HNR10J00 and a capacitor GRM1555C1H101JA01.

For both components, the most accurate model considered at high frequencies to the resonant frequency was the RLC model. A Q-model at low frequencies for an inductor produces more accurate results due to the fact that the intrinsic capacitance is different at different frequencies [14], and for the RLC model it was determined at the resonant frequency.

A Q-model and an effective value can significantly reduce the error of a simple Q-model at frequencies above 1/10 of the resonant frequency over a narrow frequency range. Moreover, the band where the error does not exceed an arbitrarily specified value (for example, 5%) decreases as the frequency under consideration increases. The model is the most convenient in tasks where it is necessary to carry out the selection of component value, and high accuracy

is needed in a narrow frequency band, for example, when designing radio frequency filters or matching circuits.

In order to practically apply the QA-model we need data on the dependence of the effective value on frequency, which are usually provided by the manufacturer. The required characteristics can be obtained from the S-parameters or the SPICE model. However, when it is necessary to select a specific type of component from a large set knowing only the required Q-factor and effective value, additional calculations lead to significant time costs. Therefore, when designing units of electronic high-frequency equipment where selection of nominal values is required, it is desirable to use components of those manufacturers that provide data on the effective values of nominals.

### References:

1. Gatous O.M.O., Pissolato J. Frequency-dependent skin-effect formulation for resistance and internal inductance of a solid cylindrical conductor. In: IEE Proceed. Microwaves, Antennas and Propagation. 2004; 151(3):212-216. <https://doi.org/10.1049/ip-map:20040469>
2. Raven M.S. Experimental measurements of the skin effect and internal inductance at low frequencies. *Acta Technica CSAV* (Ceskoslovensk Akademie Ved.). 2015; 60:51-69.
3. Introduction to capacitor technologies. KEMET Electronics Corporation URL: <http://www.kemet.com/Lists/TechnicalArticles/Attachments/6/What%20is%20a%20Capacitor.pdf>. Accessed July 2, 2019.
4. Zumbahlen H. Basic Linear Design. Chapter 10: Passive components. Analog Devices, Inc., 2007. URL: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Basic-Linear-Design/Chapter10.pdf>. Accessed July 2, 2019.
5. Caio M., Pichorim S. Self-resonant frequencies of air-core single-layer solenoid coils calculated by a simple method. *Electrical Engineering*. 2014; 97(1):57-64. <https://doi.org/10.1007/s00202-014-0312-3>.
6. Green L. RF-inductor modeling for the 21st century. EDN. September 2001. URL: <https://m.eet.com/media/1142818/19256-159688.pdf>. Accessed July 2, 2019.
7. S-parameters and SPICE models. Coilcraft. URL: <https://www.coilcraft.com/models.cfm>. Accessed July 2, 2019.
8. S-parameter & Equivalent Circuit Model. TDK. URL: <https://product.tdk.com/info/en/technicalsupport/tvcl/general/mlcc.html>. Accessed July 2, 2019.
9. Prymak J., Randall M., Blais P., Long B. Why that 47 uF capacitor drops to 37 uF, 30 uF, or lower. Proceed. CARTS USA 2008. 28 Symposium for Passive Electronics, March, Newport Beach, CA. URL: [https://www.researchgate.net/publication/229019152\\_Why\\_that\\_47\\_uF\\_capacitor\\_drops\\_to\\_37\\_uF\\_30\\_uF\\_or\\_lower](https://www.researchgate.net/publication/229019152_Why_that_47_uF_capacitor_drops_to_37_uF_30_uF_or_lower). Accessed July 2, 2019.
10. Technical Terms RF Inductor. Murata Manufacturing Co., Ltd. URL: <https://www.murata.com/en-eu/products/inductor/chip/learn/glossary>. Accessed July 2, 2019.
11. Skripnikov Yu.F. Oscillatory circuit. Moscow: Energiya Publ., 1970. 128 p., (in Russ.).
12. Medhurst R.G. (GEC Research Labs.) H. F. Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids. *Wireless Engineer*. February 1947. P. 35-43.
13. Knight D.W. The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils: applicable theory, models and calculation methods (Technical report). May 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1472.0887>.
14. The self-capacitance of a single-layer air core solenoid (in Russ.). URL: <https://coil32.net/theory/self-capacitance.html>. Accessed July 2, 2019.
15. Cain J. (AVX Corporation). Parasitic inductance of multilayer ceramic capacitors. February 2002 URL: <https://www.avx.com/docs/techinfo/CeramicCapacitors/parasitic.pdf>. Accessed July 2, 2019.

### Литература:

1. Gatous O.M.O., Pissolato J. Frequency-dependent skin-effect formulation for resistance and internal inductance of a solid cylindrical conductor // In: IEE Proceed. – Microwaves, Antennas and Propagation. 2004. V. 151(3). P. 212–216. <https://doi.org/10.1049/ip-map:20040469>
2. Raven M.S. Experimental measurements of the skin effect and internal inductance at low frequencies // *Acta Technica CSAV* (Ceskoslovensk Akademie Ved). 2015. № 60. P. 51–69.
3. Introduction to capacitor technologies. KEMET Electronics Corporation [Электронный ресурс] – URL: <http://www.kemet.com/Lists/TechnicalArticles/Attachments/6/What%20is%20a%20Capacitor.pdf> (дата обращения: 02.07.2019).

4. Zumbahlen H. Basic Linear Design. Chapter 10: Passive components. Analog Devices, Inc., 2007 [Электронный ресурс] – URL: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Basic-Linear-Design/Chapter10.pdf> (дата обращения: 02.07.2019).
5. Caio M., Pichorim S. Self-resonant frequencies of air-core single-layer solenoid coils calculated by a simple method // Electrical Engineering. 2014. № 97. С. 57–64. <https://doi.org/10.1007/s00202-014-0312-3>.
6. Green L. RF-inductor modeling for the 21st century. EDN. September 2001 [Электронный ресурс] – URL: <https://m.eet.com/media/1142818/19256-159688.pdf> (дата обращения: 02.07.2019).
7. S-parameters and SPICE models. Coilcraft [Электронный ресурс] – URL: <https://www.coilcraft.com/models.cfm> (дата обращения: 02.07.2019).
8. S-parameter & Equivalent Circuit Model. TDK [Электронный ресурс] – URL: <https://product.tdk.com/info/en/technicalsupport/tvcl/general/mlcc.html> (дата обращения: 02.07.2019).
9. Prymak J., Randall M., Blais P., Long B. Why that 47 uF capacitor drops to 37 uF, 30 uF, or lower. Proceed. CARTS USA 2008. 28 Symposium for Passive Electronics, March, Newport Beach, CA. URL: [https://www.researchgate.net/publication/229019152\\_Why\\_that\\_47\\_uF\\_capacitor\\_drops\\_to\\_37\\_uF\\_30\\_uF\\_or\\_lower](https://www.researchgate.net/publication/229019152_Why_that_47_uF_capacitor_drops_to_37_uF_30_uF_or_lower) (дата обращения: 02.07.2019).
10. Technical Terms RF Inductor. Murata Manufacturing Co., Ltd. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.murata.com/en-eu/products/inductor/chip/learn/glossary> (дата обращения: 02.07.2019).
11. Скрипников Ю.Ф. Колебательный контур. М.: Энергия, 1970. 128 с.
12. Medhurst R.G. (GEC Research Labs.) H. F. Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids. Wireless Engineer. February 1947. P. 35–43.
13. Knight D.W. The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils: applicable theory, models and calculation methods (Technical report). May 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1472.0887>.
14. О собственной емкости однослойной катушки индуктивности. [Электронный ресурс] – [coil32.ru](http://coil32.ru/self-capacitance.html). URL: <http://coil32.ru/self-capacitance.html> (дата обращения: 02.07.2019).
15. Cain J. (AVX Corporation). Parasitic inductance of multilayer ceramic capacitors. February 2002 [Electronic resource] – URL: <https://www.avx.com/docs/techinfo/CeramicCapacitors/parasitic.pdf> (дата обращения: 02.07.2019).

#### **About the authors:**

**Egor V. Gurov**, Postgraduate Student of the Chair of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Saygid U. Uvaysov**, Dr. of Sci. (Engineering), Head of the Chair of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Aida S. Uvaysova**, Postgraduate Student of the Chair of Design and Production of Radio Electronic Equipment, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Svetlana S. Uvaysova**, Postgraduate Student of the Department School of Computer Engineering, National Research University «Higher School of Economics» (34, Tallinskaya st., Moscow 123592, Russia).

#### **Об авторах:**

**Гуров Егор Владимирович**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Увайсов Сайгид Увайсович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Увайсова Аида Сайгидовна**, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Увайсова Светлана Сайгидовна**, аспирант Департамента компьютерной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (123592, Россия, Москва, Таллинская ул., д.34).

**For citation:** Gurov E.V., Uvaysov S.U., Uvaysova A.S., Uvaysova S.S. Nominal and actual values of inductor and capacitor parameters at high frequencies. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):44-53, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-44-53>

**Для цитирования:** Гуров Е.В., Увайсов С.У., Увайсова А.С., Увайсова С.С. Номинальные и эффективные значения параметров катушек индуктивности и конденсаторов на высоких частотах // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 44–53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-44-53>

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-54-59>



УДК 537.5

## Перераспределение мощности сигналов в многолучевых системах радиосвязи

**В.И. Каганов<sup>@</sup>,**  
**Фам Ки**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*  
*<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: Kaganovwil@yandex.ru*

Сравниваются два типа систем спутниковой радиосвязи: однолучевая и многолучевая. Обсуждается проблема суммирования и перераспределения мощностей сигналов в таких системах радиосвязи. Анализируется перераспределение мощности группы СВЧ-транзисторных усилителей между различными лучами. Рассматривается схема сумматора на основе мостовых квадратурных устройств в двух- и четырехлучевых системах. Для двух таких случаев составлена матрица рассеяния сумматора мощностей сигналов. На основе рассмотренных случаев можно составить матрицу рассеяния суммируемых мощностей сверхвысокочастотных сигналов при числе лучей, равном 8, 16 и 32.

**Ключевые слова:** СВЧ-генератор, сумматор, многолучевая антенна.

## Redistribution of Signals Power in Multipath System of Radio Communication

**William I. Kaganov<sup>@</sup>,**  
**Fam Ky**

*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*  
*<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: Kaganovwil@yandex.ru*

Two types of satellite radio of communication systems are compared: single-beam and multi-beam. The problem of summation and redistribution of radio signal powers of communication systems is discussed. The power redistribution of a group of microwave transistor amplifiers between different beams is analyzed. An adder circuit based on bridge quadrature devices is considered in two- and four-ray systems. For two such cases, the scattering matrix of the signal power adder was compiled. On the basis of these two cases it is possible to compose a scattering matrix for the number of summed powers of microwave signals with the number of rays equal to 8, 16 and 32.

**Keywords:** microwave generator, adder, multipath antenna.

## Введение

Системы дальней космической радиосвязи, осуществляющие передачу больших объемов разнообразной информации с помощью спутников, располагаемых на геостационарной орбите (ориентировочно на расстоянии 36 тыс. км от поверхности Земли), в зависимости от числа лучей, излучаемых передающей антенной ретранслятора, можно разделить на две большие группы: однолучевые и многолучевые. Примером многолучевой системы может являться система «Турайя»<sup>1,2</sup> [1, 2], обслуживающая страны Европы, структурная схема которой приведена на рис. 1.

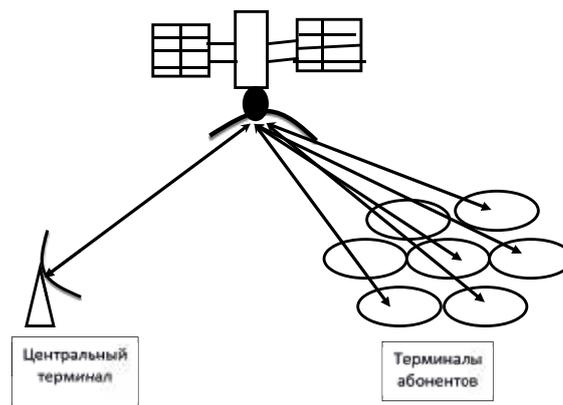


Рис. 1. Структура многолучевой системы радиосвязи.

В радиопередатчиках ретрансляторов систем обоих типов осуществляется суммирование мощностей СВЧ-сигналов транзисторных генераторов, поскольку мощность последних в СВЧ-диапазоне на один и более порядков меньше требуемой мощности спутникового ретранслятора [3].

В однолучевой системе такая функция по объединению мощностей сигналов осуществляется с помощью сумматора, структурная схема которого приведена на рис. 2.

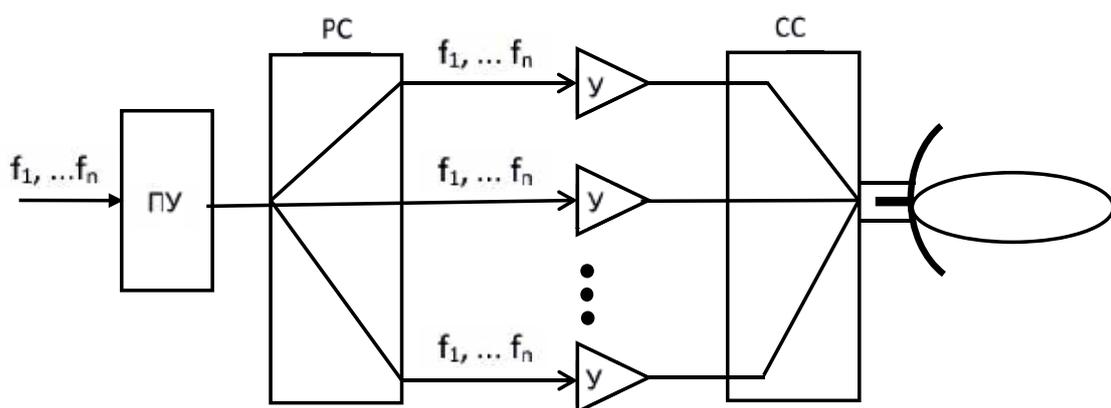


Рис. 2. Структурная схема сумматора 1-го типа:

ПУ – предварительный усилитель; РС – разделитель сигналов;  
СС – сумматор сигналов; У – усилитель мощности сигнала.

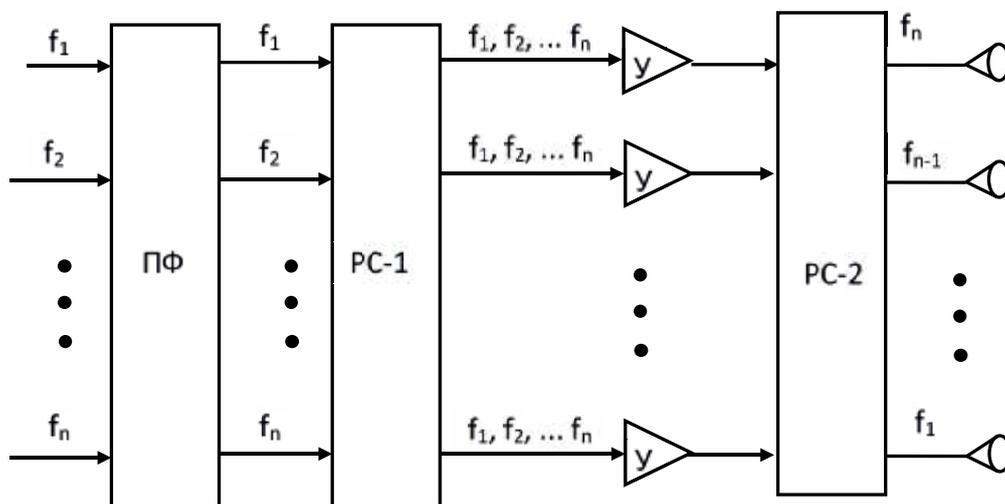
<sup>1</sup>Региональная система спутниковой связи THURAYA и ACeS [Электронный ресурс]. URL: <https://wind-sail.ru/equipment/svyaz/regionalnaja-sistema-sputnikovoj-svjazi-thuraya-i-aces/> (дата обращения 01.07.2019).

<sup>2</sup>Система спутниковой связи Thuraya [Электронный ресурс]. URL: [http://elcomplus.ru/production/tech\\_svyaz/wdt/vsat-nazemnaya-stanciya-sputnikovoj-svjazi/sputnikovye-telefony-thuraya/](http://elcomplus.ru/production/tech_svyaz/wdt/vsat-nazemnaya-stanciya-sputnikovoj-svjazi/sputnikovye-telefony-thuraya/) (дата обращения 01.07.2019).

К входам сумматора с номерами от «1» до «n» подключаются суммируемые по мощности СВЧ-генераторы, ко входу «0» – общая нагрузка, т. е. в рассматриваемом случае излучатель передающей антенны. Схема, свойства и параметры сумматора 1-го типа рассмотрены в [4, 5]. Поэтому дальнейшее изложение материала посвящено только сумматорам, используемым в системах 2-го типа, т. е. многолучевым.

В таких системах стремятся иметь один общий сумматор для всех лучей и, в зависимости от информационных потребностей того или иного луча, перераспределять мощность между ними. Таким образом, сумматор для многолучевых систем радиосвязи должен обладать двумя свойствами: суммировать мощности определенного числа СВЧ-транзисторных генераторов и перераспределять их мощности между лучами антенны. Такой режим работы устройства называется режимом «переливания» мощностей.

Структурная схема сумматора 2-го типа. Данная схема, реализующая режим «переливания» мощностей СВЧ-генераторов, приведена на рис. 3.



**Рис. 3.** Структурная схема сумматора 2-го типа:  
 ПФ – полосовой фильтр; РС-1 – 1-й разделитель сигналов;  
 РС-2 – 2-й разделитель сигналов; У – усилитель мощности сигнала.

Схема имеет N входов, к каждому из которых подводится сигнал одного из каналов (их число равно числу излучателей общей передающей антенны ретранслятора, представленной на рис. 1). Обозначим среднюю частоту поддиапазона частот каждого из каналов, как  $f_1, f_2, f_3 \dots f_n$ . Данные сигналы подводятся раздельно к общей схеме, а затем с помощью 1-го разделителя подводятся ко всем N усилителям СВЧ-сигнала. Таким образом, каждый усилитель участвует в усилении по мощности СВЧ-сигналов всех каналов. При линейном или даже близком к нему режиме работы СВЧ-усилителя мощность каждого из сигналов пропорциональна мощности входного сигнала на его входе. Таким образом, регулируя мощности входных сигналов в зависимости от объема передаваемой информации, можно «переливать» мощности выходных сигналов всех усилителей. Данная функция выполняется в схеме (рис. 3) с помощью 1-го разделителя.

С помощью 2-го разделителя производится суммирование мощностей сигналов с равными частотами и их разведение по разным излучателям: к 1-му излучателю подводится сигнал с частотой  $f_1$ , ко 2-му – с частотой  $f_2$ , ... к n-му – с частотой  $f_n$ .

Анализ схем сумматора 2-го типа на основе мостовых квадратурных устройств. Топология сумматора 2-го типа на основе несимметричных микрополосковых линий приведена на рис. 4.

