

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





ISSN 2500-316X

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

РОССИЙСКИЙ технологический журнал

**RUSSIAN
TECHNOLOGICAL
JOURNAL**

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

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

**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2020, том 8, № 6**

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, No. 6**

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6>

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



**Российский технологический журнал =
Russian Technological Journal
2020, том 8, № 6**

Дата опубликования 30 ноября 2020 г.

**Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal =
Russian Technological Journal
2020, vol. 8, No. 6**

Publication date November, 30 2020.

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

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

Периодичность: 6 раз в год.

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

Six issues a year are published.

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

Учредитель и издатель:

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

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

Founder and Publisher:

Federal State Budget
Educational Institution
of Higher Education

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

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых
научных журналов ВАК РФ,
индексируется в

DOAJ,

РИНЦ (Science Index),

Ulrich's International Periodicals Directory.

The journal is included into the List of peer-reviewed science
press of the State Commission for Academic Degrees and
Titles of Russian Federation.

The journal is indexed:

DOAJ, Science Index,

Ulrich's International Periodicals Directory.

Главный редактор:

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

Editor-in-Chief:

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

Редакция:

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

Editorial staff:

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

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

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

Редакционная коллегия

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

Editorial Board

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Лесько С.А.** 9
Модели и сценарии реализации угроз для интернет-ресурсов
- Магомедов Ш.Г., Колясников П.В., Никульчев Е.В.** 34
Разработка технологии контроля доступа к цифровым порталам и платформам на основе встроенных в интерфейс оценок времени реакций пользователей

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Каганов В.И., Буй Хыу Чык** 47
Беспроводная передача электрической энергии
- Легкий Н.М., Михеев Н.В.** 54
Выбор расположения излучателей в неэквидистантной антенной решетке
- Смирнов А.В.** 63
Оптимизация характеристик цифровых фильтров одновременно в частотной и временной областях

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Глинский И.А., Зенченко Н.В., Пономарев Д.С.** 78
Металинза на основе одиночных диэлектрических микрочастиц для фотопроводящих оптико-терагерцовых преобразователей
- Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Меньшова С.Б., Исаев И.М.** 87
Перспективы применения ферритов с высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей в качестве радиопоглощающих материалов
- Серов Д.А., Першина Х.В., Бурдина И.В.** 109
Моделирование наноантенн для их дальнейшего применения в качестве устройств приема-передачи данных на 3D-интегральных схемах
- Хусяинов Д.И., Горбатова А.В., Буряков А.М.** 121
Генерация терагерцового излучения с поверхности объемного слоистого и монослойного диселенида вольфрама

СОДЕРЖАНИЕ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

Тарланов А.Т., Курбанисмаилов З.М.

Учёт магнитного поля системы электроснабжения энергоёмкого
технического объекта **130**

Чертилин К.Э., Ивченко В.Д.

Настройка адаптивных пропорционально-интегрально-дифференциальных
регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения
газотурбинного двигателя **143**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Приходько В.Ю., До Ву Минь Тханг

Дифракция низкочастотных волн на упругих тонкостенных оболочках
вращения **157**

Чесалин А.Н., Гродзенский С.Я., Фам Ван Ты, Нилов М.Ю., Агафонов А.Н.

Технология оценки рисков на этапах жизненного цикла продукции
с использованием нечеткой логики **167**

CONTENTS

INFORMATION SYSTEMS. COMPUTER SCIENCES. ISSUES OF INFORMATION SECURITY

Lesko S.A.

Models and scenarios of implementation of threats for internet resources 9

Magomedov S.G., Kolyasnikov P.V., Nikulchev E.V.

Development of technology for controlling access to digital portals and platforms based on estimates of user reaction time built into the interface 34

MODERN RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Kaganov W.I., Bui Huu Chuc

Wireless power transmission 47

Legkiy N.M., Mikheev N.V.

Selection of location of radiators in a non-equivalent antenna array 54

Smirnov A.V.

Optimization of digital filters performances simultaneously in frequency and time domains 63

MICRO- AND NANOELECTRONICS. CONDENSED MATTER PHYSICS

Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Ponomarev D.S.

All-dielectric metalens based on a single colloidal particle for photoconductive optical-to-terahertz switches 78

Kostishin V.G., Vergazov R.M., Menshova S.B., Isaev I.M.

Prospects for the use of ferrites with high magnetic permeability and permittivity as radio-absorbing materials 87

Serov D.A., Pershina K.V., Burdina I.V.

Nanoantenna modelling for their further use as data transmitter-receiver devices on 3-d integral circuits 109

Khusyainov D.I., Gorbatova A.V., Buryakov A.M.

Terahertz generation from surface of the bulk and monolayer tungsten diselenide 121

CONTENTS

ANALYTICAL INSTRUMENTATION AND TECHNOLOGY

Tarlanov A.T., Kurbanismailov Z.M.