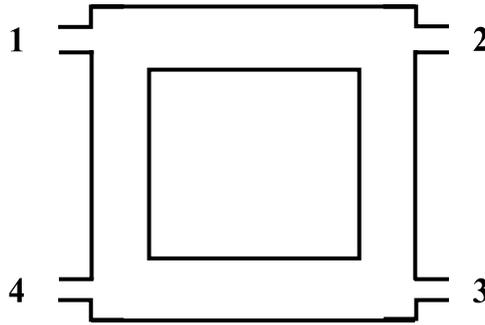


Рис. 4. Мостовое квадратурное устройство.

Матрица рассеяния такого мостового устройства, согласно [4], имеет вид:

$$S_m := \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & -i & -1 & 0 \\ -i & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -i \\ 0 & -1 & -i & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Схема с использованием такого «моста» по суммированию мощностей при двух лучах приведена на рис. 5.

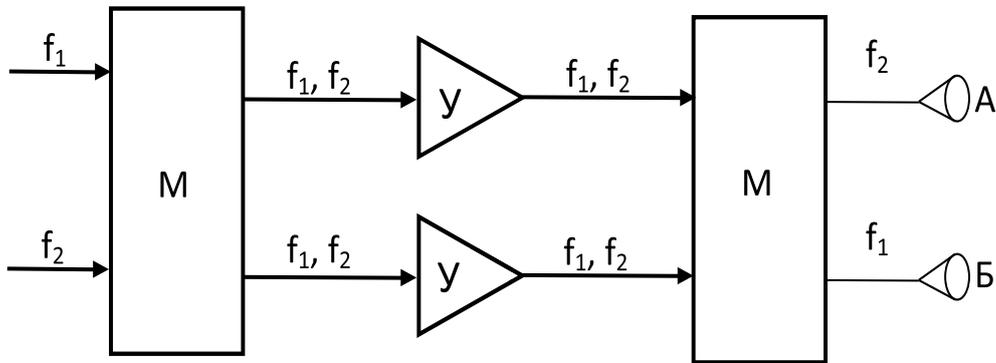


Рис. 5. Схема двухлучевой системы радиосвязи:  
 М – мостовые устройства квадратурного типа; Y – СВЧ-усилители.

Матрицу рассеяния схемы, приведенной на рис. 5, определим путем перемножения двух матриц (1). В результате получим:

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i & -1 & 0 \\ -i & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -i \\ 0 & -1 & -i & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & -i & -1 & 0 \\ -i & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -i \\ 0 & -1 & -i & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Схема с использованием такого мостового устройства по суммированию мощностей при четырех лучах приведена на рис. 6.

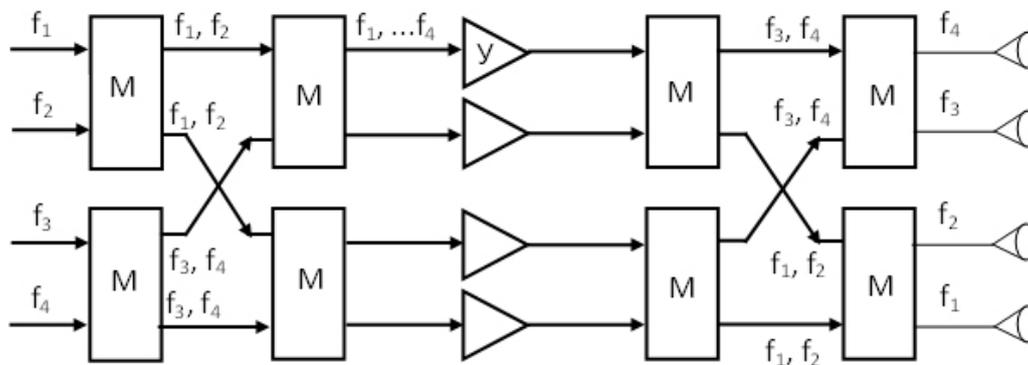


Рис. 6. Схема четырехлучевой системы радиосвязи:  
 М – мостовые устройства квадратурного типа.

Матрица рассеяния схемы, представленной на рис. 6, имеет вид:

$$S_{\text{сх}} := \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i \cdot 3\pi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i \cdot 3\pi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i \cdot 3\pi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -i \cdot 3\pi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -i \cdot 3\pi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \cdot 3\pi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -i \cdot 3\pi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -i \cdot 3\pi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Из анализа матриц (2) и (3) следует, что с помощью рассмотренной схемы, основанной на мостовых квадратурных устройствах, можно не только суммировать мощности сигналов, но и распределять их между разными излучателями. Меняя мощность входного сигнала, можно «переливать» мощность из одного луча в другой в зависимости от объема передаваемой информации.

Можно показать, что такую же матрицу диагонального типа, как (3), можно с помощью мостовых квадратурных устройств получить и при числе лучей N, равном 8, 16 и 32.

### Выводы

1. Составлена матрица сумматора для многолучевых систем радиосвязи, отвечающая двум требованиям: суммированию мощностей СВЧ-генераторов и перераспределению («переливанию») мощностей сигналов между лучами передающей антенны спутникового ретранслятора в зависимости от загрузки канала связи.

2. Составлена структурная схема сумматора на основе мостовых квадратурных устройств, отвечающая двум данным требованиям и позволяющая перераспределять мощность группы СВЧ-генераторов между лучами в широких пределах: от равного распределения мощности между каналами до сосредоточения всей мощности в одном из каналов.

## Литература:

1. Немировский М.С. Беспроводные технологии от последней мили до последнего дюйма. М.: Эко-Трендз, 2010. 400 с.
2. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.
3. Гавриков В.А. Мощные нитрид-галлиевые транзисторы (GaN) от EPC – конец эры кремния? // Новости электроники. 2015. № 7. С. 3–11.
4. Каганов В.И. СВЧ-полупроводниковые радиопередатчики. М.: Радио и связь, 1981. 397 с.
5. Каганов В.И. Транзисторные радиопередатчики. М.: Энергия, 1976. 448 с.

## References:

1. Nemirovsky M.S. Wireless technology from the last mile to the last inch. Moscow: Eko-Trendz Publ., 2010. 400 p., (in Russ.).
2. Voskresensky D.I., Gostyukhin V.L., Maximov V.M., Ponomarev L.I. Microwave devices and antennas. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2006. 376 p., (in Russ.).
3. Gavrikov V.A. Powerful gallium nitride transistors (GaN) from EPC – the end of an era of silicon? *Novosti elektroniki* [Electronics News]. 2015; 7:3-11, (in Russ.).
4. Kaganov V.I. Microwave semiconductor radio transmitters. Moscow: Radio and svyaz' Publ., 1981. 397 p., (in Russ.).
5. Kaganov V.I. Transistor radio transmitters. Moscow: Energiya Publ., 1976. 448 p., (in Russ.).

### *Сведения об авторах:*

**Каганов Вильям Ильич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Фам Ки**, гражданин Социалистической Республики Вьетнам, магистр, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов, Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

### *About the authors:*

**William I. Kaganov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of the Chair of Radioelectronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Fam Ki**, citizen of the Socialist Republic of Vietnam, Master, Postgraduate Student of the Chair of Radioelectronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Для цитирования:** Каганов В.И., Фам Ки. Перераспределение мощности сигналов в многолучевых системах радиосвязи // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 54–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-54-59>

**For citation:** Kaganov W.I., Fam Ky. Redistribution of signals power in multipath system of radio communication. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):54-59, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-54-59>

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-60-70>



UDC 621.3.049.774

## Design for Testability of Integrated Circuits and Project Protection Difficulties

**Evgeny Ph. Pevtsov<sup>@</sup>,**  
**Tatiana A. Demenkova,**  
**Alexander A. Shnyakin**

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

Design solutions of domestic VLSI were obtained as a result of the application of computer-aided design tools of a foreign supplier (CAD Synopsys, Cadence Design Systems and Mentor Graphics), based on standard libraries of PDK elements (Project Design KIT) of factories and IC-modules also supplied mainly by foreign companies. As a rule, the developer does not have its own production facilities, using the services provided by foreign factories (fabless-companies). Due to this fact, relevant are the studies aimed at the development of a complex of measures, excluding the possibility of unauthorized changes into IC, i.e. protection of projects against intentional hardware and technology violations made during the formation of the control information for handing it over to the production facility and/or in case of IC manufacture at the factory. This paper considers this task from the standpoint of the analysis of the methodology of design for testability (DFT), i.e., a complex of measures that provide obtaining solutions at the design stage. The solutions include the verification of the correct performance of the manufactured chip by means of external tests and/or self-testing procedures. It was proposed, inter alia: 1) to analyze the libraries of standard elements used in the project with full disclosure of their specifications; 2) to create nodes with the physical non-cloning function in the projects on the basis of the libraries of standard elements in models and analysis programs; 3) to analyze IP modules used in the project with the maximum disclosure of structure, methods and algorithms for providing test coverings; 4) to provide for the development in projects of special test kits and methods of their generation at the design stage of functions in order to detect malicious nodes and programs both within SoC cores and at the level of system buses; 5) to develop at the design stage and to apply during tests a technique of special hardware measurements of parameters of the manufactured circuits and analysis of their results, inter alia, according to measurements of delays in distribution of signals and/or buses current consumption.

**Keywords:** design for testability, instrument bugs/Trojans, IC project verification, test coverings, self-testing units, design for security.

## Тестопригодное проектирование интегральных схем и проблемы защиты проектов

**Е.Ф. Певцов<sup>@</sup>,**  
**Т.А. Деменкова,**  
**А.А. Шнякин**

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

Проектные решения отечественных СБИС получены в результате применения инструментов автоматизированного проектирования зарубежного поставщика (САПР Synopsys, Cadence Design Systems и Mentor Graphics) на основе библиотек стандартных элементов PDK (Project Design KIT) фабрик и IP-модулей, поставщиками которых также являются в основном зарубежные компании. Как правило, компания-разработчик не имеет собственных производственных мощностей, пользуясь услугами иностранных фабрик (fabless-компаний). В этой связи актуальными являются исследования по созданию комплекса мер, исключающих возможности внесения несанкционированных изменений в интегральные схемы (ИС), т. е. защиты проектов от намеренных аппаратных и технологических нарушений, вносимых при формировании управляющей информации для передачи на производство и/или при изготовлении ИС на фабрике. В данной работе эта проблема рассматривается с позиций анализа методологии тестопригодного проектирования (DFT), т.е. комплекса мер, предусматривающих на этапе проектирования получение решений, в которых заложены проверки правильного функционирования изготовленной микросхемы с помощью внешних тестов и/или процедуры самотестирования. Предложено, в частности: 1) проводить анализ применяемых в проекте библиотек стандартных элементов с полным раскрытием их спецификации; 2) на основе библиотек стандартных элементов моделей и программ анализа создавать в проектах узлы с функцией физического неклонирования; 3) проводить анализ применяемых в проекте IP-модулей с максимальным раскрытием структуры, методов и алгоритмов обеспечения тестового покрытия; 4) предусматривать в проектах разработку специальных тестовых наборов и методов их генерации на этапе проектирования функций с целью обнаружения вредоносных узлов и программ как внутри ядер СнК, так и на уровне системных шин; 5) разрабатывать на этапе проектирования и применять при тестах методики специальных аппаратных измерений параметров изготовленных схем и анализа их результатов, в частности, по данным измерений задержек распространения сигналов и/или токов потребления шин.

**Ключевые слова:** тестопригодное проектирование, аппаратные закладки/трояны, верификация проекта ИС, тестовые покрытия, узлы самотестирования.

### Introduction

Despite numerous procedures of verification of an IC project, chips that have already been manufactured may contain defects that disrupt its performance. A breach of functional specifications may be due to both objective factors, such as defects in raw materials or fluctuations in technological modes, and to subjective ones, intentional changes (hardware

Trojans). Verification of IC after its manufacture is a complex and expensive procedure that requires the solution of a whole range of engineering tasks. The contemporary approach to IC design is based on the concept of embedding additional components into the project. They are specifically designed to check VLSI for defects. Such design methodology with the possibility of testing or designing for the implementation of controllability (Design for Testability, DFT) is currently an integral part of all commercial integrated circuit projects, such as microprocessors, systems on chip or systems in package [1–3].

### Design for testability methods

Any DFT project is based on two components: 1) implementation of the necessary links (connections or circuits) inside the IC to ensure complex effective testing and 2) application of test templates (test vectors), which are specially designed sets of effects on IC inputs and the adequate expected sets of signals at the outputs.

According to the generally accepted classification, performance tests of the finished ICs are divided into: 1) diagnostic, when the developer performs a targeted search for a defective node; 2) functional, determining compliance with the specification stated in the technical specification; 3) parametric, designed to test certain parameters. These parameters can be, inter alia, maximum clock-rate, immunity to noise, temperature, etc. An integral part of testing is specialized automated testing equipment, the cost of which is rather high.

While implementing DFT strategy, one should consider that the test covering, which provides for the enumeration of all possible combinations of input signals, considering VLSI of the microprocessor as a serial device with a set of output statuses determined by the inputs and internal statuses (Mealy machine) is almost impossible, as it will require resources impractical from the technical point of view. The following two circumstances provide guiding ideas for the process of the combinatorial circuit tests design: 1) optimization of the test covering volume at the level of 95–99%, and 2) the impact of one defect can manifest in the whole range of input signals, so one test pattern is enough to identify a specific defect, while all the others detecting the same failure are redundant.

When testing the sequential circuits, the number of required input test vectors increases significantly due to the fact that before applying a particular effect, firstly, it is necessary to bring circuits to a certain initial condition, and secondly, to ensure the transfer of the circuit response to these patterns to one of the outputs. Accordingly, while implementing the DFT concept, it is necessary to analyze the controllability and observability of specific project components.

Since the number of internal statuses of a circuit can be very large, the number of input vectors required to test only one specific sequential circuit error becomes unacceptably large. As a result, the original (special, ad hoc) methods can be applied in the design process. The following are typical examples:

- 1) Introduction of additional hardware into the circuit. This facilitates the testing, but produces no effect on the functional features of the circuit.
- 2) Introduction of additional inputs and outputs and adding test points into the circuit. They serve for the testing process implementation.
- 3) Partitioning of large finite state automation.
- 4) Introduction of special test buses.

In any case, the effectiveness of such methods depends on the subjective properties of the developer, inter alia, his qualifications and experience, which cannot be taken into account in

the design automation process. Therefore, the following two common unified methods (e.g., see [3]) are integrated and applied in contemporary VLSI CAD systems:

1) Testing based on scanning (boundary scan), when the feedback loops break in the process of testing, and the sequential circuit is converted into a combinatorial one, and peripheral scanning of the circuit is being performed.

2) Built-in self-test (BIST), when modules are embedded into the integrated circuit, providing the self-test opportunity without the application of external templates or with a minimum number of them (the self-control concept).

The contemporary design implementation with a sequential scanning for the first time assumes that the circuit registers are modified so that, in addition to the normal operation mode in the test mode, they are sequentially connected and form a sequential shift register. A simple example illustrating this approach is shown in Fig. 1.

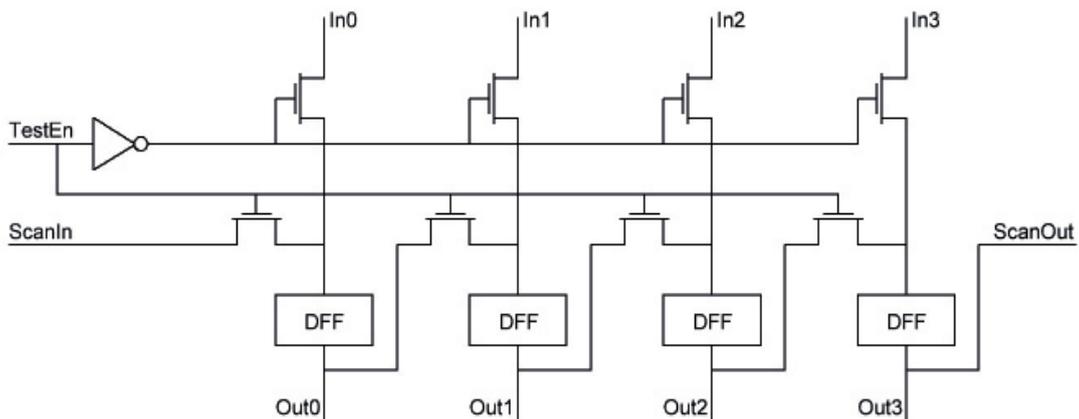


Fig. 1. Diagram of a 4-bit register with a sequential scan chain.

When the «Test» signal level is low, the circuit is in the normal operation mode. In the test mode, «ScanIn» input is activated, and the registers are connected into the scan chain so that the 4-bit register output is connected to the output branching logic and is duplicated at «ScanOut» output, which is in turn connected to «ScanIn» input of the adjacent register.

The most common and technically complete solution of the sequential scanning is the status scan method (Level-Sensitive Scan Design – LSSD), the main idea of which is to use the shift register latch (SRL), the operation of which is shown in Fig. 2.

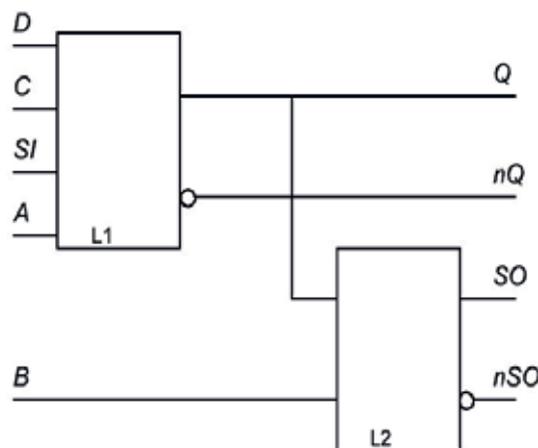


Fig. 2. Shift Register Latch.

The circuit consists of two latches, and the second one is used only when scanning. In the normal mode, A and B inputs are at low level and D, C and Q signals form data inputs, clocking and output, respectively. In the scan mode, the clock signal is generated by the low C level, SI is the input, and SO is the output, while A and B operate as two-phase clock signals of the test mode.

LSSD method is widely applied in the test automation programs. IEEE 1149 standard is currently the regulatory document for the organization of scanning systems.

The self-control methodology is an alternative to scanning, which is increasingly applied in the automation of VLSI and ICS design. In this case, the circuit itself generates tests and checks their results. Tests can be exhaustive, i.e., detecting all possible failures, which requires a lot of resources. In practice, a random subset is formed from the whole range of possible input signals.

Analysis and model description of possible circuit faults always comes before the automated development of test codes. In the most critical cases, the standard models of short-circuit defects such as stuck-at-zero (sa0) and stuck-at-one (sa1) can be added to the fault models of such types as «permanently open transistor» or «open circuit» (stuck-at-open) and stuck-at-short. However, the addition of these faults requires proper justification, as it leads to a significant complication in the process of generating test codes, while many faults of this type can be replaced by sa1 or sa0.

In the process of automatic generation of test codes, a minimum amount of test vectors is set. It is usually assigned on a random basis, but covering most of the errors in the circuit. Determining the minimum amount of test vectors is based on the accepted fault model and special algorithms and is a complex technical task, which belongs to one of the intensive areas of development in the field of computer-aided design and is solved by CAD developers in a different manner. As a standard example illustrating the research nature of such activities one can mention the work [4] performed by the MIREA – Russian Technological University. During the work, inter alia, a software tool for automating the methods of the test systems building was developed on the basis of the proposed methods of dynamic verification of system exchange modules and universal verification technology. This allowed more than 30% reduction of the labor costs for the development of test systems for dynamic verification of system exchange modules in the course of development of the domestic microprocessors of a new generation [5].