Accounting of the magnetic field of the power supply system
of a power-capacitive technical object 130

Chertilin K.E., Ivchenko V.D.

Configuring adaptive PID-controllers
of the automatic speed control system of the GTE 143

MATHEMATIC MODELING

Prikhodko V.Yu., Thang Minh Vu Do

Diffraction of low-frequency waves on elastic thin-walled shells of rotation 157

Chesalin A.N., Grodzensky S.Ya., Pham Van Tu, Nilov M.Yu., Agafonov A.N.

Technology for risk assessment at product lifecycle stages using fuzzy logic 167

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-9-33>



УДК 004.056.53

Модели и сценарии реализации угроз для интернет-ресурсов

С.А. Лесько

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

Для облегчения обнаружения различных уязвимостей существует множество различных инструментов (сканеров), которые могут помочь в анализе безопасности веб-приложений и облегчить разработку их защиты. Но данные инструменты в большинстве своём могут только идентифицировать проблемы и не способны устранять их. Поэтому знания разработчика безопасности являются ключевым фактором при построении безопасного веб-ресурса. Для устранения проблем безопасности приложений разработчики должны знать все пути и векторы проведения различных атак для того, чтобы иметь возможность разрабатывать различные механизмы защиты. В данном обзоре рассмотрены две из наиболее опасных уязвимостей в сфере веб-технологий: SQL-инъекции и XSS-атаки (межсайтовый скриптинг, англ. CrossSite Scripting - XSS), а также конкретные случаи и примеры их применения, различные подходы к выявлению уязвимостей в приложениях и предотвращению угроз. Межсайтовый скриптинг также, как и атаки SQL-инъекций, связан с проверкой входных данных. Механизмы этих атак очень схожи, но в XSS-атаках жертвой является сам пользователь, а в атаках SQL-инъекцией – сервер базы данных (БД) веб-приложения. При XSS-атаках вредоносный контент доставляется пользователям с использованием языка программирования, выполняемого на стороне клиента, такого как JavaScript, а при использовании SQL-инъекции используется язык запросов к БД SQL. При этом XSS-атаки, в отличие от SQL-инъекций, наносят вред исключительно клиентской стороне, оставляя сервер приложения в рабочем состоянии. Разработчики должны разрабатывать защиту, как для серверных составляющих, так и для клиентской части веб-приложения.

Ключевые слова: компьютерная и сетевая безопасность, модели и сценарии угроз, интернет-ресурсы, SQL-инъекции, XSS-атаки (межсайтовый скриптинг).

Для цитирования: Лесько С.А. Модели и сценарии реализации угроз для интернет-ресурсов. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):9-33. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-9-33>

Models and scenarios of implementation of threats for internet resources

Sergey A. Lesko

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

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

To facilitate the detection of various vulnerabilities, there are many different tools (scanners) that can help analyze the security of web applications and facilitate the development of their protection. But these tools for the most part can only identify problems, and they are not capable of fixing them. Therefore, the knowledge of the security developer is a key factor in building a secure Web resource. To resolve application security problems, developers must know all the ways and vectors of various attacks in order to be able to develop various protection mechanisms. This review discusses two of the most dangerous vulnerabilities in the field of Web technologies: SQL injections and XSS attacks (cross-site scripting – XSS), as well as specific cases and examples of their application, as well as various approaches to identifying vulnerabilities in applications and threat prevention. Cross-site scripting as well as SQL-injection attacks are related to validating input data. The mechanisms of these attacks are very similar, but in the XSS attacks the user is the victim, and in the SQL injection attacks, the database server of the Web application. In XSS attacks, malicious content is delivered to users by means of a client-side programming language such as JavaScript, while using SQL injection, the SQL database query language is used. At the same time, XSS attacks, unlike SQL injections, harm only the client side leaving the application server operational. Developers should develop security for both server components and the client part of the web application.

Keywords: computer and network security, threat models and scenarios, Internet resources, SQL injections, XSS attacks (crosssite scripting).

For citation: Lesko S.A. Models and scenarios of implementation of threats for internet resources. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):9-33 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-9-33>

Введение

Перед обсуждением безопасности веб-ресурсов или атак на них, важно понять эволюцию веб-приложений, их возрастающую сложность и первостепенную важность, которую они играют сегодня в жизни более чем миллиарда людей.

Появление веб-приложений первого поколения было строго ограничено их способностью предоставлять больше информации, чем брошюра, которую вы могли бы получить по почте. Статический HTML был предоставлен как инструмент для отображения изображений и текстовой информации.

По мере того, как доступ к Интернету становился все более повсеместным, потребности пользователей, обращающихся к веб-приложениям, также возрастали. В результате веб-приложения эволюционировали, обеспечив пользователям такие удобства, как поиск информации, её публикацию и загрузку.