The example of a pseudorandom generator of a subset of input signals is the circuit of N sequentially connected one-bit registers with an EXCLUSIVE OR element connected to two of them, the output of which is supplied to the input of the first register. Thus, Linear Feedback Shift Register – LFSR is formed, which runs through  $2^N - 1$  statuses, which is a pseudorandom sequence, and the initial register loading determines which pseudorandom sequence will be formed.

The response analyzer is a compare circuit with possible statuses, the sets of which are stored inside the circuit memory. To reduce service costs a response compression method is applied before comparison. This approach is called a signature analysis, because in this case the response analyzer consists of the output dynamic compression circuit of the tested circuit and the comparator. The simplest single-bit stream signature generator counting the number of transitions from zero to one and from one to zero is presented in Fig. 3.

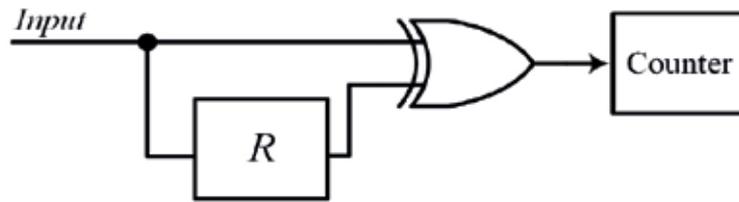


Fig. 3. Example of the circuit signature generator.

Matching of the received signature with the predetermined one can be considered as a successful passing of the test, since the probability of obtaining a signature match with an erroneous sequence of transitions is small.

The circuit combining the modules of test code generation and signature analysis is a modification of the self-testing methodology. In this case, the EXCLUSIVE OR operation is applied to the output word and LFSR content, forming a test signature at the end of the test sequence. In case of such activation, by means of the actuating signals the circuit can be switched from the test configuration to the shift register or to the scanning shift register. This method is called the built-in logic block observation – BILBO. The three-bit BILBO controller circuit is shown in table and Fig. 4.

Three-bit BILBO controller operating modes

B0	B1	State
1	1	Normal Operation
0	0	Scan
1	0	Pattern Generation or Analysis
0	1	Reset

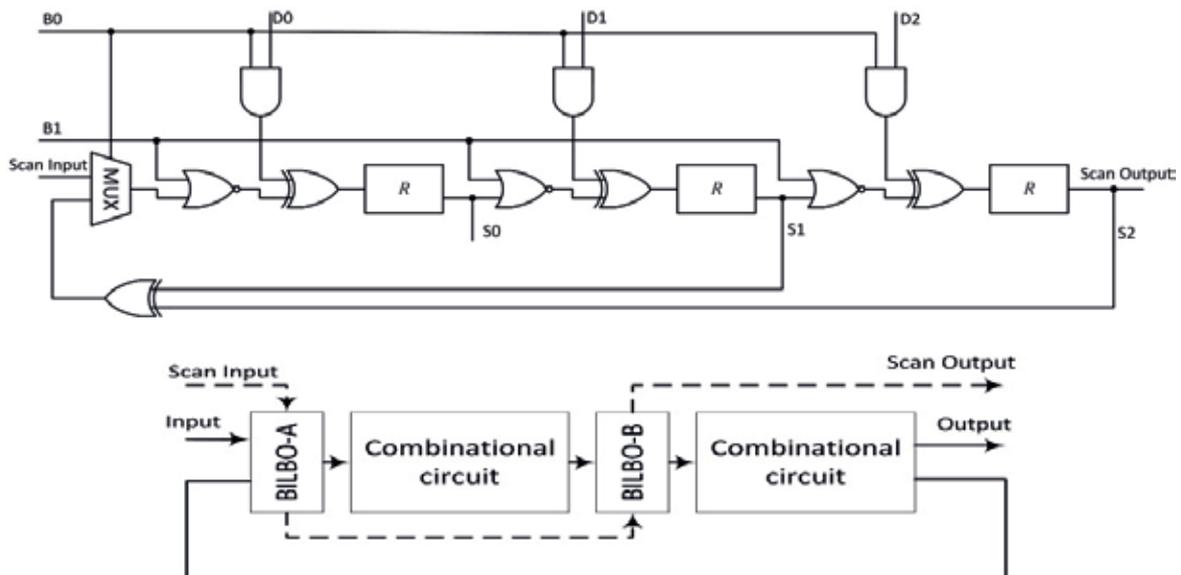


Fig. 4. Three-bit BILBO controller circuit and its operating modes.

Before the test some number is loaded into the register A of the circuit that initializes the register B. The register A operates in the mode of generating pseudorandom codes, while the register B, in the signature analysis mode. The signature is read from B upon the completion of the test sequence transfer.

### Difficulties of determining the project malfunctions

Contemporary VLSI can not only be systems on chip (SoC), but also systems in package (SiP). In this case, due to the fact that each chip can have its own testing system, the entire assembly test can only be performed using a built-in self-test. ICS test concept involves the inclusion of test modules into the configurable interface nodes connecting the chips and providing synchronization and data exchange. Development of ICS design and verification ideology is, inter alia, represented through an increase in the level of project abstraction aimed at the application of higher-level languages in CAD [6].

Despite numerous procedures of IC project verification, chips that have already been manufactured may contain defects that disrupt its performance. A breach of functional specifications may be due to both objective factors, such as defects in raw materials or fluctuations in technological modes, and subjective ones, intentional changes (hardware Trojans). Verification of IC after its manufacture is a complex and expensive procedure that requires the solution of a whole range of engineering tasks. The detailed analysis of possible threats caused by the violation of functions of the executed projects is represented in the monograph [7].

Protection of integrated circuits and systems based on them, which is aimed at identifying and eliminating unnecessary interventions into the design solutions, should be implemented through various methods. In particular: 1) at the level of standard project library elements testing; 2) by means of IC boundary scan systems; 3) by means of an appropriate upgrade of vulnerable software. Detailed studies of this task and analysis of their results show that the development of trusted intelligent data processing systems is a complex scientific and technical task that requires thorough analysis and research to develop grounded technical solutions at all the design stages. In the microelectronics CAD market, the testing solutions are mainly represented by major DFT suppliers in the field (Cadence Design Systems, Mentor Graphics, Synopsys). These packages vary significantly in terms of technology, design overhead costs, design rules, and ease of use.

It is obligatory for the structure of contemporary CAD to contain 1) modules for checking the implementation of design rules (design Rules Check, DRC) set by the manufacturer and 2) modules for checking the compliance of the pattern of the obtained topology and functional diagram of the device (Layout Versus Schematic, LVS). The correct application of the rules and LVS tools in principle provides for conducting the analysis of intentional or unintentional errors in the chip topology after its manufacture. The set of standard library elements (valves, logic cells, triggers, etc.) serves the basis of any project. Thus, conformance testing of the behavioral description and the results of the designed operations is the necessary stage of IC. Such testing is carried out by modeling in specialized tools of different CAD manufacturers (Cadence Design Systems, Synopsys and Mentor Graphics) and comparative analysis of the results. The developed method of conformance testing of topology and the electrical circuit was checked using test chips. The method consists of the following procedures: recognizing circuit elements by a topological pattern; restoring links between the elements; forming chains of connection (net list) matching the real electric circuit; comparing the extracted net list with the original one.

Recognition of circuit elements by topological pattern is based on the preliminary geometric processing of the topology pattern for layer-by-layer coding of the contours of all elements of the

topology and subsequent application of logical operations with the figures in order to identify transistors, interconnects and other circuit elements. E.g.: «polysilicon layer» – AND operation – «diffusion layer» = «transistor channel»; «diffusion layer» – AND operation – «metal layer» – AND operation – «contact layer» = «transistor output».

Restoration of links between the elements is carried out by monitoring the routes of the identified interconnects connecting the outputs of the identified elements with subsequent conformance testing of the topology and the electric circuit. The method analysis demonstrated that it is more effective to compare the connections at the logical level, not at the level of transistors.

The report on testing results contains: information about the match of the output data of the Spectre and Verilog simulation; check for compliance with the design rules of the manufacturer; check for errors in LVS report. Contemporary CAD tools provide the opportunity for detailed research and analysis of a particular element operation. Cadence NC-Verilog simulator combined with SimVision visualization tool can serve as an example, as well as Spectre MDL and Cadence ViVA.

Special hardware protection modules built into IC, the control of which will allow the developer to identify possible bugs and breaches that can lead to operation failures and correct them, serve as an additional measure of protection of IC projects manufactured by foreign companies. The detailed development of such modules should be project-specific and is a subject of separate studies. IEEE Std 1500 standard is the basis of such methods, according to which each core of the designed system on chip should have a test harnessing. A detailed description of hardware and software methods to counter malicious inclusions into chips and design for IC security purposes is given in the papers [7, 8].

A significant addition to CAD tools providing for verification and even correction of the already manufactured chips is represented by the methods for analyzing IC topology. The methods are based on the technology of the ion beams preparation. Examples of such studies are presented in publications [9].

Thus, in terms of the analysis of possible breaches of project integrity and development of the requirement to the description and structure of models of standard digital circuits and complex functional modules, one can make the following conclusions.

Contemporary VLSI CAD applications provide for achieving the full covering of the project, but the resources required for this purpose can be non-optimal, both in terms of time required and the cost of test equipment. As a result the control of the functional integrity of the project is possible with some degree of probability.

The built-in self-testing units are usually generated automatically in the form of RTL code or part of a netlist and are difficult to distinguish from units also included in the project, but performing any other function, inter alia, a malicious one. The correctly implemented means of scan testing and built-in self-testing can confirm only the completeness of the project functionality, but not redundancy, especially if the redundant functions are not activated by digital signals of the circuit, or the results of its operation do not affect the basic functionality of the circuit.

The test circuits generating means, both scanning circuits and built-in self-testing can pose threats to information security, since VLSI CAD software products are proprietary, and their source code is closed, and control of the project changes made by the test generation programs is performed by these means.

It is essential that in the standard design flow, usually provided by the manufacturer in the form of PDK, standard testing tools are not designed to control the topological integrity of the

project. Formal verification of the project, both before and after the implementation of testing circuits, for the presence of changes in the functionality of the project itself may not reveal the breach done, especially if the formal verification is carried out by means of CAD of the same manufacturer as CAD for the testing circuits' generation.

As long as all contemporary developments of domestic VLSI are manufactured with varying degrees of the foreign companies involvement, a prerequisite for ensuring the reliable operation of these products is the development and implementation of special organizational and technical measures aimed at analysis, identification and elimination of possible distortion of projects in the form of software and/or instrument bugs directly at the design stage, inter alia, in the form of nodes complementing scanning and self-testing modules. Such measures, inter alia, are:

- Analysis of the libraries of standard elements used in the project with complete disclosure of their specifications, i.e., descriptions at the topology level, circuit diagrams and methods of checking design and verification rules.
- Creation on the basis of libraries of standard elements in models and programs of the analysis of special nodes with a function of physical non-cloning, serving as standards for comparison with results of tests and the manufactured chip.
- Analysis of IP modules used in the project with the maximum disclosure of the internal structure, and especially the methods and algorithms for providing test covering and circuits for peripheral scanning and/or built-in self-testing nodes.
- Introduction of special modules (IP-infrastructure Security-IIPS [10]) into the project, which are complex functional units specifically designed to check for protection against possible bugs (hardware Trojans).
- Development of special test kits and methods of their generation at the function design stage to detect malicious nodes and programs both inside SoC cores and at the level of system buses.
- Development of methods for special hardware measurements of the manufactured circuits parameters and analysis of their results, inter alia, according to the measurement of delays in signal propagation and/or bus consumption currents.

### Conclusions

Specific examples show that the protection of integrated circuits and systems based on them, the purpose of which is to identify and eliminate undesirable interference in design solutions, should be implemented by various methods: at the level of standard project library elements testing; by means of IC boundary scan systems and by means of appropriate upgrade of vulnerable software. Performed studies and analysis of their results show that development of trusted intelligent data processing systems is a complex scientific and technical task that requires thorough analysis and research to develop grounded technical solutions at all the design stages.

### Acknowledgments

The work was carried out within the framework of the state order with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № 8.5098.2017/8.9).

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного заказа при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 8.5098.2017/8.9).

## References:

1. Wong B.P., Mittal A., Starr G. Nano-CMOS circuit and physical design. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2014. 432 p., (in Russ.).
2. Wang L.T., Chang Y.W., Cheng K.T.T. Electronic design automation: Synthesis, verification, and test. New York: Morgan Kaufmann, 2009. 971 p.
3. Rabai Jean M., Chandrakasan A., Nikolic B. Digital integrated circuits. Design methodology: 2nd ed. Moscow: Publishing House Williams, 2016. 912 p., (in Russ.).
4. Stotland I.A. An approach to simulation-based verification of interconnection modules of microprocessor computer systems. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Volga region Bulletin]. 2012; (4):191-196, (in Russ.).
5. Bobkov S.G. Development of high-performance trusted computing systems based on KOMDIV microprocessors. *Nanoindustriya* [Nanoindustry]. 2017; S(74):14-17, (in Russ.).
6. Gubarev V.A., Voronkov S.O., Antufeev G.V. System modeling of digital devices in the style of block design. *Voprosy radioelektroniki. Seriya «Elektronnaya vychislitel'naya tekhnika» (EVT)* [Issues of Radio Electronics. Series: Electronic Computing]. 2012; 2:138-146, (in Russ.).
7. Belous A.I., Solodukha V.A., Shvedov S.V. Software and hardware Trojans-ways of implementation and methods of counteraction. The first technical encyclopedia: in 2 v. Ed. A.I. Bilous. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2018. 1318 p., (in Russ.).
8. IEEE 1500 Embedded Core Test. URL: <http://grouper.ieee.org/groups/1500>.
9. Shnyakin A.A., Pevtsov E.Ph., Demenkova T.A. Improving the functionality of the semiconductor matrix receiver of optical radiation. In: Proceed. VII Int. Conf. «Modern Technologies for Non-Destructive Testing» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018; 457: 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/457/1/012015>

## Литература:

1. Вонг Б.П. Миттал А., Старр Г. Нано-КМОП-схемы и проектирование на физическом уровне. М.: Техносфера, 2014. 432 с.
2. Wang L.T., Chang Y.W., Cheng K.T.T. Electronic design automation: Synthesis, verification, and test. New York: Morgan Kaufmann, 2009. 971 p.
3. Рабаи Жан М., Чандракасан А., Николич Б. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. 2-е изд.: Пер. с англ. М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2016. 912 с.
4. Стотланд И.А. Метод динамической верификации модулей системного обмена микропроцессорных вычислительных комплексов // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 4. С. 191–196.
5. Бобков С.Г. Создание высокопроизводительных доверенных систем на базе микропроцессоров с архитектурой КОМДИВ // Наноиндустрия. 2017. № S(74). С. 14–17.
6. Губарев В.А., Воронков С.О., Антюфеев Г.В. Системное моделирование цифровых устройств в стиле блочного проектирования СБИС СнК // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Электронная вычислительная техника (ЭВТ)». 2012. Вып. 2. С. 138–146.
7. Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Программные и аппаратные трояны – способы внедрения и методы противодействия. Первая техническая энциклопедия: в 2-х кн. / Под. общ. ред. А.И. Белоуса. М.: Техносфера, 2018. 1318 с.
8. IEEE 1500 Embedded Core Test. URL: <http://grouper.ieee.org/groups/1500> (дата обращения 01.07.2019).
9. Shnyakin A.A., Pevtsov E.Ph., Demenkova T.A. Improving the functionality of the semiconductor matrix receiver of optical radiation // In: Proceed. VII Int. Conf. «Modern Technologies for Non-Destructive Testing» IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2018. V. 457. P. 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/457/1/012015>

### About the authors:

**Evgeny Ph. Pevtsov**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Director of the Center for Design of Integrated Circuits, Devices of Nanoelectronics and Microsystems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 6602652601, ResearcherID M-2709-2016, <https://orcid.org/0000-0001-6264-1231>.

**Tatiana A. Demenkova**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Chair of Computer Technology, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus author ID 57192958412, <https://orcid.org/0000-0003-3519-6683>.

**Alexander A. Shnyakin**, Programmer of the Center for Design of Integrated Circuits, Devices of Nanoelectronics and Microsystems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

### *Об авторах:*

**Певцов Евгений Филиппович**, кандидат технических наук, доцент, директор Центра проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 6602652601, ResearcherID M-2709-2016, <https://orcid.org/0000-0001-6264-1231>.

**Деменкова Татьяна Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 57192958412, <https://orcid.org/0000-0003-3519-6683>.

**Шнякин Александр Андреевич**, программист Центра проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**For citation:** Pevtsov E.Ph., Demenkova T.A., Shnyakin A.A. Design for testability of integrated circuits and project protection difficulties. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):60-70, <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-60-70>

**Для цитирования:** Pevtsov E.Ph., Demenkova T.A., Shnyakin A.A. Design for testability of integrated circuits and project protection difficulties // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 60–70. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-60-70>

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>



УДК 621.311.6:621.3.089.2

## Комплексный показатель преломления титаната стронция в терагерцовом диапазоне частот

**В.Р. Билык<sup>@</sup>,**  
**К.А. Гришунин**

*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*  
*@Автор для переписки, e-mail: vrbilyk@mail.ru*

Современное развитие терагерцовой спектроскопии во временной области (THz-TDS) позволяет проводить более точные и достоверные измерения диэлектрических свойств по сравнению с традиционной инфракрасной спектроскопией с использованием некогерентного источника света. Широкополосная THz-TDS является мощным инструментом для определения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости при прохождении ТГц-излучения, которая позволяет определять параметры мягких мод в сегнетоэлектриках. В данной работе методом терагерцовой спектроскопии с временным разрешением исследована зависимость комплексного показателя преломления монокристаллического квантового параэлектрика титаната стронция в терагерцовом диапазоне частот от 0.3 до 1.3 ТГц. Показано, что низкочастотный терагерцовый отклик материала обусловлен доминированием мягкой фононной моды  $TO_1$ . Измеренные экспериментальные зависимости показали хорошее сходство с теоретическими кривыми, полученными из анализа модели осциллятора Лоренца для комплексной диэлектрической проницаемости титаната стронция. Результаты работы важны для понимания принципиальной возможности возбуждения параметра порядка в сегнетоэлектрических материалах и могут быть использованы для создания энергоэффективных устройств памяти со скоростью записи информации, близкой к теоретическому пределу.

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, сегнетоэлектрик, терагерцовая спектроскопия.

## Complex Refractive Index of Strontium Titanate in the Terahertz Frequency Range

**Vladislav R. Bilyk<sup>@</sup>,**  
**Kirill A. Grishunin**

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

The recent progress in terahertz time-domain spectroscopy enables the accurate and reliable measurements of dielectric properties in comparison with the traditional far-infrared spectroscopy using an incoherent light source. The broadband THz-TDS is a powerful tool to determine the real and imaginary parts of a complex dielectric constant by the transmission which allows to detect the parameters of the soft modes in ferroelectrics. In this work, the terahertz time-domain spectroscopy was used to investigate the dependence of the complex refractive index of a single-crystal quantum paraelectric strontium titanate in the terahertz frequency range from 0.3 to 2 THz. It was shown that the low-frequency terahertz response of the material is determined by the soft phonon mode TO1. The measured experimental dependences showed a good agreement with the theoretical curves obtained from the analysis of the Lorentz oscillator model for the complex dielectric constant of strontium titanate. The obtained results are necessary for understanding the principle of possibility to manipulate the order parameter in ferroelectric materials and can be used to create energy-efficient memory devices with a speed of recording information close to the theoretical limit.