CGI (англ. Common Gateway Interface – общий интерфейс шлюза) был первым скачком вперед в этом прогрессе. CGI предоставил пользователям возможность взаимодействовать с веб-страницами путем отправки данных в формы. После отправки на сервер CGI сценарии обрабатывают эти данные и представляют сгенерированный HTML-код обратно конечному пользователю. Благодаря взаимодействию с конечными пользователями, CGI фактически стал одним из первых известных векторов атак на веб-приложения.

Разработчики веб-приложений не ограничились работой со сценариями CGI, вместо этого появлялись новые более развитые платформы и фреймворки. PHP, ASP.NET, J2EE, AJAX, Ruby and Rails и другие языки появились, включив в себя больше интерактивных возможностей, предоставив пользователям больше гибкости и мощности при управлении данными и рабочим процессом в веб-приложениях.

Обеспечение безопасности веб-ресурсов стало невероятно важным аспектом, поскольку информация, обрабатываемая веб-приложениями, стала критически важной для клиентов, организаций и стран.

Веб-приложения управляют широким спектром информации, включая финансовые данные, медицинские записи, номера социального страхования, интеллектуальную собственность и данные национальной безопасности. Веб-приложения должны обрабатывать эту информацию надежно, сохраняя при этом эффективность и доступность.

В целом под безопасностью веб-приложений можно понимать защиту конфиденциальности, целостности и доступности ресурсов в интернет-пространстве. Веб-службы и приложения сформировали новый ландшафт обмена информацией, который повысил производительность электронного бизнеса. Однако с другой стороны, также значительно возросло и количество киберугроз из-за растущей популярности веб-приложений.

Предпринимаются огромные усилия по смягчению последствий этих атак с помощью различных механизмов безопасности в виде сканеров, систем обнаружения вторжений, устройств шифрования и брандмауэров веб-приложений. Атаки на веб-приложения могут включать в себя неправильные конфигурации безопасности, нарушение аутентификации и управления сессией или другие проблемы.

Однако одни из наиболее опасных и распространенных атак на веб-приложения используют уязвимости, связанные с неправильной проверкой или фильтрацией именно ненадежных входов, что приводит к инъекции вредоносного скрипта или кода языка, специфичного для домена. Атаки данного типа могут включать в себя, например, Cross-Site Scripting (XSS), SQL-инъекции и другие.

В течение последних нескольких лет данные атаки возглавляют списки наиболее опасных уязвимостей, опубликованных в OWASP, MITRE и другими подобными организациями.

Рассмотрим пример популярного проекта «Top-10» OWASP, целью которого является повышение осведомленности о методах защиты веб-приложений, а также выявление некоторых из наиболее важных рисков, с которыми могут столкнуться разработчики и

пользователи. В трех последних списках «Тор-10» 2010, 2013, 2017 годов в пятерке лучших позиций доминируют различные инъекционные атаки.

В то же время злоумышленники находят новые пути, чтобы обойти защитные механизмы с использованием различных методов, несмотря на многочисленные вводимые меры противодействия. Например, уже к 2013 году было предложено более 20 средств защиты от атак SQL-инъекциями. С тех пор данное число удвоилось, в то время как исследователи указывают, что в последние годы и количество атак SQL-инъекциями неуклонно возрастает.

В данном литературном обзоре, основанном на классификации атак из списка OWASP «ТОР-10», будут рассмотрены следующие детали, связанные с угрозами веб-ресурсов:

- 1) несколько наиболее опасных по версии OWASP векторов атак;
- 2) методы и сценарии проведения данных атак;
- 3) наиболее действенные методы практической защиты веб-приложений и веб-сервисов.

1. Внедрение вредоносного кода (Code injection)

Инъекции кода являются одними из наиболее важных и распространённых типов атак, направленных на веб-ресурсы. Уже несколько лет подряд именно данный тип атак занимает самую верхнюю строчку в списках OWASP.

Атаки данного типа имеют большое количество различных вариаций (например, инъекция в командах ОС, XPath-инъекция, LDAP-инъекция), но на сегодняшний момент наиболее используемой и действенной из них является SQL-инъекция, применяемая злоумышленниками на протяжении многих лет. В статье [1] исследователи, проанализировав множество Web-атак, приводят именно SQL-инъекции как наиболее популярный тип атак.

Главная идея, заложенная в SQL-инъекции, заключается в том, что злоумышленник при помощи полей ввода данных, расположенных на веб-ресурсе, внедряет свои вредные SQL-команды. Если в коде веб-приложения не предусмотрена фильтрация вводимых данных, то на веб-сервере становится возможным запустить SQL-команды и выполнять прямые запросы к внутренней базе данных (БД) в обход сетевых средств защиты.