**Keywords:** terahertz radiation, ferroelectricity, terahertz spectroscopy.

### Введение

С момента открытия полярной мягкой моды в кристалле титаната стронция ( $\text{SrTiO}_3$ ) возник большой интерес и появились попытки понять поведение диэлектрических свойств данного материала, в частности, изучить взаимосвязь между диэлектрическими свойствами и оптическими фоновыми характеристиками [1–3].

Титанат стронция является потенциальным сегнетоэлектриком со структурой перовскита  $\text{ABO}_3$ . С одной стороны, его диэлектрическое поведение полностью контролируется за счет динамики мягкой моды [4], с другой стороны, переход из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу не происходит вплоть до температуры абсолютного нуля, так как подавлен квантовыми флуктуациями [5]. Эти свойства, а также возможность получения высококачественных тонких пленок, делают  $\text{SrTiO}_3$  материалом для применения в перестраиваемых микроволновых компонентах [6]. Зависимость его диэлектрической проницаемости от постоянного тока [7] и низкие диэлектрические потери в микроволновом диапазоне при комнатной температуре [8] могут быть достигнуты путем химического замещения атомов стронция твердыми растворами титаната бария-стронция [9] или путем введения растягивающей деформации за счет правильного выбора подложки для эпитаксиального роста тонкой пленки.

Благодаря высокому значению статической диэлектрической проницаемости [10, 11],  $\text{SrTiO}_3$  широко используется также в производстве конденсаторных структур с высокой плотностью записи информации [12, 13], таких, как динамическая память с произвольным доступом (DRAM) [14].

Недавно было показано [15–17], что вышеперечисленные характеристики делают  $\text{SrTiO}_3$  предпочтительным материалом для применения в терагерцовых устройствах, в частности, в устройствах управления и перестройки терагерцового излучения. С развитием области генерации и детектирования терагерцового излучения методы статической и терагерцовой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDS) превратились в универсальные методы для характеристики полной диэлектрической функции широкого

спектра материалов в дальней инфракрасной области спектра [18]. Первое применение такого рода спектроскопии было осуществлено для паров воды, содержащихся в окружающей атмосфере [19]. Впоследствии удалось экспериментально измерить коэффициенты поглощения и показатель преломления для целого ряда диэлектриков и полупроводников [20].

В представленной работе изучен диэлектрический отклик от монокристаллического образца титаната стронция  $\text{SrTiO}_3$  в диапазоне частот 0.3–1.3 ТГц с использованием методики терагерцовой спектроскопии с временным разрешением. По сравнению с другими методами определения характеристик материалов терагерцовая спектроскопия во временной области имеет ряд преимуществ [21, 22], а именно в частности, возможность изучать удаленно, без использования электродов, сложную диэлектрическую дисперсию материала путем измерения электрического поля когерентных терагерцевых волн. Экспериментальные результаты объяснены в рамках модели Друде–Лоренца.

### Методическая часть

Исследуемый образец представлял собой монокристалл  $\text{SrTiO}_3$  с размерами  $0.5 \times 0.5 \times 0.14$  мм и ориентацией  $\langle 100 \rangle$ . Рабочие поверхности образца имели полированную до оптического качества поверхность. Для исключения влияния механических напряжений образец закрепляли только с одного торца. Поверхность рядом с образцом закрывали алюминиевой фольгой, блокирующей ТГц-излучение.

Титанат стронция обладает объемным структурным фазовым переходом  $m3m \rightarrow 4/mmm$  (из centrosymmetric в centrosymmetric фазу) при температуре  $T_c = 105$  К, что делает его оптически изотропным. На его элементарную ячейку приходится пять атомов, что приводит к четырем трижды вырожденным оптическим модам с частотами 90, 170, 539 и 793  $\text{см}^{-1}$ , соответственно [3, 23–26]. Характерным поведением таких сегнетоэлектриков является высокое значение диэлектрической проницаемости, которое зависит от температуры в соответствии с законом Кюри–Вейсса [27]:

$$\varepsilon_0 \propto 1 / (T - T_c),$$

где  $\varepsilon_0$  – статическая диэлектрическая проницаемость.

Экстраполированная температура Кюри составляет  $T_c = 40$  К. Хотя  $\text{SrTiO}_3$  фактически никогда не претерпевает сегнетоэлектрический переход, а зависимость Кюри–Вейсса применима только для  $T > 50$  К [3], его переход в сегнетоэлектрическое состояние возможен путем приложения механического [28, 29] или электрического напряжения [30], а также путем легирования [31].

ТГц-излучение генерировалось за счет эффекта оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов ИК-диапазона ( $\lambda = 800$  нм,  $\tau = 100$  фс) в электрооптическом кристалле  $\text{ZnTe}$ . Для компенсации расходимости и фокусировки ТГц-излучения использовались внеосевые параболические зеркала, фокусные расстояния которых были подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимальный размера пятна, ограниченно дифракционным пределом, в области образца.

Для измерения временных форм падающего и прошедшего через образец ТГц-импульсов использовался метод электрооптического стробирования [32]. Схема установки представлена на рис. 1. Расходящийся ТГц-пучок, прошедший через точку фокуса

на месте образца, собирался и фокусировался второй парой параболических зеркал на кристалле-детекторе ZnTe. Зондирующий импульс ИК-диапазона пространственно и во времени совмещался с ТГц-импульсом на электрооптическом кристалле. При отсутствии ТГц-поля линейно-поляризованные импульсы ИК-излучения проходят через электрооптический кристалл без изменения. Затем, проходя через фазовую пластинку  $\lambda/4$ , две взаимно-перпендикулярные компоненты поляризации пространственно разделяются с помощью призмы Волластона и детектируются с помощью балансного фотодиода. Так как после прохождения четвертьволновой пластинки ИК-луч имеет круговую поляризацию, то сигнал с разностного канала балансного фотодетектора будет нулевым. В случае, когда ТГц- и ИК-импульсы одновременно приходят на электрооптический кристалл ZnTe, ИК-импульс испытывает дополнительный набег фазы  $\Delta\varphi$ , индуцированный электрическим полем ТГц-импульса  $E_0$ , и его поляризация меняется на эллиптическую. Данное изменение фазы, регистрируемое с помощью балансного фотодетектора, пропорционально амплитуде электрического поля ТГц-импульса:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{2} \frac{\omega n_0^3 r_{41} E_0 d}{c},$$

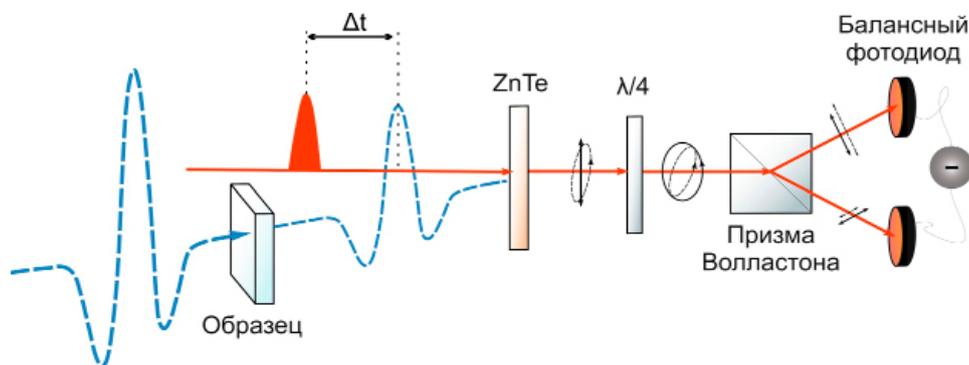
где  $\omega$  – частота ИК-излучения;

$n_0$  – показатель преломления для ИК-излучения;

$r_{41}$  – электрооптический коэффициент;

$d$  – толщина электрооптического кристалла;

$c$  – скорость света [33].

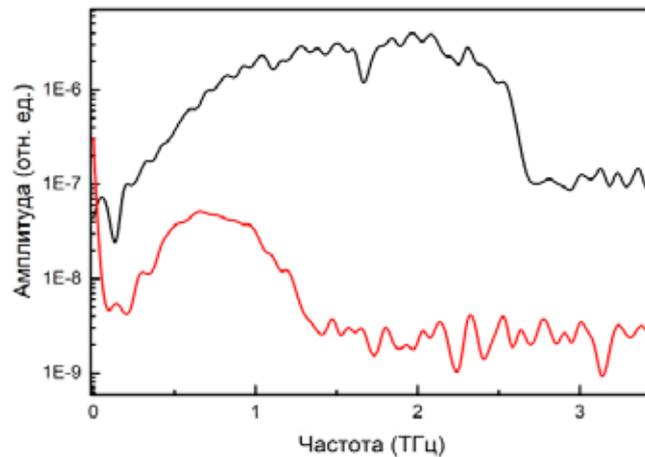


**Рис. 1.** Схематическое изображение экспериментальной установки и принципа электрооптического детектирования ТГц-излучения. Сплошными черными линиями обозначена поляризация изначально падающего зондирующего излучения, пунктиром – во время воздействия ТГц-импульса.

Следует отметить, что данный метод детектирования импульсного ТГц-излучения позволяет регистрировать непосредственно временной профиль электрического поля ТГц-импульса за счет варьирования времени прихода ТГц- и ИК-импульсов на кристалл-детектор.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены частотные спектры падающего и прошедшего через образец ТГц-импульсов.



**Рис. 2.** Частотный спектр опорного и прошедшего через исследуемый образец SrTiO<sub>3</sub> ТГц-импульсов.

Прохождение электромагнитных волн через материал характеризуется комплексным показателем преломления:

$$\tilde{n} = n_r + ik,$$

где  $n_r$  – действительная часть показателя преломления, которая определяет фазовую скорость электромагнитной волны при ее распространении в среде относительно скорости света в вакууме;

$k$  – коэффициент экстинкции, связанный с коэффициентом поглощения  $\alpha$  соотношением  $k = \alpha\lambda / 4\pi$ , где  $\lambda$  – длина волны.

Зная комплексные амплитудные коэффициенты Фурье-спектров опорного сигнала  $E_{\text{опорный}}(\omega)$  и сигнала образца  $E_{\text{образец}}(\omega)$ , можно вычислить комплексный амплитудный коэффициент пропускания образца в соответствии с передаточной функцией:

$$H_{\text{экспер}}(\omega) = \frac{E_{\text{образец}}(\omega)}{E_{\text{опорный}}(\omega)} = T(\omega)e^{i\varphi(\omega)} = t_{12}t_{23}e^{-\alpha d/2}e^{i(\tilde{n}-1)\omega d/c} \quad (1)$$

где  $t_{12}$  и  $t_{23}$  – амплитудные коэффициенты Френеля на границе воздух–образец и образец–воздух, соответственно;  $d$  – толщина кристалла;

$\varphi(\omega)$  – относительная фаза прошедшего через образец и опорного ТГц-импульсов [34].

Уравнение (1) позволяет установить связь между  $H_{\text{экспер}}(\omega)$  и комплексным показателем преломления  $\tilde{n}$ . Благодаря этому становится возможным нахождение действительной части показателя преломления  $n_r(\omega)$ , коэффициента пропускания  $T(\omega)$  и коэффициента поглощения  $\alpha(\omega)$  согласно следующим формулам [35]:

$$n_r(\omega) = 1 + \frac{c\varphi(\omega)}{\omega d} \quad (2)$$

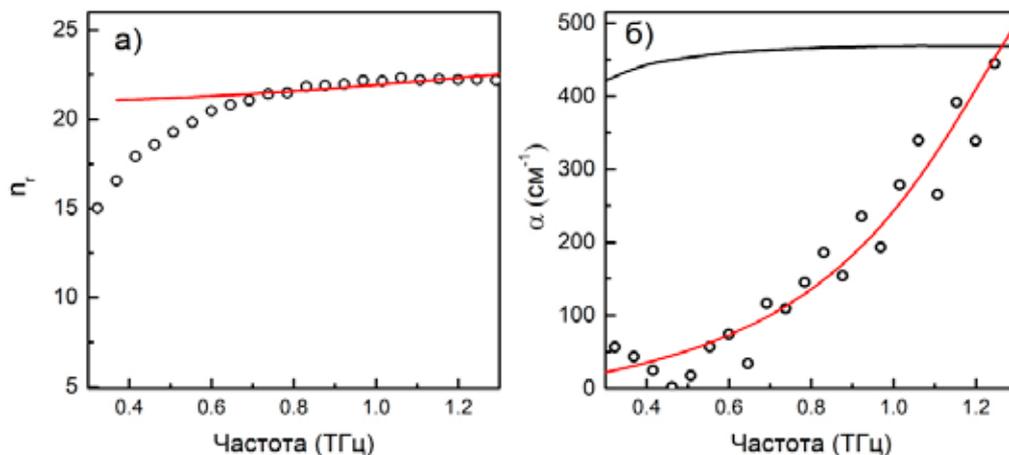
$$T(\omega) = 1 - \frac{(n_r(\omega) - 1)^2}{(n_r(\omega) + 1)^2} \quad (3)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln \left( T(\omega) \frac{4n}{(n_r + 1)^2} \right) \quad (4)$$

Однако необходимо заметить, что при получении соответствующего частотного спектра для конкретного образца в зависимости от спектральных амплитуд не всегда возможно определить доверительный интервал измерения, т. е. граничные значения частот, при которых полученный спектр сигнала переходит от фактического измеренного сигнала к шуму. В качестве критерия мы использовали оценку коэффициента поглощения  $\alpha(\omega)$  и нашли такое  $\alpha_{\max}(\omega)$ , при котором значения поглощения выше этого уровня считались недоверительными. В качестве критерия границы доверительного интервала использовано отношение среднеквадратичного отклонения ( $\sigma$ ) измерения с закрытым ТГц-лучом к максимальному значению амплитуды сигнала в момент воздействия ТГц-импульса ( $E_{\max}^{\text{THz}}$ ). Таким образом, частотная зависимость  $\alpha_{\max}(\omega)$  запишется в виде

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln \left( \frac{\sigma}{E_{\max}^{\text{THz}}} \frac{4n}{(n_r + 1)^2} \right).$$

На рис. 3 кружками показаны рассчитанные по формулам (2)–(4) из экспериментальных данных зависимости показателя преломления  $n_r(\omega)$  и коэффициента поглощения  $\alpha(\omega)$  для SrTiO<sub>3</sub> в ТГц-диапазоне частот, а также граница доверительного интервала (черная кривая на рис. 3б). С ростом частоты коэффициент поглощения увеличивается, но заметных пиков поглощения ниже 1.3 ТГц не наблюдается, что подтверждается зависимостью показателя преломления.



**Рис. 3.** Зависимость показателя преломления (а) и коэффициента пропускания (б), рассчитанные из измерений методом ТГц-спектроскопии с временным разрешением. Аппроксимация показана сплошной линией. Черной сплошной линией показана граница чувствительности спектрометра.

Показатель преломления и коэффициент поглощения могут быть выражены через действительную ( $\epsilon'$ ) и мнимую ( $\epsilon''$ ) части диэлектрической проницаемости [36]:

$$n_r^2(\omega) = \frac{1}{2}(\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + \epsilon') \quad (5)$$

$$k^2(\omega) = \frac{1}{2}(\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \epsilon') \quad (6)$$

В свою очередь, диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  может быть рассчитана из классической модели Друде–Лоренца, где взаимодействие излучения с решеткой приводит к поглощению электромагнитной волны из-за создания или уничтожения вибрации решетки. В рамках этой модели комплексная диэлектрическая проницаемость записывается как

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{A\omega^2}{\omega^2 - \omega_{TO} - i\Gamma\omega}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{\infty} = 5.5$  – высокочастотная диэлектрическая проницаемость [2];

$A$  – сила осциллятора;

$\omega_{TO}$  – частота продольной оптической фононной моды;

$\Gamma$  – константа затухания.

Сплошные красные линии на рис. 3а и 3б получены в результате совместной теоретической аппроксимации показателей преломления и коэффициента поглощения, низкочастотной оптической мягкой фононной моды на частоте  $\omega_{TO} = 2.7$  ТГц с шириной линии  $\Gamma = 1.5$  ТГц. Определенная в результате аппроксимации собственная частота мягкой моды хорошо согласуется с литературными значениями [23].

Несмотря на то, что нижняя сегнетоэлектрическая оптическая мягкая мода в  $\text{SrTiO}_3$  индуцируется преимущественно изгибом Ti–O–Ti октаэдра, является Рамановской, ИК-активной модой [1, 23] и имеет выраженную температурную зависимость [7], она остается сложно различимой для традиционных методов ИК-отражения и комбинационного рассеяния из-за близости ее частоты к доверительному интервалу методов.

### Заключение

Методом терагерцовой спектроскопии с временным разрешением исследованы диэлектрические свойства монокристалла титаната стронция ( $\text{SrTiO}_3$ ) в частотной области от 0.3 до 1.3 ТГц. Показано, что низкочастотный терагерцовый отклик от  $\text{SrTiO}_3$  в основном обусловлен низколежащей мягкой фононной модой  $\text{TO}_1$  с частотой 2.7 ТГц. Однако из-за сильного поглощения  $\text{SrTiO}_3$  при частотах выше 1.5 ТГц для более глубокого понимания поведения данной фононной моды требуются дополнительные прямые измерения.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-32-00487).

### Литература:

1. Barker A.S., Tinkham M. Far-infrared ferroelectric vibration mode in  $\text{SrTiO}_3$  // Phys. Rev. 1962. V. 125. № 5. P. 1527–1530. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.125.1527>
2. Spitzer W.G., Miller R.C., Kleinman D.A., Howarth L.E. Far infrared dielectric dispersion in  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$ , and  $\text{TiO}_2$  // Phys. Rev. 1962. V. 126. № 5. P. 1710–1721. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.126.1710>
3. Ostapchuk T., Petzelt J., Železný V., Pashkin A., Pokorný J., Drbohlav I., Kužel R., Rafaja D., Gorshunov B.P., Dressel M., Ohly C., Hoffmann-Eifert S., Waser R. Origin of soft-mode stiffening and reduced dielectric response in  $\text{SrTiO}_3$  thin films // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. № 23. P. 235406-12. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.235406>
4. Fedorov I., Železný V., Petzelt J., Trepakov V., Jelínek M., Trtík V., Čerňanský M., Studnička J. Far-infrared spectroscopy of a  $\text{SrTiO}_3$  thin film // Ferroelectrics. 1998. V. 208–209. № 1. P. 413–427. <https://doi.org/10.1080/00150199808014890>
5. Müller K.A., Burkard H.  $\text{SrTiO}_3$ : An intrinsic quantum paraelectric below 4 K // Phys. Rev. B. 1979. V. 19. № 7. P. 3593–3602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.19.3593>

6. Bellingeri E., Pellegrino L., Marré D., Pallecchi I., Siri A.S. All-SrTiO<sub>3</sub> field effect devices made by anodic oxidation of epitaxial semiconducting thin films // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 94. № 9. P. 5976–5981. <https://doi.org/10.1063/1.1613373>
7. Saifi M.A., Cross L.E. Dielectric properties of strontium titanate at low temperature // *Phys. Rev. B.* 1970. V. 2. № 3. P. 677–684. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.2.677>
8. Wang Z., Cao M., Yao Z., Zhang Q., Song Z., Hu W., Xu Q., Hao H., Liu H., Yu Z. Giant permittivity and low dielectric loss of SrTiO<sub>3</sub> ceramics sintered in nitrogen atmosphere // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2014. V. 34. № 7. P. 1755–1760. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.01.015>
9. Tagantsev A.K., Sherman V.O., Astafiev K.F., Venkatesh J., Setter N. Ferroelectric materials for microwave tunable applications // *J. Electroceramics.* 2003. V. 11. № 1/2. P. 5–66. <https://doi.org/10.1023/B:JECR.0000015661.81386.e6>
10. Weaver H.E. Dielectric properties of single crystals of SrTiO<sub>3</sub> at low temperatures // *J. Phys. Chem. Solids.* 1959. V. 11. № 3–4. P. 274–277. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90226-4](https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90226-4)
11. Lippmaa M., Nakagawa N., Kawasaki M., Ohashi S., Inaguma Y., Itoh M., Koinuma H. Step-flow growth of SrTiO<sub>3</sub> thin films with a dielectric constant exceeding 104 // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 74. № 23. P. 3543–3545. <https://doi.org/10.1063/1.124155>
12. Jorel C., Vallée C., Gonon P., Gourvest E., Dubarry C., Defay E. High performance metal-insulator-metal capacitor using a SrTiO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> bilayer // *Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. № 25. P. 253502-3. <https://doi.org/10.1063/1.3158951>
13. Hou C., Huang W., Zhao W., Zhang D., Yin Y., Li X. Ultrahigh energy density in SrTiO<sub>3</sub> film capacitors // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017. V. 9. № 24. P. 20484–20490. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b02225>
14. Sirenko A.A., Bernhard C., Golnik A., Clark A.M., Hao J., Si W., Xi X.X. Soft-mode hardening in SrTiO<sub>3</sub> thin films // *Nature.* 2000. V. 404. № 6776. P. 373–376. <http://dx.doi.org/10.1038/35006023>
15. Skoromets V., Kadlec F., Kadlec C., Němec H., Rychetsky I., Panaitov G., Müller V., Fattakhova-Rohlfing D., Moch P., Kužel P. Tuning of dielectric properties of SrTiO<sub>3</sub> in the terahertz range // *Phys. Rev. B.* 2011. V. 84. № 17. P. 174121-10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.174121>
16. Wu L., Jiang L., Sheng Q., Ding X., Yao J. Optical tuning of dielectric properties of SrTiO<sub>3</sub>:Fe in the terahertz range // *Opt. Lett.* 2013. V. 38. № 14. P. 2581–2583. <https://doi.org/10.1364/OL.38.002581>
17. Kužel P., Kadlec F., Němec H., Ott R., Hollmann E., Klein N. Dielectric tunability of SrTiO<sub>3</sub> thin films in the terahertz range // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 88. № 10. P. 102901-3. <https://doi.org/10.1063/1.2183370>
18. Mantsch H.H., Naumann D. Terahertz spectroscopy: The renaissance of far infrared spectroscopy // *J. Mol. Struct.* 2010. V. 964. № 1–3. P. 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.12.022>
19. van Exter M., Fattinger C., Grischkowsky D. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor // *Opt. Lett.* 1989. V. 14. № 20. P. 1128–1130. <https://doi.org/10.1364/OL.14.001128>
20. Grischkowsky D., Keiding S., van Exter M., Fattinger C. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1990. V. 7. № 10. P. 2006–2015. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.7.002006>
21. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // *Nat. Photonics.* 2007. V. 1. № 2. P. 97–105. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.3>
22. Ferguson B., Zhang X.-C. Materials for terahertz science and technology // *Nat. Mater.* 2002. V. 1. № 1. P. 26–33. <https://doi.org/10.1038/nmat708>
23. Nilsen W.G., Skinner J.G. Raman Spectrum of Strontium Titanate // *J. Chem. Phys.* 1968. V. 48. № 5. P. 2240–2248. <https://doi.org/10.1063/1.1669418>
24. Han J., Wan F., Zhu Z., Zhang W. Dielectric response of soft mode in ferroelectric SrTiO<sub>3</sub> // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. № 3. P. 031104. <https://doi.org/10.1063/1.2431448>
25. Misra M., Kotani K., Kawayama I., Murakami H., Tonouchi M. Observation of TO<sub>1</sub> soft mode in SrTiO<sub>3</sub> films by terahertz time domain spectroscopy // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. № 18. P. 182909. <https://doi.org/10.1063/1.2128039>
26. Tkach A., Vilarinho P.M., Kholkin A.L., Pashkin A., Veljko S., Petzelt J. Broad-band dielectric spectroscopy analysis of relaxational dynamics in Mn-doped SrTiO<sub>3</sub> ceramics // *Phys. Rev. B.* 2006. V. 73. № 10. P. 104113–7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.104113>
27. Kittel C. *Introduction to Solid State Physics.* 7th ed. New York: Wiley, 1975. 688 p.
28. Khaber L., Beniaiche A., Hachemi A. Electronic and optical properties of SrTiO<sub>3</sub> under pressure effect: Ab initio study // *Solid State Commun.* 2014. V. 189. P. 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2014.03.018>
29. Verma A., Raghavan S., Stemmer S., Jena D. Ferroelectric transition in compressively strained SrTiO<sub>3</sub> thin films // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 107. № 19. P. 192908. <https://doi.org/10.1063/1.4935592>
30. Tikhomirov O., Jiang H., Levy J. Local Ferroelectricity in SrTiO<sub>3</sub> Thin Films // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 89. № 14. P. 147601–4. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.147601>
31. Kumar A.S., Suresh P., Kumar M.M., Srikanth H., Post M.L., Sahner K., Moos R., Srinath S. Magnetic and ferroelectric properties of Fe doped SrTiO<sub>3-δ</sub> films // *J. Phys. Conf. Ser.* 2010. V. 200. № 9. P. 092010-4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/200/9/092010>

32. Valdmanis J., Mourou G. Subpicosecond electrooptic sampling: Principles and applications // *IEEE J. Quantum Electron.* 1986. V. 22. № 1. P. 69–78. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1072867>
33. Nahata A., Auston D.H., Heinz T.F., Wu C. Coherent detection of freely propagating terahertz radiation by electro-optic sampling // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 68. № 2. P. 150–152. <https://doi.org/10.1063/1.116130>
34. Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications // *Laser Photon. Rev.* 2011. V. 5. № 1. P. 124–166. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000011>
35. Jepsen P.U., Fischer B.M. Dynamic range in terahertz time-domain transmission and reflection spectroscopy // *Opt. Lett.* 2005. V. 30. № 1. P. 29–31. <https://doi.org/10.1364/OL.30.000029>
36. Kuzmany H. The Dielectric Function. In: *Solid-State Spectroscopy*. Springer, 1998. P. 101–120. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03594-8>

### References:

- Barker A.S., Tinkham M. Far-infrared ferroelectric vibration mode in SrTiO<sub>3</sub>. *Phys. Rev.* 1962; 125(5):1527-1530. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.125.1527>
- Spitzer W.G., Miller R.C., Kleinman D.A., Howarth L.E. Far infrared dielectric dispersion in BaTiO<sub>3</sub>, SrTiO<sub>3</sub>, and TiO<sub>2</sub>. *Phys. Rev.* 1962; 126(5):1710-1721. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.126.1710>
- Ostapchuk T., Petzelt J., Železný V., Pashkin A., Pokorný J., Drbohlav I., Kužel R., Rafaja D., Gorshunov B.P., Dressel M., Ohly C., Hoffmann-Eifert S., Waser R. Origin of soft-mode stiffening and reduced dielectric response in SrTiO<sub>3</sub> thin films. *Phys. Rev. B.* 2002; 66(23):235406-12. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.235406>
- Fedorov I., Železný V., Petzelt J., Trepakov V., Jelínek M., Trtík V., Čerňanský M., Studnička J. Far-infrared spectroscopy of a SrTiO<sub>3</sub> thin film. *Ferroelectrics.* 1998; 208-209(1):413-427. <https://doi.org/10.1080/00150199808014890>
- Müller K.A., Burkard H. SrTiO<sub>3</sub>: An intrinsic quantum paraelectric below 4 K. *Phys. Rev. B.* 1979; 19(7):3593-3602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.19.3593>
- Bellingeri E., Pellegrino L., Marré D., Pallecchi I., Siri A.S. All-SrTiO<sub>3</sub> field effect devices made by anodic oxidation of epitaxial semiconducting thin films. *J. Appl. Phys.* 2003; 94(9):5976-5981. <https://doi.org/10.1063/1.1613373>
- Saifi M.A., Cross L.E. Dielectric properties of strontium titanate at low temperature. *Phys. Rev. B.* 1970; 2(3):677-684. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.2.677>
- Wang Z., Cao M., Yao Z., Zhang Q., Song Z., Hu W., Xu Q., Hao H., Liu H., Yu Z. Giant permittivity and low dielectric loss of SrTiO<sub>3</sub> ceramics sintered in nitrogen atmosphere. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2014; 34(7):1755-1760. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.01.015>
- Tagantsev A.K., Sherman V.O., Astafiev K.F., Venkatesh J., Setter N. Ferroelectric materials for microwave tunable applications. *J. Electroceramics.* 2003; 11(1/2):5-66. <https://doi.org/10.1023/B:JECR.0000015661.81386.e6>
- Weaver H.E. Dielectric properties of single crystals of SrTiO<sub>3</sub> at low temperatures. *J. Phys. Chem. Solids.* 1959; 11(3-4):274-277. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90226-4](https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90226-4)
- Lippmaa M., Nakagawa N., Kawasaki M., Ohashi S., Inaguma Y., Itoh M., Koinuma H. Step-flow growth of SrTiO<sub>3</sub> thin films with a dielectric constant exceeding 104. *Appl. Phys. Lett.* 1999; 74(23):3543-3545. <https://doi.org/10.1063/1.124155>
- Jorel C., Vallée C., Gonon P., Gourvest E., Dubarry C., Defay E. High performance metal-insulator-metal capacitor using a SrTiO<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> bilayer. *Appl. Phys. Lett.* 2009; 94(25):253502-3. <https://doi.org/10.1063/1.3158951>
- Hou C., Huang W., Zhao W., Zhang D., Yin Y., Li X. Ultrahigh energy density in SrTiO<sub>3</sub> film capacitors. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017; 9(24):20484-20490. <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.7b02225>
- Sirenko A.A., Bernhard C., Golnik A., Clark A.M., Hao J., Si W., Xi X.X. Soft-mode hardening in SrTiO<sub>3</sub> thin films. *Nature.* 2000; 404(6776):373–376. <http://dx.doi.org/10.1038/35006023>
- Skoromets V., Kadlec F., Kadlec C., Němec H., Rychetsky I., Panaitov G., Müller V., Fattakhova-Rohlfing D., Moch P., Kužel P. Tuning of dielectric properties of SrTiO<sub>3</sub> in the terahertz range. *Phys. Rev. B.* 2011; 84(17):174121-10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.174121>
- Wu L., Jiang L., Sheng Q., Ding X., Yao J. Optical tuning of dielectric properties of SrTiO<sub>3</sub>:Fe in the terahertz range. *Opt. Lett.* 2013; 38(14):2581-2583. <https://doi.org/10.1364/OL.38.002581>
- Kužel P., Kadlec F., Němec H., Ott R., Hollmann E., Klein N. Dielectric tunability of SrTiO<sub>3</sub> thin films in the terahertz range. *Appl. Phys. Lett.* 2006; 88(10): 102901-3. <https://doi.org/10.1063/1.2183370>
- Mantsch H.H., Naumann D. Terahertz spectroscopy: The renaissance of far infrared spectroscopy. *J. Mol. Struct.* 2010; 964(1-3):1-4. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.12.022>
- van Exter M., Fattinger C., Grischkowsky D. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor. *Opt. Lett.* 1989; 14(20):1128-1130. <https://doi.org/10.1364/OL.14.001128>
- Grischkowsky D., Keiding S., van Exter M., Fattinger C. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors. *J. Opt. Soc. Am. B.* 1990; 7(10):2006-2015. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.7.002006>
- Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology. *Nat. Photonics.* 2007; 1(2):97-105. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.001>

org/10.1038/nphoton.2007.3

22. Ferguson B., Zhang X.-C. Materials for terahertz science and technology. *Nat. Mater.* 2002; 1(1):26-33. <https://doi.org/10.1038/nmat708>

23. Nilsen W.G., Skinner J.G. Raman spectrum of strontium titanate. *J. Chem. Phys.* 1968; 48(5):2240-2248. <https://doi.org/10.1063/1.1669418>

24. Han J., Wan F., Zhu Z., Zhang W. Dielectric response of soft mode in ferroelectric SrTiO<sub>3</sub>. *Appl. Phys. Lett.* 2007; 90(3):031104. <https://doi.org/10.1063/1.2431448>

25. Misra M., Kotani K., Kawayama I., Murakami H., Tonouchi M. Observation of TO1 soft mode in SrTiO<sub>3</sub> films by terahertz time domain spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* 2005; 87(18):182909. <https://doi.org/10.1063/1.2128039>

26. Tkach A., Vilarinho P.M., Kholkin A.L., Pashkin A., Veljko S., Petzelt J. Broad-band dielectric spectroscopy analysis of relaxational dynamics in Mn-doped SrTiO<sub>3</sub> ceramics. *Phys. Rev. B.* 2006; 73(10):104113-7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.104113>

27. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. 7th ed. 1975. New York: Wiley, 1975. 688 p.

28. Khaber L., Beniaiche A., Hachemi A. Electronic and optical properties of SrTiO<sub>3</sub> under pressure effect: Ab initio study. *Solid State Commun.* 2014; 189:32-37. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2014.03.018>

29. Verma A., Raghavan S., Stemmer S., Jena D. Ferroelectric transition in compressively strained SrTiO<sub>3</sub> thin films. *Appl. Phys. Lett.* 2015; 107(19):192908. <https://doi.org/10.1063/1.4935592>

30. Tikhomirov O., Jiang H., Levy J. Local ferroelectricity in SrTiO<sub>3</sub> thin films. *Phys. Rev. Lett.* 2002; 89(14):147601-4. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.147601>

31. Kumar A.S., Suresh P., Kumar M.M., Srikanth H., Post M.L., Sahner K., Moos R., Srinath S. Magnetic and ferroelectric properties of Fe doped SrTiO<sub>3-δ</sub> films. *J. Phys. Conf. Ser.* 2010; 200(9):092010-4. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/200/9/092010>

32. Valdmanis J., Mourou G. Subpicosecond electrooptic sampling: Principles and applications. *IEEE J. Quantum Electron.* 1986; 22(1):69-78. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1072867>

33. Nahata A., Auston D.H., Heinz T.F., Wu C. Coherent detection of freely propagating terahertz radiation by electro-optic sampling. *Appl. Phys. Lett.* 1996; 68(2):150-152. <https://doi.org/10.1063/1.116130>

34. Jepsen P.U., Cooke D.G., Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications. *Laser Photon. Rev.* 2011; 5(1):124-166. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000011>

35. Jepsen P.U., Fischer B.M. Dynamic range in terahertz time-domain transmission and reflection spectroscopy. *Opt. Lett.* 2005; 30(1):29-31. <https://doi.org/10.1364/OL.30.000029>

36. Kuzmany H. The Dielectric Function. In: Solid-State Spectroscopy. Springer, 1998. P. 101-120. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03594-8>

#### Об авторах:

**Билык Владислав Романович**, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА); стажер-исследователь специализированной учебно-научной лаборатории сверхбыстрой динамики ферроиков кафедры нанoeлектроники ФТИ РТУ МИРЭА (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 57194048515, ResearcherID: N-9662-2015, <https://orcid.org/0000-0002-3013-8655>

**Гришунин Кирилл Александрович**, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 56968091600, ResearcherID: Q-1005-2017, <https://orcid.org/0000-0001-9523-355X>

#### About the authors:

**Vladislav R. Bilyk**, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA); researcher, Laboratory of Ultrafast Dynamics of Ferroics of the Chair of Nanoelectronics RTU MIREA (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 57194048515, ResearcherID: N-9662-2015, <https://orcid.org/0000-0002-3013-8655>

**Kirill A. Grishunin**, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 56968091600, ResearcherID: Q-1005-2017, <https://orcid.org/0000-0001-9523-355X>

**Для цитирования:** Билык В.Р., Гришунин К.А. Комплексный показатель преломления титаната стронция в терагерцовом диапазоне частот // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 71–80 <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>

**For citation:** Bilyk V.R., Grishunin K.A. Complex refractive index of strontium titanate in the terahertz frequency range. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):71-80, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-71-80>

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-81-91>



УДК 537.622.4; 53.098

## Метод измерения деформаций магнитоактивных эластомеров под действием магнитных полей

Д.В. Савельев<sup>1</sup>,  
Л.Ю. Фетисов<sup>1,®</sup>,  
Д.В. Чашин<sup>1</sup>,  
П.А. Шабин<sup>1</sup>,  
Д.А. Вьюник<sup>1</sup>,  
Ф.А. Федулов<sup>1</sup>,  
W. Kettl<sup>2</sup>,  
M. Shamonin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

<sup>2</sup>Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 93049 Regensburg, Germany

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

Магнитодеформация представляет собой изменение размеров и формы образца под действием однородного внешнего магнитного поля. Исследование данного эффекта в различных материалах позволяет изучить природу магнитных и механических взаимодействий в них. Большой интерес вызывает магнитодеформация и с инженерной точки зрения для конструирования новых приборов и устройств микросистемной техники. В магнитоактивных эластомерах, содержащих магнитные микрочастицы в полимерной матрице, обнаружена гигантская деформация под действием внешнего магнитного поля. Общеизвестные методы измерения магнитодеформации в магнитоактивных мягких материалах в настоящее время практически отсутствуют. В статье описана установка, разработанная для исследования магнитомеханических характеристик магнитоактивных эластомеров, и продемонстрированы ее экспериментальные возможности. Установка позволяет измерить деформации в диапазоне от 0 до 12.5 мм с разрешением 1 мкм. Получаемые при помощи данной установки деформационные кривые необходимы для разработки актюаторных и сенсорных устройств на основе магнитоактивных эластомеров и улучшения технологий их изготовления.

**Ключевые слова:** магнитоактивные эластомеры, магнитострикция, магнитодеформации, ферромагнетики, микрочастицы.

## Method of Measuring Deformations of Magnetoactive Elastomers under the Action of Magnetic Fields

Dmitry V. Saveliev<sup>1</sup>,  
Leonid Yu. Fetisov<sup>1,@</sup>,  
Dmitry V. Chashin<sup>1</sup>,  
Pavel A. Shabin<sup>1</sup>,  
Darya A. Vyunik<sup>1</sup>,  
Fedor A. Fedulov<sup>1</sup>,  
Wolfgang Kettl<sup>2</sup>,  
Mikhail Shamonin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

<sup>2</sup>Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 93049 Regensburg, Germany

@Corresponding author e-mail: fetisovl@yandex.ru

Magnetic deformation is a change in the size and shape of a sample under the action of a uniform external magnetic field. The study of this effect in various materials provides deep understanding of the nature of magnetic and mechanical interactions. Moreover, magnetic deformation is of great interest from an engineering point of view for designing new devices. In magnetoactive elastomers containing magnetic microparticles in the polymer matrix, a giant deformation is detected under the action of an external magnetic field. The generally accepted methods for measuring magnetic deformation in magnetoactive soft materials are now practically absent. The article describes the installation for the study of the magnetomechanical characteristics of magnetoactive elastomers and demonstrates its experimental capabilities. The installation allows to measure deformations in the range from 0 to 12.5 mm with a resolution of 1 micron. The deformation curves obtained using these installations are required for developing actuators and sensors based on magnetoactive elastomers, and also for improving their manufacturing technologies.