При использовании атак SQL-инъекциями злоумышленник имеет возможность, к примеру:

- заполучить различные таблицы с данными (например, таблицы, содержащие идентификационные данные зарегистрированных пользователей);
- изменять записи в данных таблицах;
- полностью удалить базу данных, таким образом полностью вывести из строя веб-ресурс.

Вредоносные SQL-операторы могут быть введены в уязвимое приложение с использованием множества различных механизмов и сценариев ввода. В работе [2] были классифицированы различные сценарии. Рассмотрим наиболее распространенные из них.

1) Инъекция через пользовательский ввод: в этом случае злоумышленники вводят команды SQL, предоставляя соответствующим образом, созданный пользовательский ввод. Веб-приложение может читать пользовательский ввод несколькими способами на основе среды, в которой развертывается приложение.

В большинстве атак SQL-инъекциями, ориентированными на веб-приложения, пользовательские входные данные обычно поступают из форм, отправляемых в него через

HTTP GET или POST-запросы. Веб-приложения обычно имеют доступ к пользовательскому вводу, содержащемуся в этих запросах, поскольку они будут обращаться к любой другой переменной в среде.

2) Инъекция через файлы Cookie: Cookie – это файлы, содержащие информацию о каком-либо состоянии, создаваемые веб-приложениями и хранящиеся на клиентской машине. Когда клиент возвращается обратно на веб-ресурс, файлы Cookie могут использоваться для восстановления информации о состоянии клиента (например, авторизован он или нет).

Поскольку клиент имеет контроль над хранением файлов Cookie, злоумышленник может подменить их содержимое. Если веб-приложение использует содержимое файла Cookie для создания некоторых SQL-запросов, злоумышленник может легко отправить атаку, встроив ее в файл Cookie.

3) Инъекция через переменные сервера: переменные сервера представляют собой набор переменных, которые содержат HTTP заголовки, заголовки сетевого уровня и переменные среды. Веб-приложения используют эти переменные сервера различными способами, такими как статистика использования журналов и определение тенденций просмотра. Если эти переменные регистрируются в базе данных без какой-либо «очистки», это может привести к уязвимости SQL-инъекциями.

Поскольку злоумышленники могут подделывать значения, помещенные в заголовки HTTP, таким образом они могут использовать эту уязвимость, подставив вредоносный SQL-запрос непосредственно в заголовки.

4) Инъекция второго порядка: во вторичных инъекциях злоумышленники вводят вредоносные данные в систему или базу данных, чтобы косвенно вызвать SQL-инъекцию при более позднем использовании этих данных. Цель такого рода атаки существенно отличается от обычной (т.е. первого порядка) инъекционной атаки.

Инъекции второго порядка не пытаются вызвать атаку, когда вредоносный ввод первоначально достигает базы данных. Вместо этого злоумышленники полагаются на знания о том, где будут впоследствии использоваться входные данные, и создают атаки таким образом, чтобы они происходили во время такого использования.

В работе [3] исследователи также рассмотрели сценарии и дополнили их некоторыми примерами. Для уточнения приведем классический пример инъекционной атаки второго порядка. Например, злоумышленник регистрируется на сайте, используя имя пользователя, такое как «admin' --». Приложение должным образом экранирует одинарную кавычку во входных данных, прежде чем сохранить их в базе данных, предотвращая потенциально вредоносный эффект.

Далее злоумышленник, пытается выполнить обход входа на ресурс через форму восстановления пароля. На данном этапе пользователю требуется выполнить операцию по изменению своего пароля, которая обычно включает следующие действия:

1. Проверку того, что пользователь знает текущий (старый) пароль.
2. Изменение пароля, если проверка выполнена успешно.

Злоумышленник, может предположить, что данная форма веб-приложения может создать команду SQL следующим образом:

```
queryString="UPDATE users SET password='" + newPassword + "' WHERE userName='" + userName + "' AND password='" + oldPassword + "'";
```

где newPassword и oldPassword – это новый и старый пароли, соответственно, а userName – это имя пользователя, вошедшего в систему. Злоумышленник вводит в поле имени заведомо зарегистрированного пользователя «admin' --» и новый пароль.

Поэтому строка запроса, отправленная в базу данных, будет выглядеть следующим образом (предположим, что newPassword и oldPassword это «newpwd» и «oldpwd»):

UPDATE users SET password='newpwd' WHERE userName= 'admin'--' AND password='oldpwd'.

Поскольку «--» – это оператор однострочного комментария в SQL, то все, что расположено после него, будет игнорироваться базой данных. Поэтому результатом этого запроса является то, что база данных изменяет пароль администратора («admin») на значение, указанное злоумышленником, не учитывая при этом старый пароль.

Инъекции второго порядка особенно трудно обнаружить и предотвратить, потому что путь выполнения инъекции отличается от пути, где атака на самом деле проявляется.