**Keywords:** magnetoactive elastomers, magnetostriction, magnetodeformation, ferromagnetics, microparticles.

### Введение

Исследование процессов деформации магнитных материалов под действием внешних магнитных полей представляет значительный интерес как с физической, так и с прикладной точек зрения. Изучение подобных явлений позволяет лучше понять физику взаимодействий в различных магнитных материалах. Кроме того, магнитодеформация находит широкое применение в различных областях науки и техники при конструировании новых приборов и устройств, таких как микроактюаторы в микросистемной технике, генераторы ультразвука в дефектоскопии и подводной локации, приборы для бесконтактного измерения расстояний и т. д. [1]. Магнитодеформацию обычно характеризуют безразмерной величиной – относительным изменением линейных размеров образца  $\lambda = \Delta l/l$ , где  $\Delta l$  – удлинение (или укорочение) образца под действием магнитного поля  $H$ , а  $l$  – длина образца.

В магнитных металлах и сплавах деформация вызывается эффектом магнитоупругости, который заключается в изменении размеров или формы образца при изменении его намагниченности под действием внешнего поля [2]. В большинстве магнитных материалов (например, никель, железо, кобальт и их сплавы) величина магнитоупругости обычно составляет порядка  $\lambda \sim 10^{-7}$ – $10^{-5}$ . В некоторых сплавах на основе редкоземельных металлов деформации увеличиваются до значений  $\lambda \sim 10^{-3}$ . В частности, наибольшая магнитоупругость  $\lambda \sim 2 \cdot 10^{-3}$  обнаружена в материале Terfenol-D [3].

В последние десятилетия активно развиваются исследования магнитоактивных эластомеров (МАЭ), которые представляют собой полимерную матрицу с помещенными в нее магнитными микрочастицами [4]. Магнитные эластомеры обладают целым набором уникальных свойств, одним из которых является гигантская деформация во внешнем магнитном поле, величина которой может достигать десятков процентов. В МАЭ частицы наполнителя сами не обладают магнитоупругостью, а деформация образцов возникает из-за изменения их взаимного расположения под действием внешнего магнитного поля.

В настоящее время используют несколько основных методов измерения деформаций образцов под действием внешнего магнитного поля: тензометрический [5], оптический (интерференционный) [6] и емкостной [7].

Использование того или иного метода измерения деформаций зависит как от типа вещества и его характеристик, так и от формы и размеров образцов. Чаще всего измерения проводят на образцах в виде пластин либо цилиндров. Существующие методы измерения хорошо работают для малых величин магнитодеформации  $\lambda \sim 10^{-6}$ – $10^{-3}$ , но не позволяют измерять деформации величиной в десятки процентов, которые наблюдаются в МАЭ. Кроме того, классические магнитоупругостные материалы, как правило, достаточно жесткие (модуль Юнга составляет  $10^{11}$  Па), в то время как МАЭ могут быть намного мягче (модуль Юнга порядка 100 кПа и менее). Общеизвестные методы измерения больших деформаций таких мягких материалов в настоящее время практически отсутствуют.

В данной статье приводится описание установки для измерения деформационных зависимостей магнитоактивных эластомеров от магнитного поля. Установка была разработана в научно-образовательном центре «Магнитоэлектрические материалы и устройства» МИРЭА – Российского технологического университета (РТУ МИРЭА).

### Экспериментальная часть

Исследуемые образцы МАЭ представляли собой матрицу из полидиметилсилоксана, которая наполнена порошком из карбонильного железа (тип SQ, BASF SE Carbonyl Iron Powder & Metal Systems, Ludwigshafen, Germany). Средний диаметр  $d_{50}$  магнитных частиц составлял 3.9–5.0 мкм. Технология изготовления МАЭ подробно описана в работе [8]. Для проведения исследований были изготовлены несколько партий образцов различных геометрических размеров и состава. Образцы имели цилиндрическую форму одинакового диаметра и разной высоты. Фотография одного из образцов приведена на рис. 1. Магнитное поле прикладывали вдоль оси цилиндра и измеряли продольную магнитодеформацию. Блок-схема установки приведена на рис. 2.

Установка состоит из коромысла (2), выполненного из алюминиевой балки толщиной 10 мм, закрепленной на вращающейся оси, установленного в блок приборных подшип-



Рис. 1. Фотография образца.

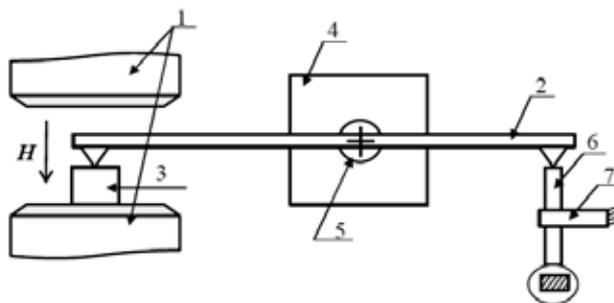


Рис. 2. Блок-схема установки для измерения зависимости магнитострикции МАЭ от магнитного поля  $H$ : 1 – полюса электромагнита; 2 – кронштейн; 3 – образец магнитоактивного эластомера; 4 – двухкоординатный стол; 5 – блок подшипников; 6 – электронный микрометр ИЦ 0-12.5; 7 – штатив.

ников (5), обеспечивающих свободное горизонтальное вращение коромысла. На краях коромысла установлены штифты из бронзы, один из них упирается в образец эластомера, а другой – в микрометр линейного перемещения. Аналогичная геометрия измерения магнитострикционных деформаций металлов была предложена в работе [9]. Образец эластомера (3) крепится на одном из полюсов электромагнита. На свободный конец образца крепится стеклянная пластинка, в которую упирается коромысло – тем самым удастся избежать локальной деформации эластомера. При отсутствии магнитного поля система находится в равновесии. После того, как электромагнит (1) создает однородное магнитное поле, МАЭ начинает деформироваться по направлению поля. В результате этого коромысло отклоняется. Степень отклонения определяется при помощи электронного микрометра (6) марки ИЦ 0-12.5, работающего с разрешением 0.001 мм в диапазоне 0–12.5 мм. Блок приборных подшипников устанавливается на двухкоординатном столе (4), что позволяет корректировать установку коромысла относительно образца. Время измерения одной точки составляло 1.5 мин. Внешний вид установки приведен на рис. 3.

Таким образом, разработанная установка для измерения зависимостей деформации образцов от величины магнитного поля имеет следующие характеристики: она позволяет создавать магнитные поля в диапазоне от 0 до 10 кЭ и измерять деформации в диапазоне от 0 до 12.5 мм с разрешением 1.0 мкм.

### Результаты и их обсуждение

Особенностью измерения деформаций в магнитоактивных эластомерах является то, что под действием магнитного поля меняются не только свойства самих магнитных микрочастиц в матрице, но также происходит изменение положения частиц в матрице, что оказывает сильное влияние на свойства образцов (магнитные, диэлектрические, механи-

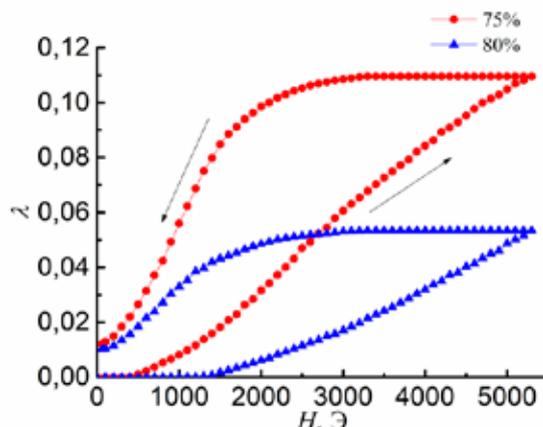


Рис. 3. Внешний вид установки для измерения зависимости магнитоэластики МАЭ от магнитного поля  $H$ .

ческие). В то же время магнитоэластика самих частиц мала и никак не влияет на деформации МАЭ [10]. Экспериментальные кривые, полученные при помощи разработанной установки и описанные далее, дают возможность получить информацию о процессах реструктуризации, происходящих в МАЭ, и необходимы для проектирования устройств на их основе.

Прежде всего, разработанная установка дает возможность измерять зависимости относительного удлинения  $\lambda = \Delta l_0 / l$  при приложении к образцу постоянного магнитного поля, направленного вдоль оси цилиндра, где  $l_0$  – начальная высота цилиндра. В качестве примера на рис. 4 приведены полевые зависимости деформаций, измеренных для двух образцов с различными массовыми долями карбонильного железа (1 – 75%; 2 – 80%). Диаметры образцов составляли 13.6 и 14.7 мм, а высоты – 9.6 и 9.4 мм, соответственно. Как видно из приведенных зависимостей, магнитоактивные эластомеры характеризуются сильным гистерезисом (стрелками на рисунке показано направление изменения поля). Причем большая максимальная деформация наблюдается для образца с меньшей концентрацией (массовой долей) частиц. Уменьшение деформации начинается примерно при одном и том же значении магнитного поля (3200 Э). Особое внимание следует обратить на наличие заметной остаточной деформации порядка 0.01 у всех образцов.

Кроме того, отличительной особенностью деформации магнитоактивных эластомеров, в отличие от аналогичных зависимостей для магнитоэластиконных металлов и сплавов (Ni, FeGa, FeNi, Terfenol, Metglas), является наличие начального поля, ниже которого образец не деформируется. Величина данного поля зависит от концентрации частиц и растет с 400 Э для 75% до 1300 Э для 80%. На начальном участке зависимости обе кривые аппроксимируются параболой до поля  $H \approx 3$  кЭ.



**Рис. 4.** Зависимости относительного удлинения образцов  $\lambda$  от постоянного магнитного поля  $H$  для двух образцов с разными концентрациями магнитных частиц.

Основные характеристики образцов, полученные из измеренных зависимостей, приведены в таблице.  $H_0$  – поле, в котором образец начинает деформироваться;  $\lambda_{max}$  – максимальное значение магнитострикции;  $H_r$  – поле, в котором образец начинает уменьшаться;  $\lambda_r$  – остаточная магнитострикция. Как видно, МАЭ с массовой долей карбонильного железа 75% обладает наибольшей величиной как максимальной ( $\lambda_{max} = 0.11$ ), так и остаточной ( $\lambda_r = 0.012$ ) магнитострикции.

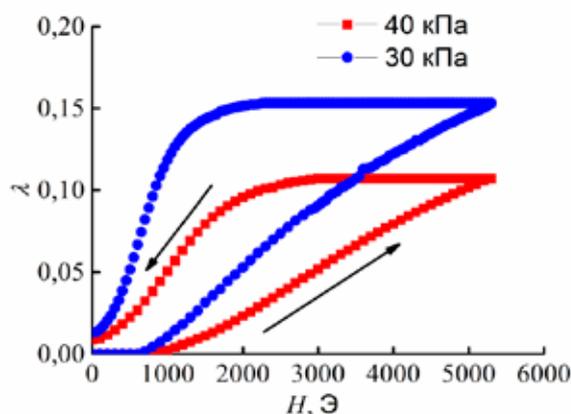
Основные характеристики образцов

Массовая доля железа, %	75	80
$H_0, \text{Э}$	400	1300
$\lambda_{max}$	0.11	0.053
$H_r, \text{Э}$	3200	3200
$\lambda_r$	0.012	0.010

Характеристики магнитоактивных эластомеров зависят не только от концентрации магнитных частиц, но и от механических свойств матрицы, в частности, модуля сдвига. Потому далее приведем пример измеренных зависимостей деформации от магнитного поля для двух образцов с одинаковой массовой долей железа (75%) и двумя модулями сдвига:  $\approx 30$  и  $\approx 40$  кПа при отсутствии магнитного поля (рис. 5).

Полученные эластомеры обладают вязкоупругими свойствами, их модуль сдвига  $G$  измерялся на низкой угловой частоте (10 рад/с) при малой сдвиговой деформации (0.01%) в геометрии пластина/пластина на коммерчески доступном реометре с магнитореологической ячейкой. Так как результирующий эластомерный композит является практически несжимаемым, соответствующий модуль Юнга  $Y$  может быть оценен по формуле:  $Y \approx 3G$ . Управление модулем эластичности композитных материалов достигалось вариацией массовых долей сшивающего агента и пластификатора в полимерной матрице [11]. Экспериментальные образцы имели форму цилиндра диаметром 14.9 и 13.5 мм и высотой 9.4 и 8.2 мм, соответственно.

Как видно из рис. 5, форма кривых практически не меняется в зависимости от величины модуля сдвига образца. Однако, во-первых, изменяется начальное поле деформации



**Рис. 5.** Зависимости деформации  $\lambda$  от постоянного магнитного поля  $H$  для двух образцов с одинаковой концентрацией карбонильного железа (75%) и различными модулями сдвига: а) 30 кПа; б) 40 кПа.

ции с 700 Э для мягкого образца (30 кПа) до 900 Э для более жесткого образца (40 кПа). Во-вторых, как и следует ожидать, деформация более мягкого образца значительно больше. Значение для образца с модулем сдвига 30 кПа  $\lambda_{max} = 0,153$  практически в 1,5 раза больше, чем соответствующее значение  $\lambda_{max} = 0,107$  для образца с модулем сдвига 40 кПа. Также сильно меняется величина поля, с которого начинается уменьшение деформации. Оно уменьшается с 2900 Э для образца с модулем сдвига 40 кПа до 2250 Э для образца с модулем сдвига 30 кПа. Остаточная деформация меняется незначительно.

Таким образом, из приведенных результатов измерений видно, что характеристики полимерной матрицы оказывают сильное влияние на деформационные зависимости магнитоактивных эластомеров. Так как во всех исследованных образцах использовали одинаковые частицы, то их влияние на свойства МАЭ не рассматривалось. Исследование свойств микрочастиц и их влияние на различные характеристики МАЭ приведено в работе [12]. Данные измерений могут быть использованы для оптимизации технологического процесса производства МАЭ с целью получения оптимальных магнитных и механических характеристик.

Кроме того, установка позволяет изменять магнитное поле как в положительном направлении (от 0 до 10 кЭ), так и в отрицательном (от 0 до -10 кЭ). Таким образом, можно получить вид деформационной зависимости во всем диапазоне полей. Пример такой зависимости для исследованного ранее образца с модулем сдвига 30 кПа диаметром 14,9 мм и высотой 9,4 мм показан на рис. 6. Как видно, для исследованных образцов зависимость имеет симметричный вид относительно нулевого поля. Стрелками на рис. 6 показано направление изменения магнитного поля. Измерения начинали при полностью размагниченном состоянии образца.

В работе также проведено измерение зависимости магнитодеформаций образцов от их длины. На рис. 7 приведена подобная зависимость для цилиндрических образцов с модулем сдвига около 30 кПа. Образцы отличались длиной: 1 – 3,8 мм, 2 – 8,2 мм, 3 – 13,8 мм. Диаметры образцов составляли: 1 – 14,8 мм, 2 – 13,5 мм, 3 – 14,7 мм. Как видно из рисунка, увеличение длины образца приводит к увеличению максимальной магнитодеформации  $\lambda_{max}$  от 0,08 до 0,19, что можно объяснить уменьшением размагничивающего

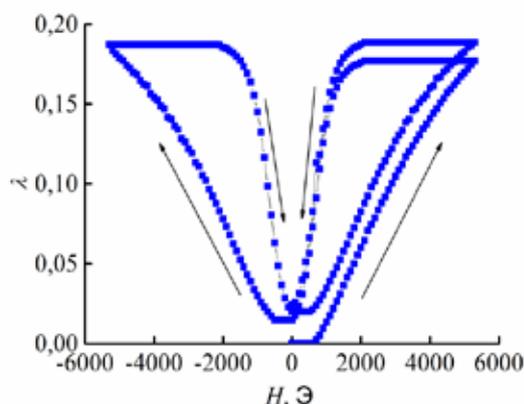


Рис. 6. Симметричная зависимость деформации образца с модулем сдвига около 30 кПа и концентрацией магнитных частиц 75% от магнитного поля.

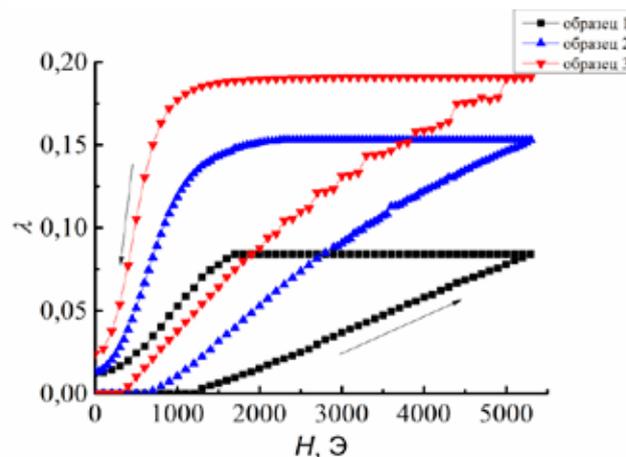
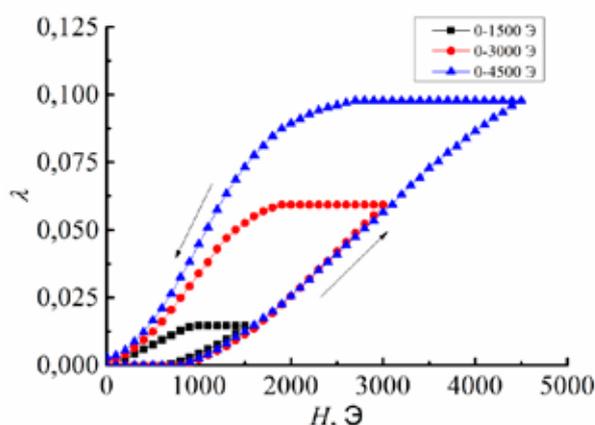


Рис. 7. Зависимость деформации образцов 1–3 от магнитного поля.

поля с увеличением отношения длины образца к его диаметру. Остаточные деформации также увеличиваются от 0.012 до 0.24. Кроме того, размеры образца оказывают сильное влияние на величину магнитных полей, в которых начинаются деформации образца. Чем больше отношение длины образца к его диаметру, тем меньше внешнее критическое поле  $H_0$ , при котором наблюдается заметная деформация. По-видимому, при этом критическом поле магнитные силы, действующие на частицы ферромагнитного наполнителя, начинают превышать упругие силы со стороны деформируемой эластичной матрицы.

Для объяснения процессов, происходящих в образцах МАЭ под действием магнитного поля, интерес могут представлять исследования частных петель деформационного гистерезиса. Пример таких измерений приведен на рис. 8. Измерения проводили для исследованного ранее образца с модулем сдвига 40 кПа, диаметром 14.9 мм и высотой 9.4 мм в трех диапазонах полей: от 0 до 1500 Э; от 0 до 3 кЭ; от 0 до 4.5 кЭ. Недостатком таких измерений можно считать то, что при большой высоте образца происходит неравномерная деформация, которая может повлиять на форму частных петель деформационного гистерезиса. В свою очередь, такие измерения могут иметь решающее значение для практических применений, так как на практике часто приходится иметь дело с неоднородными магнитными полями и необходимо знать, как они влияют на характер деформаций.

В процессе проведения измерений была обнаружена сильная зависимость свойств МАЭ от длительности измерений и, возможно, от его температуры. В результате продолжительных измерений в больших полях полюса электромагнита они нагреваются, что может привести к возникновению погрешностей измерения, связанных с нагревом. Известно, что процессы реструктуризации наполнителя в МАЭ, вызванные внешним магнитным полем, могут протекать на временных масштабах до порядка 1000 с [10, 13]. С другой стороны, известно, что реологические свойства МАЭ слабо зависят от температуры [14]. При нагреве от 23 до 35 °С в поле 2 кЭ происходит увеличение (дрейф) деформации образца примерно на 30%. Время нагрева составляет приблизительно 40 мин. Этот вклад в деформационные кривые необходимо учитывать как при измерениях



**Рис. 8.** Измеренные частные петли деформационного гистерезиса для образца с содержанием магнитных частиц 75% и модулем сдвига около 40 кПа.

деформаций от магнитных полей, так и при температурных измерениях. Дрейф магнито-стрикции в сторону ее увеличения для последовательных петель магнито-стрикционного гистерезиса виден также на рис. 6.

### Заключение

Таким образом, в статье описана разработанная установка для исследования магнитомеханических характеристик магнитоактивных эластомеров и продемонстрированы ее экспериментальные возможности. Установка позволяет измерять деформации в диапазоне от 0 до 12.5 мм с разрешением 1.0 мкм. Получаемые при помощи установки деформационные кривые являются важными для исследования магнитомеханических взаимодействий в магнитоактивных эластомерах, разработки актюаторных и сенсорных устройств на их основе и улучшения технологий их изготовления. Дальнейшее совершенствование описанной методики лежит в области повышения чувствительности установки, исследования воздействия температуры на характеристики МАЭ и в повышении технологичности самой установки.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-502-12037) и Немецкого исследовательского общества (Deutsche Forschungsgemeinschaft, грант 389008375).

### Литература:

1. Белов К.П. Магнито-стрикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, 1987. 158 с.
2. Физическая энциклопедия : в 5-ти т. / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия (тт. 1-2); Большая Российская энциклопедия (тт. 3-5), 1988-1999.
3. Engdahl G. Handbook of Giant Magnetostrictive Material. San Diego: Academic, 2000. 386 p.
4. Elhajjar R., Law C.-T., Pegoretti A. Magnetostrictive polymer composites: Recent advances in materials, structures and properties // Progr. Mater. Sci. 2018. V. 97. P. 204–229. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.005>
5. Chashin D.V., Burdin D.A., Fetisov L.Yu., Economov N.A., Fetisov Yu.K. Precise measurements of magnetostriction of ferromagnetic plates // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2018. V. 11(1). P. 30–34. <https://doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-1-30-34>
6. Samanta H., Nagata Y., Uchida T., Abe S. New optical technique for bulk magnetostriction measurement // J. Magn. Magn. Mater. 2000. V. 212. № 3. P. 355–360. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00832-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00832-X)
7. Boley M.S., Shin W.C., Rigsbee D.K., Franklin D.A. Capacitance bridge measurements for magnetostriction // J. Appl. Phys. 2002. V. 91(10). P. 8210–8212. <https://doi.org/10.1063/1.1447512>

8. Belyaeva I.A., Kramarenko E.Y., Shamonin M. Magnetodielectric effect in magnetoactive elastomers: Transient response and hysteresis // *Polymer*. 2017. V. 127. P. 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.08.056>
9. Webster W.L. Magneto-striction in iron crystals // *Proceed. of the Royal Society A*. 1925. Iss. 109. P. 570–584. <https://doi.org/10.1098/rspa.1925.0146>
10. Shamonin M., Kramarenko E.Y. Highly responsive magnetoactive elastomers // *Novel Magnetic Nanostructures*. 2018. P. 221–245. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813594-5.00007-2>
11. Glavan G., Kettl W., Brunhube, A., Shamonin, M., Drevenšek-Olenik I. Effect of material composition on tunable surface roughness of magnetoactive elastomers // *Polymers*. 2019. V. 11(4) P. 594. <https://doi.org/10.3390/polym11040594>
12. Stepanov G.V., Borin D.Yu., Raikher Yu.L., Melenev P.V., Perov N.S. Motion of ferroparticles inside the polymeric matrix in magnetoactive elastomers // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2008. V. 20. P. 204121. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/20/204121>
13. Belyaeva I.A., Kramarenko E.Y., Stepanov G.V., Sorokin V.V., Stadler D., Shamonin M. Transient magnetorheological response of magnetoactive elastomers to step and pyramid excitations // *Soft Matter*. 2016. V. 12(11). P. 2901–2913. <https://doi.org/10.1039/C5SM02690C>
14. Sorokin V.V., Ecker E., Stepanov G.V., Shamonin M., Monkman G.J., Kramarenko E.Y., Khokhlov A.R. Experimental study of the magnetic field enhanced Payne effect in magnetorheological elastomers // *Soft Matter*. 2014. V. 10(43). P. 8765–8776. <https://doi.org/10.1039/C4SM01738B>

### References:

1. Belov K.P. Magnetostriction phenomena and their technical applications. Moscow: Nauka Publ., 1987. 158 p., (in Russ.).
2. Physical Encyclopedia: in 5 volumes. Ed. A.M. Prokhorov. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya (V. 1-2); Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya (v. 3-5), 1988-1999, (in Russ.).
3. Engdahl G. Handbook of Giant Magnetostrictive Material. San Diego: Academic, 2000. 386 p.
4. Elhajjar R., Law C.-T., Pegoretti A. Magnetostrictive polymer composites: Recent advances in materials, structures and properties. *Progr. Mater. Sci.* 2018; 97:204-229. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.005>
5. Chashin D.V., Burdin D.A., Fetisov L.Yu., Economov N.A., Fetisov Y.K. Precise measurements of magnetostriction of ferromagnetic plates. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2018; 11(1):30-34. <https://doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-1-30-34>
6. Samanta H., Nagata Y., Uchida T., Abe S. New optical technique for bulk magnetostriction measurement. *J. Magn. Magn. Mater.* 2000; 212(3):355-360. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00832-X](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00832-X)
7. Boley M. S., Shin W.C., Rigsbee D.K., Franklin D.A. Capacitance bridge measurements for magnetostriction. *J. Appl. Phys.* 2002; 91(10):8210-8212. <https://doi.org/10.1063/1.1447512>
8. Belyaeva I.A., Kramarenko E.Y., Shamonin M. Magnetodielectric effect in magnetoactive elastomers: Transient response and hysteresis. *Polymer*. 2017; 127:119-128. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.08.056>
9. Webster W.L. Magneto-striction in iron crystals. *Proceed. of the Royal Society A*. 1925; 109:570-584. <https://doi.org/10.1098/rspa.1925.0146>
10. Shamonin M., Kramarenko E.Y. Highly responsive magnetoactive elastomers. *Novel Magnetic Nanostructures*. 2018:221-245. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813594-5.00007-2>
11. Glavan G., Kettl W., Brunhuber A., Shamonin M., Drevenšek-Olenik I. Effect of material composition on tunable surface roughness of magnetoactive elastomers. *Polymers*. 2019; 11(4):594. <https://doi.org/10.3390/polym11040594>
12. Stepanov G.V., Borin D.Yu., Raikher Yu.L., Melenev P.V., Perov N.S. Motion of ferroparticles inside the polymeric matrix in magnetoactive elastomers. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2008; 20:204121. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/20/204121>
13. Belyaeva I.A., Kramarenko E.Y., Stepanov G.V., Sorokin V.V., Stadler D., Shamonin M. Transient magnetorheological response of magnetoactive elastomers to step and pyramid excitations. *Soft Matter*. 2016; 12(11):2901-2913. <https://doi.org/10.1039/C5SM02690C>
14. Sorokin V.V., Ecker E., Stepanov G.V., Shamonin M., Monkman G.J., Kramarenko E.Y., Khokhlov A.R. Experimental study of the magnetic field enhanced Payne effect in magnetorheological elastomers. *Soft Matter*. 2014; 10(43):8765-8776. <https://doi.org/10.1039/C4SM01738B>

### Об авторах:

**Савельев Дмитрий Владимирович**, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID D-8952-2019, Scopus Author ID 57196479660, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

**Фетисов Леонид Юрьевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID D-1163-2013, Scopus Author ID 26431336600, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

**Чашин Дмитрий Владимирович**, кандидат технических наук, ведущий инженер Научно-образовательного центра «Магнитоэлектрические материалы и устройства» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID D-9629-2019, Scopus Author ID 23977510200

**Шабин Павел Александрович**, студент кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Вьюник Дарья Андреевна**, студент кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Федулов Федор Александрович**, аспирант кафедры наноэлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID 57194284263

**Wolfgang Kettl**, студент магистратуры «Электротехника и микросистемная техника», Университет прикладных наук г. Регенсбург (58, Prüfeningstr., Regensburg 93049, Германия).

**Mikhail Shamonin**, Dr. Rer. Nat., профессор, факультет «Электротехника и информационные технологии», Университет прикладных наук г. Регенсбург (58, Prüfeningstr., Regensburg 93049, Германия). Scopus Author ID 7003493217, <https://orcid.org/0000-0001-5637-7526>. E-mail: [mikhail.chamonine@oth-regensburg.de](mailto:mikhail.chamonine@oth-regensburg.de)

#### *About the authors:*

**Dmitry V. Saveliev**, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID D-8952-2019, Scopus Author ID 57196479660, <https://orcid.org/0000-0001-7762-9198>

**Leonid Yu. Fetisov**, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID D-1163-2013, Scopus Author ID 26431336600, <https://orcid.org/0000-0002-3699-4321>

**Dmitry V. Chashin**, Leading Engineer of the Research and Educational Center «Magnetoelectric materials and Devices», MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID D-9629-2019, Scopus Author ID 23977510200

**Pavel A. Shabin**, Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Darya A. Vyunik**, Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Fedor A. Fedulov**, Postgraduate Student of the Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID 57194284263

**Wolfgang Kettl**, Master Student «Electrical Engineering and Microsystem Technology», Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (58, Prüfeningstr., Regensburg 93049, Germany).

**Mikhail Shamonin**, Dr. Rer. Nat., Professor, Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (58, Prüfeningstr., Regensburg 93049, Germany). Scopus Author ID 7003493217, <https://orcid.org/0000-0001-5637-7526>. E-mail: [mikhail.chamonine@oth-regensburg.de](mailto:mikhail.chamonine@oth-regensburg.de)

**Для цитирования:** Савельев Д.В., Фетисов Л.Ю., Чашин Д.В., Шабин П.А., Вьюник Д.А., Федулов Ф.А., Kettl W., Shamonin M. Метод измерения деформаций магнитоактивных эластомеров под действием магнитных полей // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 81–91. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-81-91>

**For citation:** Saveliev D.V., Fetisov L.Yu., Chashin D.V., Shabin P.A., Vyunik D.A., Fedulov F.A., Kettl W., Shamonin M. Method of measuring deformations of magnetoactive elastomers under the action of magnetic fields. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):81-91, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-81-91>

## Симметризованное приближение Максвелла-Гарнетта как эффективный метод исследования нанокompозитов

М.М. Яшин<sup>1,@</sup>,  
Х.Б. Мирзокулов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

<sup>2</sup>Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент 100200, Узбекистан

@Автор для переписки, e-mail: [ihkamax@mail.ru](mailto:ihkamax@mail.ru)

Рассмотрено приближение симметризованного Максвелла-Гарнетта (СМГ) как наиболее оптимальный метод эффективной среды для описания нанокompозитных структур. Данное приближение учитывает микроструктуру образца, что делает возможным расчет системы металл-диэлектрик. Приближение применимо также для гранулированных сплавов, которые состоят из металлических компонент. Поэтому данную методику можно рассматривать как универсальное приближение для описания широкого класса наноструктурных материалов. В настоящей статье обсуждаются различные методы эффективной среды. В них металлическая составляющая нанокompозитов и диэлектрическая матрица заменяются эффективной средой с эффективной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon^{\text{eff}}$ . Необходимо, чтобы частицы (гранулы) в таких структурах были малы по сравнению с длиной волны падающего на образец электромагнитного излучения. Основываясь на этом условии, мы рассчитали спектральные зависимости экваториального эффекта Керра (ЭЭК) в магнитных нанокompозитах на примере структуры  $(\text{CoFeZr})(\text{Al}_2\text{O}_3)$  при различных концентрациях магнитной компоненты. Моделирование проводили при малых и больших значениях концентрации (ниже и выше порога перколяции). Спектральные зависимости получали с учетом форм-фактора наночастиц и квазиклассического размерного эффекта. В работе обсуждается вклад различных механизмов, влияющих на вид спектров ЭЭК. С помощью симметризованного приближения Максвелла-Гарнетта найдены эффективные значения размера гранул исследуемых нанокompозитов и рассчитан эффективный тензор диэлектрической проницаемости (ТДП). Полученные значения ТДП позволили смоделировать спектральные зависимости магнитооптического экваториального эффекта Керра. Сделаны выводы об особенностях полученных спектральных зависимостей в видимой и инфракрасной области спектра. Отмечена фундаментальная и практическая значимость полученных результатов и показана важность методов эффективной среды для изучения оптических, транспортных и магнитооптических свойств магнитных нанокompозитов.

**Ключевые слова:** наноструктуры, магниторефрактивный эффект, магнитоотражение, магнитопроникание, магнитосопротивление, спин-зависящее рассеяние.

## Symmetrized Maxwell-Garnett Approximation as an Effective Method for Studying Nanocomposites

Maksim M. Yashin<sup>1,@</sup>,  
Hotam Bakhtiyor ugli Mirzokulov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia*

<sup>2</sup>*Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorazmiy, Tashkent 100200, Uzbekistan*

@Corresponding author e-mail: [ihkamax@mail.ru](mailto:ihkamax@mail.ru)

The symmetrized Maxwell-Garnett (SMG) approximation is considered as the most optimal method of an effective medium for the description of nanocomposite structures. This approximation takes into account the microstructure of the sample, which makes it possible to calculate the metal-dielectric system. Thus, SMG describes with good accuracy the structure of the nanocomposite. Besides, this approximation is applicable for granular alloys consisting of metal components. As a result, this technique can be considered as a universal approximation to describe a wide class of nanostructured materials. At the same time, this article discusses various methods of effective environment. In these methods, the metal component of nanocomposites and the dielectric matrix are replaced by an effective medium with effective permittivity  $\epsilon^{\text{eff}}$ . It is necessary that the particles (granules) in such structures be small in comparison with the wavelength of electromagnetic radiation incident on the sample. Based on this, the spectral dependences of the transverse Kerr effect (TKE) in magnetic nanocomposites were calculated with (CoFeZr)(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) structure as an example at different concentrations of the magnetic component. The simulation was carried out at small and large concentrations (below and above the percolation threshold). The spectral dependences were obtained taking into account the form factor of nanoparticles and the quasi-classical size effect. Besides, the authors note and discuss in this paper the contribution of various mechanisms that affect the type of spectra of the transverse Kerr effect. Using the symmetrized Maxwell-Garnett approximation, the effective values of the granule size of the nanocomposites under study were found, and the tensor of effective dielectric permittivity (TEDP) was calculated. The obtained TEDP values allowed to simulate the spectral dependences of the magneto-optical transverse Kerr effect. The authors discuss and draw conclusions about the features of the obtained spectral dependences in both the visible and infrared regions of the spectrum. In addition, the practical and fundamental importance of the obtained results is noted. The importance of effective medium methods for the study of optical, transport and magneto-optical properties of magnetic nanocomposites is shown.

**Keywords:** magnetic nanocomposites, transverse Kerr effect, spectral dependence, symmetric Maxwell-Garnett approximation, effective medium, size effect.

### Введение

В настоящее время особую актуальность приобретают исследования оптических и магнитооптических свойств нанокompозитов [1–4]. Нанокompозитом называется многокомпонентная структура, в которой хотя бы один из компонентов в одном, двух или трех измерениях имеет размеры, не превышающие 100 нм. В подобных структурах воз-

можно существенное усиление таких эффектов, как туннельное магнитосопротивление, экваториальный эффект Керра (ЭЭК), магнитооптическая активность, аномальный эффект Холла и др. Данные эффекты представляют фундаментальный и практический интерес. Для исследования различных магнитооптических свойств наноструктур применяются множество методов, описывающих характеристические параметры нанокомпозитов.

Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей магнитооптических свойств нанокомпозитов в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра в рамках самого оптимального метода эффективной среды – симметризованного приближения Максвелла–Гарнетта. Моделирование спектров проводили на примере нанокомпозитов  $(\text{CoFeZr})(\text{Al}_2\text{O}_3)$ .

### Теоретическая часть

Как отмечалось выше, для моделирования магнитооптических свойств нанокомпозитных материалов используются различные методы эффективной среды. В этих методах металлическая составляющая нанокомпозитов и диэлектрическая матрица заменяются эффективной средой с эффективной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon^{\text{eff}}$ , причем необходимо, чтобы частицы (гранулы) в таких структурах были малы по сравнению с длиной волны падающего на образец электромагнитного излучения. Для описания магнитооптических свойств наноструктур в зависимости от концентрации  $X$  магнитной компоненты применяются различные приближения, например, при малых концентрациях  $X$  – приближение Максвелла–Гарнетта (МГ) [5], при средних – приближение Бруггемана (ЕМА) [5]. Наиболее оптимальным представляется является симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта (СМГ). Преимущество СМГ заключается в возможности изучения нанокомпозитов и при малых, и при больших концентрациях металлической (магнитной) компоненты, а также вблизи перколяционного перехода, где кардинальным образом меняются электрические, магнитные, оптические и другие свойства [6, 7].

Финальные формулы СМГ имеют следующий вид для диагональных компонент (оптическая составляющая) тензора диэлектрической проницаемости (ТДП):

$$P_A \frac{\varepsilon_A^{MG} - \varepsilon^{EMA}}{\varepsilon^{EMA} + \frac{1}{2}(1-L_A)(\varepsilon_A^{MG} - \varepsilon^{EMA})} + P_B \frac{\varepsilon_B^{MG} - \varepsilon^{EMA}}{\varepsilon^{EMA} + \frac{1}{2}(1-L_B)(\varepsilon_B^{MG} - \varepsilon^{EMA})} = 0, \quad (1.1)$$

а для недиагональных компонент (магнитооптическая составляющая):

$$P_A \frac{\gamma_A^{MG} - \gamma^{EMA}}{\varepsilon^{EMA} + \frac{1}{2}(1-L_A)(\varepsilon_A^{MG} - \varepsilon^{EMA})} + P_B \frac{\gamma_B^{MG} - \gamma^{EMA}}{\varepsilon^{EMA} + \frac{1}{2}(1-L_B)(\varepsilon_B^{MG} - \varepsilon^{EMA})} = 0 \quad (1.2)$$

где  $P_A$  и  $P_B$  – вероятность присутствия частиц  $A$  и  $B$ ;

$L_{A,B}$  – форм-факторы соответствующих эллипсоидальных частиц;

$\varepsilon^{MG}$  и  $\varepsilon^{EMA}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость, полученная с помощью методов Максвелла–Гарнетта и Бруггемана, соответственно, при этом  $\varepsilon$  является комплексной величиной и равна  $\varepsilon^i = \varepsilon_1^i - i\varepsilon_0^i$ ;

$\gamma^{EMA}$  и  $\gamma^{MG}$  – магнитооптические компоненты ТДП.

$$P_A = \frac{u_1}{u_1 + u_2}, \quad P_B = \frac{u_2}{u_1 + u_2} \quad (2)$$

где  $u_1 = (1 - X^{\frac{1}{3}})^3$ ,  $u_2 = (1 - (1 - X^{\frac{1}{3}}))^3$ .