Разработчик может предусмотреть защиту от известных путей SQL-инъекций, экранирова, проверяя тип и фильтруя входные данные, которые приходят от пользователя и предполагать, что веб-ресурс защищён. Но позднее, когда эти данные будут использоваться в другом контексте или для построения запроса другого типа, такие ранее обработанные (дезинфицированные) входные данные могут также привести к атаке инъекцией. Поэтому подробные знания о том, как дальше будут использоваться введённые данные, позволяют разработчику предусмотреть и защиту от инъекций второго порядка.

1.1. Анализ процедуры проведения SQL-инъекций

Методы атаки SQL-инъекциями могут быть различными. В работе [4] авторы исследовали процедуры их проведения. Процедура SQL-инъекции обычно делится на следующие пять шагов, как показано на рис. 1.



Рис. 1. Процедура SQL-инъекции.

1) Поиск точек инъекции.

Точка инъекции – это веб-страницы, имеющие уязвимости к инъекциям. На статических URL страницах, заканчивающихся на «.html» или «.shtml», инъекции производиться не могут, так как эти страницы являются обычными статическими, не имеющими доступа к базе данных. Инъекции могут быть проведены на ресурсах, у которых есть некое хранилище информации, то есть база данных, где хранится вся информация с ресурса.

Инъекция может производиться только на динамических страницах с помощью знака вопроса «?». Это связано с тем, что информация о странице генерируется путем получения данных из базы в соответствии с различными параметрами запроса. Следовательно, доступ к базе данных должен поддерживаться самой базой данных.

Поскольку HTTP-запрос может выполняться двумя способами: либо через метод GET, либо через POST, то и SQL-инъекция также имеет два способа выполнения: инъекция, проводимая через метод GET, и инъекция через метод POST, соответственно.

Можно определить, выполняется ли какая-либо SQL-инъекция в соответствии с информацией, возвращаемой браузером, путем ввода, например, в адресную строку браузера некоторых специальных команд, таких как «and 1=1» и «and 1=2». Таким образом, можно попробовать обнаружить точку инъекции.

2) Получение информации об используемой системы управления базой данных (СУБД)

Получение информации, такой как тип используемой СУБД, является важной частью при проведении SQL-инъекции. Узнать тип применяемой СУБД можно, рассматривая сообщения об ошибках, генерируемые из-за заведомо неправильно сформированного и отправленного SQL-запроса со специальными структурами.

В статье [5] был предложен следующий пример для определения используемой СУБД. Предположим, что у нас есть некий URL-адрес <http://www.site.com/show.php?id=6>. Если в конце данного адреса добавить одинарную кавычку, то есть <http://www.site.com/show.php?id=6'>, это будет считаться заведомо неверным значением, отправляемым на сервер и тип СУБД можно оценить в соответствии с возвращенной ошибкой. Если имеется уязвимость и не настроен обработчик ошибок, то появится ошибка примерно следующего содержания: «*mysql_fetch_assoc(): supplied argument is not a valid MySQL result resource*». Если же ошибки обрабатываются, то о присутствии уязвимости может свидетельствовать пустой результат. Первые два этапа являются подготовительными перед проведением последующей SQL-инъекции.

3) Построение предположений о таких сведениях, как имена таблиц, имена полей, имена пользователей и пароли базы данных.

Существуют правила для имен таблиц и имен полей, хранящихся в базе данных. Например, информация о других базах данных, доступных на сервере MySQL, хранится в базе данных «Information_Schema», которая является системной БД и поставляется вместе с различными СУБД, например, MySQL. Данная уязвимость описана в статье [6] и подразумевает следующие аспекты.

В современных версиях MySQL вся метаинформация относительно других баз данных и данных таблиц хранятся в таблице «SCHEMATA» и таблице «TABLES», соответственно. Более того, вся информация о столбцах хранится в таблице «COLUMNS».

Далее производится обращение к таблице «SCHEMATA», из которой можно узнать название БД Web-ресурса. Например, запрос может выглядеть следующим образом:

```
http://www.site.com/show.php?id=-1 SELECT 1,SCHEMA_NAME,3,4 FROM INFORMATION_SCHEMA.SCHEMATA.
```

В ответ может быть возвращено следующее: information_schema, mysql, SiteDB. Из полученных названий БД можно сделать вывод, что БД, с которой необходимо производить некие действия, это «SiteDB». Далее таким же образом можно определить и названия таблиц, находящихся в выбранной БД.

Злоумышленники могут последовательно запрашивать длину и содержимое имени таблицы, имени колонок, имени пользователя и пароля в базе данных, создавая специальные запросы доступа к базе данных.

В частности, соответствующие тестовые SQL-запросы добавляются в конец обычного URL. Затем после отправки запроса рассуждения производятся в соответствии с ответом, возвращаемым веб-сервером.