Формулы (1.1), (1.2) и (2) были получены в [7, 8].

Поскольку для исследования выбран магнитный наноккомпозит  $(\text{CoFeZr})(\text{Al}_2\text{O}_3)$ , то в данном приближении рассматривается взвесь сферических частиц  $\text{CoFeZr}$  с диэлектрической проницаемостью  $\bar{\varepsilon}_1 = \varepsilon_1 - i\varepsilon_1''$  и частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с диэлектрической постоянной частиц  $\bar{\varepsilon}_0 = \varepsilon_0 - i\varepsilon_0''$ , где  $\varepsilon_1 = \varepsilon_1^{MG}$  и  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0^{MG}$ .

Рассчитав оптические и магнитооптические параметры наноккомпозита, по известным формулам [7] находят величину экваториального эффекта Керра (ЭЭК). Важно отметить, что выбранное приближение учитывает микроструктуру образца и делает возможным расчет системы металл–диэлектрик, т. е. наноккомпозита. Оно применимо также для гранулированных сплавов, состоящих из металлических компонент. Таким образом, указанную методику можно рассматривать как универсальное приближение для описания широкого класса наноструктур.

### Квазиклассический размерный эффект

В ИК-области спектра при исследовании оптических и магнитооптических величин необходимо учитывать рассеяние на поверхностях гранул, которое приводит к квазиклассическому размерному эффекту [1, 3]. Это особенно важно вблизи порога перколяции при сильном изменении оптических, электрических, транспортных, магнитооптических и других свойств наноккомпозитов.

Размерный эффект можно учесть по следующим формулам для оптических [5]:

$$\varepsilon_{\text{mod}} = \varepsilon_0 + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + \frac{i}{\tau_{\text{bulk}}})} + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + \frac{i}{\tau_{\text{part}}})} \quad (3)$$

где  $\omega$  – частота электромагнитного излучения;

$\omega_p$  – плазменная частота;

$\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость магнитной компоненты;

$\tau_{\text{bulk}}$  – время свободного пробега в образце;

$\tau_{\text{part}}$  – время свободного пробега в грануле;

и магнитооптических величин [7]:

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

где  $\sigma_{xy}^{bulk} = 4\pi M_s R_{bulk} / \rho_{bulk}^2$ ,  $\sigma_{xy}^{gr} = 4\pi M_s R_{gr} / \rho_{gr}^2$ ;

$R_{gr}$  – коэффициент аномального эффекта Холла (АЭХ);

$M_s$  – намагниченность насыщения;

$\rho_{bulk}$  – удельное сопротивление образца;

$\rho_{gr}$  – удельное сопротивление гранулы.

Размерный эффект оказывает влияние на удельное сопротивление.

$$\rho_{gr} = \rho_{bulk} (1 + l / r_0) \quad (5)$$

и на коэффициент АЭХ:

$$R_{gr} = R_{bulk} + 0.2 R_s \frac{l}{r_0} \left( 1 + \frac{l}{r_0} \right) \quad (6)$$

где  $R_s$  – значение коэффициента АЭХ гранул.

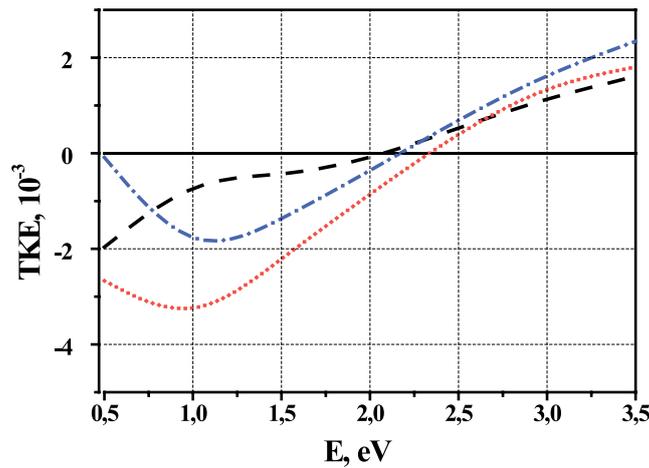
Таким образом, в рамках приближения СМГ можно моделировать комплексное изменение параметров в широком спектральном диапазоне. Необходимо подчеркнуть, что преимуществом данного метода является возможность использования моделирования для определения значения коэффициента аномального эффекта Холла ( $R_s/R_{bulk}$ ), которое нельзя определить экспериментальным путем. Это чрезвычайно важно для исследования магнитооптических свойств нанокомпозитов [8].

### Результаты и их обсуждение

Расчеты ЭЭК проводили в рамках СМГ с учетом всего вышеизложенного на примере нанокомпозита  $(\text{CoFeZr})(\text{Al}_2\text{O}_3)$ . По формулам (1)–(6) в рамках приближения СМГ были рассчитаны спектральные зависимости ЭЭК исследуемых нанокомпозитных материалов  $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$  при различных значениях  $X$ . Спектральные зависимости ЭЭК при  $X = 23\%$  (ниже порога перколяции) представлены на рис. 1. В рамках моделирования при размере частиц  $r_0 = 1.2$  нм и значении отношения  $R_s/R_{bulk} = 1.85 \cdot 10^6$ , что соответствует реальным параметрам нанокомпозитов, получены спектральные зависимости ЭЭК при различных значениях  $L_A$  и  $L_B$  (форм-факторов частиц эффективной среды) для трех различных случаев.

Отметим, что в процессе моделирования спектров ЭЭК наблюдались значительные изменения спектров в ИК-области. Наблюдаемые результаты позволяют сделать вывод, что данный эффект зависит от размера частиц  $r_0$  и коэффициента  $R_s/R_{bulk}$ . Полученные результаты хорошо согласуются с работами [9, 10].

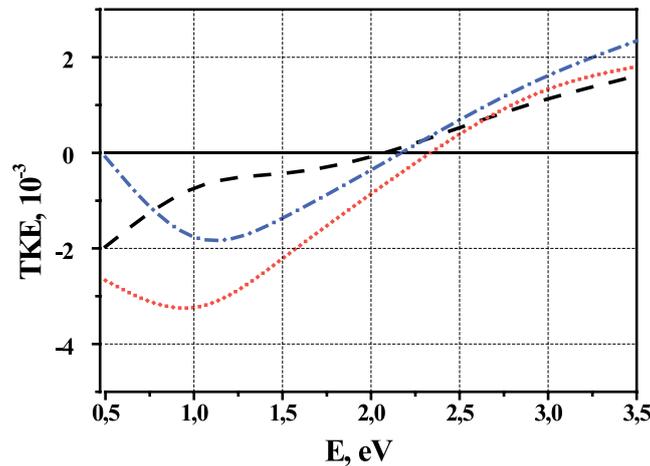
Обращает на себя внимание тот факт, что при средних концентрациях ( $30\% < X < 50\%$ )  $\text{CoFeZr}$  значения ЭЭК чувствительны к величинам форм-фактора, размерам частиц и коэффициенту  $R_s/R_{bulk}$  как в ИК-, так и в видимой области спектра. Причиной данного эффекта является порог перколяции, который наблюдается при средних концентрациях магнитной компоненты нанокомпозита. Теоретический порог перколяции для трехмерных структур проявляется при концентрации  $X_c = 0.33$ , а для двумерных –  $X_c = 0.67$ , если частицы имеют сферическую форму.



**Рис. 1.** Спектральные зависимости ЭЭК нанокompозита  $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ :  
 при  $L_A = 0.42$  и  $L_B = 0.8$  – пунктирная линия (черный);  
 при  $L_A = 0.95$  и  $L_B = 0.9$  – штрих-пунктирная линия (синий);  
 при  $L_A = 0.95$  и  $L_B = 0.9$  – точки (красный).

В качестве другого примера использования СМГ выполнено моделирование спектров ЭЭК при концентрации магнитной компоненты  $X = 48\%$  (выше порога перколяции). Спектры приведены на рис. 2, при этом  $r_0 = 1.1$  нм и  $R_S/R_{bulk} = -100$ .

Необходимо подчеркнуть, что при больших концентрациях магнитной составляющей  $\text{CoFeZr}$  также основной вклад в спектральные кривые в ИК-области за счет внутризонных переходов вносят размер частиц и коэффициент  $R_S/R_{bulk}$ . Кроме того, резко меняется форма модельной кривой при малых изменениях размера частиц, что во многом связано с близостью к порогу перколяции.



**Рис. 2.** Спектральные зависимости ЭЭК нанокompозита  $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}$ :  
 при  $L_A = 0.525$  и  $L_B = 0.43$  – пунктирная линия (красный);  
 при  $L_A = 0.515$  и  $L_B = 0.42$  – штрих-пунктирная линия (синий);  
 при  $L_A = 0.515$  и  $L_B = 0.42$  – точки (черный).

### Заключение

В ходе выполнения работы подробно рассмотрено симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта как оптимальный метод исследования нанокompозитов. При рас-

четах спектров ЭЭК варьировались значения форм-фактора ( $L$ ), размера частиц ( $r_0$ ) и коэффициента  $R_s/R_{bulk}$ . Если значения форм-фактора и размер частиц можно определить с помощью экспериментальных методов, то коэффициент  $R_s/R_{bulk}$  измерить нельзя. Выполненная нами оценка указанного параметра является важным научным результатом. Исследование спектральных зависимостей экваториального эффекта Керра нанокомпозитов показало, что размер частиц и коэффициент  $R_s/R_{bulk}$  вносят значительный вклад в ЭЭК в ИК-области спектра при больших и при малых концентрациях магнитной компоненты. Установлено, что форм-фактор при малых концентрациях существенно меняет ЭЭК в видимой области спектра, а при больших – во всем спектральном диапазоне.

Таким образом, исследование магнитооптических свойств нанокомпозитных материалов оптимальным методом эффективной среды – симметризованным приближением Максвелла–Гарнетта – является важной и перспективной областью исследования [11, 12]. В рамках данного метода можно разделить вклад различных механизмов в магнитооптические свойства нанокомпозитов. Методы эффективной среды позволяют, не разрушая структуру нанокомпозита, изучать их свойства, что найдет широкое применение в электронике и наноэлектронике [13–16].

### Литература:

1. Фостер Л. Нанотехнологии. Наука, инновации и возможности. М.: Техносфера, 2008. 352 с.
2. Kulkarni S., Ramaswamy B., Horton E., Gangapuram S., Nacev A., Depireux D., Shimoji M., Shapiro B. Quantifying the motion of magnetic particles in excised tissue: Effect of particle properties and applied magnetic field // *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. V. 393 P. 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.05.069>
3. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2009. 416 с.
4. Вызулин С.А., Горобинский А.В., Калинин Е. Ю., Лебедева Е.В., Ситников А.В., Сариев Н.Е. Трофименко И.Т., Чекрыгина Ю.И., Шипкова И.Г. ФМР, магнитные и резистивные свойства мультислойных наноструктур  $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$  // *Известия РАН. Серия физическая.* 2010. Т. 74. № 10. С. 1441–1443.
5. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite films // *J. Appl. Phys.* 1984. V. 55. P. 3382–3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
6. Ganshina E., Kumaritova R., Bogoroditsky A., Kuzmichev M., Ohnuma S. J. Magneto-optical spectra of insulating granular system Co-Al-O // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. V. 203. № 1-3. P. 241–243. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00275-9](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00275-9)
7. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrized Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites // *J. Magn. Soc. Japan.* 1999. V. 23. P. 382–386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
8. Sheng P. Theory for the dielectric function of granular composite media // *Phys. Rev. Lett.* 1980. V. 45. P. 60–63. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.60>
9. Грановский А.Б., Кузьмичев М.В., Юрасов А.Н. Влияние квазиклассического размерного эффекта на оптические и магнитооптические свойства гранулированных сплавов // *Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия.* 2000. № 6. С. 67–69.
10. Ландау Л., Лифшиц Е. Теоретическая физика: в 10-ти т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2017. 661 с.
11. Юрасов А.Н. О распределении размера гранул в нанокомпозитах // *Российский технологический журнал.* 2016. Т. 4. № 1 С. 25–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-1-25-27>
12. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2016. 480 с.
13. Buravtsova V., Gan 'shina E., Lebedeva E., Syr 'ev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites-semiconductor multilayers // *Solid State Phenomena.* 2011. V. 168-169. P. 533–536. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.168-169.533>
14. Sarkar T., Muscas G., Barucca G. Tunable single-phase magnetic behavior in chemically synthesized  $\text{AFeO}_3\text{-MFe}_2\text{O}_4$  (A = Bi or La, M = Co or Ni) nanocomposites // *Nanoscale.* 2018. V. 10. № 48. P. 22990–23000. <https://doi.org/10.1039/C8NR06922K>
15. Rashid Z., Soleimani M., Ghahremanzadeh R. Effective surface modification of  $\text{MnFe}_2\text{O}_4@/\text{SiO}_2@/\text{PMIDA}$  magnetic nanoparticles for rapid and high-density antibody immobilization // *Appl. Surface Sci.* 2017. V. 426. P. 1023–1029. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.246>

16. Hosseinifar A., Shariaty-Niassar M., Ebrahimi S., Moshref-Javadi M. Synthesis, characterization, and application of partially blocked amine-functionalized magnetic nanoparticles // *Langmuir*. 2017. V. 33. № 51. P. 14728–14737. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b02093>

### References:

1. Foster L. Nanotechnology. Science, Innovation and Opportunities. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2008. 352 p., (in Russ.).
2. Kulkarni S., Ramaswamy B., Horton E., Gangapuram S., Nacev A., Depireux D., Shimoji M., Shapiro B. Quantifying the motion of magnetic particles in excised tissue: Effect of particle properties and applied magnetic field. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015; 393:243-252. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.05.069>
3. Gusev A.I. Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies. Moscow: Fizmatlit Publ., 2009. 416 p., (in Russ.).
4. Vyzulin S.A., Gorobinsky A.V., Kalinin E.Yu., Lebedeva E.V., Sitnikov A.V., Syr'ev N.E., Trofimenko I.T., Chekrygina, Y.I., Shipkova I.G. Ferromagnetic resonance, magnetic properties and resistivity of  $(\text{CoFeZr})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1-x}/\text{Si}$  multilayer nanostructures. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2010; 74(10):1380-1382. <https://doi.org/10.3103/S1062873810100151>
5. Niklasson G.A., Granqvist C.G. Optical properties and solar selectivity of coevaporated Co-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite films. *J. Appl. Phys.* 1984; 55:3382-3410. <https://doi.org/10.1063/1.333386>
6. Ganshina E., Kumaritova R., Bogoroditsky A., Kuzmichev M., Ohnuma S. J. Magneto-optical spectra of insulating granular system Co-Al-O. *J. Magn. Magn. Mater.* 1999; 203(1-3):241-243. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00275-9](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00275-9)
7. Granovsky A., Kuzmichev M., Clerc J.P. The symmetrized Maxwell-Garnett approximation for magneto-optical spectra of ferromagnetic composites. *J. Magn. Soc. Japan*. 1999; 23:382-386. <https://doi.org/10.3379/jmsjmag.23.382>
8. Sheng P. Theory for the dielectric function of granular composite media. *Phys. Rev. Lett.* 1980; 45:60-63. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.60>
9. Granovsky A.B., Kuzmichev M.V., Yurasov A.N. The influence of the semiclassical size effect on the optical and magneto-optical properties of granular alloys. *Vestnik MGU. Fizika. Astronomiya* = Moscow University Physics Bulletin. 2000; 6:67-69., (in Russ.).
10. Landau L., Lifshits E. Theoretical physics. V. 8. Electrodynamics of continuous media. Moscow: Fizmatlit Publ., 2017. 661 p., (in Russ.).
11. Yurasov A.N. About distribution on the granule size in nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2016; 4(1):25-27. (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-1-25-27>
12. Chaplygin Yu.A. Nanotechnology in electronics. Moscow: Tekhnosfera Publ., 2016. 480 p., (in Russ.).
13. Buravtsova V., Gan'shina E., Lebedeva E., Syr'ev N., Trofimenko I., Vyzulin S., Shipkova I., Phonghirun S., Kalinin Yu., Sitnikov A. The features of TKE and FMR in nanocomposites- semiconductor multilayers. *Solid State Phenomena*. 2011; 168-169:533-536. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.168-169.533>
14. Sarkar T., Muscas G., Barucca G. Tunable single-phase magnetic behavior in chemically synthesized  $\text{AFeO}_3\text{-MFe}_2\text{O}_4$  (A = Bi or La, M = Co or Ni) nanocomposites. *Nanoscale*. 2018; 10(48):22990-23000. <https://doi.org/10.1039/C8NR06922K>
15. Rashid Z., Soleimani M., Ghahremanzadeh R. Effective surface modification of  $\text{MnFe}_2\text{O}_4@\text{SiO}_2@$  PMIDA magnetic nanoparticles for rapid and high-density antibody immobilization. *Appl. Surface Sci.* 2017; 426:1023-1029. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.07.246>
16. Hosseinifar A., Shariaty-Niassar M., Ebrahimi S., Moshref-Javadi M. Synthesis, characterization, and application of partially blocked amine-functionalized magnetic nanoparticles. *Langmuir*: 2017; 33(51):14728-14737. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b02093>

#### Об авторах:

**Яшин Максим Михайлович**, ассистент кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1). ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57191628251, <https://orcid.org/0000-0001-8022-935>

**Мирзокулов Хотам Бахтиер угли**, ассистент кафедры «Телекоммуникационный инжиниринг» Самаркандского филиала Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий (100200, Узбекистан, Ташкент, ул. Амира Темура, д. 108).

*About the authors:*

**Maksim M. Yashin**, Assistant of Professor of the Chair of Physics, Bauman Moscow State Technical University (5, Build. 1, 2nd Baumanskaya st., Moscow 1105005, Russia). ResearcherID G-6809-2017, Scopus Author ID 57191628251, <https://orcid.org/0000-0001-8022-935>

**Hotam Bakhtiyor ugli Mirzokulov**, Assistant of Professor of the Chair «Telecommunications Engineering», Samarkand branch of Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi (108, Amir Temur st., Tashkent 100200, Uzbekistan).

**Для цитирования:** Яшин М.М., Мирзокулов Х.Б. Симметризованное приближение Максвелла–Гарнетта как эффективный метод исследования нанокompозитов // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 4. С. 92–100. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>

**For citation:** Yashin M.M., Mirzokulov H.B. Symmetrized Maxwell–Garnett approximation as an effective method for studying nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019; 7(4):92-100, (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-92-100>

---

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

Дата опубликования 31 июля 2019 г.

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

<http://rtj-mirea.ru>