Если после отправки было получено обычное содержимое веб-страницы, это значит, что имена таблиц или имена колонок, предположительно подобранные злоумышленниками, являются правильными, в противном случае они ошибочны. Затем злоумышленники должны продолжать и дальше строить догадки и подставлять тестовые запросы до тех пор, пока содержимое веб-страницы не будет успешно выявлено. Данный процесс построения догадок может быть реализован с помощью большого количества существующих инструментов инъекции в Интернете, и таким образом пароли пользователей рано или поздно будут взломаны.

4) Поиск входа в систему управления веб-ресурса.

В общем случае, зарегистрированные пользователи веб-системы могут получить доступ к веб-серверу, авторизуясь на ресурсе. Как правило, зарегистрированные пользователи веб-ресурса могут получить доступ к каким-либо действиям с веб-сервером только путем входа в систему. Интерфейс системы управления недоступен для обычных пользователей. Чтобы найти адрес для входа в данную систему, можно использовать различные средства сканирования для быстрого поиска, где все возможные адреса входа в систему будут рассматриваться последовательно.

После того, как станет известен адрес входа для системы управления, информация, полученная на предыдущих этапах (например, данные администратора), используется для входа в систему. Это означает, что теперь злоумышленник получает все полномочия администратора веб-ресурса и может производить действия от его лица.

5) Вторжение и уничтожение.

После входа в систему управления злоумышленники могут разрушить работу веб-ресурса, например, уничтожив различные информационные публикации, произведя искажение веб-страниц, загрузив на сервер какой-либо вирус, произведя кражу и утечку профилей пользователей. В итоге все данные будут фальсифицированы, что приведёт к различным неприятным последствиям.

1.2. Обнаружение атаки SQL-инъекцией.

Можно вручную проверять все формы на ресурсе на предмет уязвимости SQL-инъекциям, например, теми же подстановками конструкций вида «and 1=1» или подобных. Но недостатком ручного способа может быть недосмотр или невнимательность разработчика. Когда веб-приложение имеет множество различных кодов, очень сложно и неэффективно вручную находить уязвимости SQL-инъекций. Для этого существуют различные автоматизированные инструменты, которые являются более систематическими и тщательными. Они не понимают логику самого веб-приложения, но могут очень быстро протестировать множество потенциальных точек инъекции, которые человек не может отследить полностью и последовательно.

Для таких задач были разработаны некоторые коммерческие инструменты и инструменты с открытым исходным кодом, такие как Paros Proxy, IBM Rational AppScan, SQLiX,

HP Web Inspect и так далее. Хотя данные средства автоматического обнаружения могут не идентифицировать все существующие уязвимости, они обеспечивают достаточно высокую оценку безопасности веб-сайта, включая тестирование на уязвимости SQL-инъекциями.

Так или иначе, если злоумышленник нашёл способ провести инъекцию, то следует определить и выявить точку ее проведения, проанализировать, как ему это удалось и закрыть этот недостаток в будущем.

Существует два способа атаки SQL-инъекций. Одним из них является ручной способ встраивания некоторых ненормальных входных данных, другой – применение различных инструментов проведения инъекции.

Независимо от того, какой способ атаки используется, следы так или иначе будут оставлены в системе после успешно проведенной атаки SQL-инъекцией. В статье [7] авторы определили, как можно отследить была ли проведена атака или нет. Существует четыре эффективных способа оценить, была ли атакована веб-система с помощью SQL-инъекции.

1) Проверить, есть ли какие-либо «ненормальные» таблицы в базе данных. Могут быть созданы некоторые временные таблицы в базе данных после атак SQL-инъекций выполняемых с использованием таких программ, как HDSI и NBSI.

2) Проверить журналы базы данных. Если запустить службу управления журналом с помощью СУБД, все обращения в базу данных будут записываться в него. В частности, SQL-инъекция может быть обнаружена в журналах, если ложно выполненные SQL-запросы в них записаны.

3) Проверка журналов веб-сервера. На веб-сервере может сохраняться подробная информация, такая как IP-адреса, время обращения, к каким файлам зафиксировано обращение и способы доступа посетителя, записанные в журнал. При атаке путем внедрения SQL-кода обычно обращаются к файлам страниц, на которых существует точки инъекции. Размер файла журнала большой, поэтому можно судить о том, существует ли атака SQL-инъекцией путем проверки размера и содержимого файлов журнала.

4) Можно также определить, существуют ли какие-либо вторжения с помощью проверки таких сведений, как номер учетной записи системного администратора, состояние открытия порта, файлы, созданные в последнее время в системе, вирусы и журналы брандмауэра.

1.3. Рекомендации по устранению атак SQL-инъекцией.

Атаки SQL-инъекций, к сожалению, очень распространены, и это связано с двумя факторами:

- значительная распространенность уязвимостей SQL-инъекций;
- привлекательность цели (т.е. база данных обычно содержит все интересные и важные данные веб-приложения).

Весьма прискорбно, что существует так много успешных атак SQL-инъекций, в то время как достаточно просто избежать данных уязвимостей на этапе разработки, в том числе используя автоматизированный контроль программного кода.

SQL-инъекции могут возникать, когда разработчики программного обеспечения создают динамические запросы к базе данных, включая в них вводимые пользователем данные.

Избежать ошибок SQL-инъекций достаточно просто. При этом разработчики должны:

- а) либо прекратить писать динамические запросы;

б) либо запретить ввод данных, предоставленных пользователем, который содержит вредоносный SQL-код и влияет на логику выполненного запроса.

Далее представлен набор простых методов предотвращения уязвимостей SQL-инъекций, позволяющий избежать этих двух проблем. Данные методы могут использоваться практически на любом языке программирования и с любой базой данных.

Существуют и другие типы баз данных, такие как базы данных XML, которые могут иметь схожие проблемы (например, XPath и XQuery инъекции). Нижеприведенные методы также могут быть использованы и для их защиты.

Методы для первичной защиты:

1. Применение подготовленных выражений/связываемых переменных (англ. Prepared Statements).
2. Использование хранимых процедур.
3. Проверка входных данных по «белому списку» (англ. White List).
4. Экранирование всех входных данных пользователя.

Можно также рассмотреть несколько методов, применяемых в качестве дополнительной защиты совместно с каким-либо методом из списка выше:

1. Обеспечение минимальной привилегии.
2. Выполнение проверки «белого списка» в качестве вторичной защиты.

Применение подготовленных выражений. Использование подготовленных выражений со связываемыми переменными (так называемые параметризованные запросы) проще в написании и понимании, чем динамические запросы. Параметризованные запросы заставляют разработчика сначала определить весь SQL-код, а затем передать каждый параметр в запрос. Этот стиль кодирования позволяет базе данных различать код и данные независимо от того, какие пользовательские данные были предоставлены [8].

Использование подготовленных выражений гарантирует, что злоумышленник не сможет изменить задачи и намерения запроса, даже если он вставит зловредные SQL-команды. Приведём пример. Если злоумышленник введёт идентификатор пользователя «tom 'or' 1 '=' 1», параметризованный запрос не выполнит зловредный код, а вместо этого будет искать имя пользователя, которое буквально соответствует всей введённой строке.

Практически в каждом современном языке программирования есть свои расширения, позволяющие использовать подготовленные выражения, например:

- Java EE – применяет PreparedStatement() со связываемыми переменными.
- NET – использует параметризованные запросы, такие как SqlCommand() или OleDbCommand() со связанными переменными.
- PHP применяется PDO со строго типизированными параметризованными запросами (с использованием bindParam()).

В редких случаях подготовленные выражения могут нанести ущерб производительности. При столкновении с такой ситуацией лучше всего:

- а) тщательно проверять все данные;
- б) вместо использования подготовленных выражений применять обезвреживание введенных данных всех пользователей, используя специальные процедуры экранирования, специфичные для той базы данных с которой работаете (данный метод будет описан ниже).

Хранимые процедуры. Хранимые процедуры (англ. Stored Procedures) не всегда являются достаточными для того, чтобы избавиться от SQL-инъекций. Тем не менее, неко-

торые стандартные конструкции программирования хранимых процедур имеют тот же эффект, что и применение параметризованных запросов, когда они «безопасно реализованы», что является нормой для большинства языков хранимых процедур.

Они требуют от разработчика просто создавать SQL-запросы с параметрами, которые автоматически параметризуются, если только разработчик не делает что-то в значительной степени вне нормы. Разница между подготовленными выражениями и хранимыми процедурами заключается в том, что SQL-код для хранимой процедуры определяется и сохраняется в самой базе данных, а затем вызывается из веб-приложения.

Термин «безопасно реализованы» означает, что хранимая процедура не включает какую-либо небезопасную динамическую генерацию SQL. Разработчики обычно не генерируют динамический SQL внутри хранимых процедур, что можно сделать, но этого следует избегать. Если избежать нельзя, хранимая процедура должна использовать проверку ввода или правильное экранирование, чтобы убедиться, что все введенные в нее пользователем входные данные не могут использоваться для ввода SQL-кода в динамически сгенерированный запрос.

При аудите кода необходимо отслеживать использование `sp_execute`, `execute` или `exec` в хранимых процедурах SQL-сервера. Такие же рекомендации по аудиту необходимы для аналогичных функций в других СУБД.

Существует также несколько случаев, когда хранимые процедуры могут повысить риск. Например, на сервере MS SQL имеется 3 основных роли по умолчанию: `db_datareader`, `db_datawriter` и `db_owner`. Перед использованием хранимых процедур администраторы базы данных предоставляют пользователям `db_datareader` или `db_datawriter` права в зависимости от требований. Однако хранимым процедурам требуются права на выполнение, роль которых по умолчанию недоступна. Данные риски хранимых процедур описаны в статье [9].

Некоторые системы, в которых управление пользователями централизовано, но ограничено этими тремя ролями, приводят к тому, что все веб-приложения работают с правами `db_owner`, чтобы хранимые процедуры могли выполняться.

Естественно, это означает, что если сервер будет взломан, то злоумышленник будет иметь полные права на базу данных, а ранее он мог иметь доступ только на чтение.

Данный и предыдущий методы имеют одинаковую эффективность в предотвращении SQL-инъекций, поэтому разработчики должны сами выбирать, какой из этих подходов является наиболее предпочтительным.

Проверка входных данных. Различные части SQL-запросов не являются законными расположениями для использования связанных переменных, таких как имена таблиц или столбцов, а также указателей порядка сортировки (ASC или DESC). В таких ситуациях наиболее подходящей защитой является проверка входных данных или перепроектирование запроса. Имена таблиц или столбцов правильнее закладывать и брать из кода, а не из пользовательских параметров [10].

Но если пользовательские параметры используются для изменения имен таблиц и столбцов, то значения параметров должны быть сопоставлены с законными/ожидаемыми именами таблиц или столбцов (т.е. сравниваемы с заранее заданным «белым списком» имен), чтобы убедиться, что непроверенные данные пользователя не попадают в запрос. Стоит обратить внимание на то, что это признак плохой конструкции, и скорее всего необходимо учитывать полную переработку запроса, если позволяет время.

Проверка ввода по «белым спискам» также рекомендуется в качестве вторичной защиты во всех случаях, даже при использовании связываемых переменных.

Экранирование данных. Этот метод следует использовать только в качестве крайней меры, когда ни один из вышеперечисленных вариантов невозможно применить.

Предыдущий метод проверки входных данных, вероятно, является лучшим выбором, поскольку метод «Экранирование данных» является самым слабым способом защиты по сравнению с другими средствами защиты, и нельзя гарантировать, что он позволит предотвратить все пути SQL-инъекции.

Суть метода заключается в том, что необходимо произвести замену всех управляющих символов (экранирование) входных данных пользователя перед помещением их в тело запроса [11]. Обычно таким способом рекомендуется модифицировать устаревший код, когда внедрение той же проверки входных данных не является целесообразной и экономически эффективной.

Приложения, разрабатываемые с нуля или приложения с низкой степенью риска должны быть построены или переписаны с использованием параметризованных запросов, хранимых процедур или какого-либо объектного-реляционного отображения (ORM).

Метод работает следующим образом. Когда пользователь вводит какие-либо входные данные в какую-либо форму на веб-ресурсе, некоторые символы впоследствии могут восприниматься, как управляющие и быть использованы как продолжение SQL-команды. Для таких символов необходимо использовать специальные схемы экранирования.

Каждая СУБД поддерживает одну или несколько схем экранирования символов, специфичных для определенных типов запросов. Если вы защитите все входные данные, вводимые пользователем, используя правильную схему экранирования для применяемой БД, то в СУБД не будет возникать путаница входных данных с SQL-кодом, написанным разработчиком, что позволит избежать возможных атак SQL-инъекции.

1.4. Выводы

Атаки SQL-инъекции представляют собой одну из самых больших угроз для базы данных и клиентов. Поскольку они обычно используются для непосредственного воздействия на информацию, которую видит клиент, ее можно легко использовать для попытки проникновения вредоносного кода на компьютеры клиентов.

Данный тип атак очень популярен у злоумышленников, потому что он является относительно простым в реализации способом и не требует особых условий для проведения. Он также популярен, потому что их легко провести на ресурсе, который просто поддается компрометации, поскольку разработчикам обычно требуется много времени, чтобы обнаружить и исправить все потенциальные точки атаки.

Это оставляет сам веб-ресурс и его базу данных беззащитными и открытыми для атаки в течение длительного периода времени, поскольку компании обычно не желают закрывать его, пока производится настройка и исправление ошибок.

Анализ атак SQL-инъекции показывает, что администратор базы данных, разработчик приложения и системный администратор должны работать вместе, чтобы обеспечить правильную защиту данных. По мере того как разработчики баз данных и приложений начнут вводить в привычку создавать более безопасный код, который не подвержен атакам SQL-инъекций, их программный продукт станет более безопасным, равно как и их будущие проекты.

При правильном планировании (например, надлежащем построении защиты объектов) и надлежащем мониторинге (например, при использовании xEvents для фиксации подозрительных запросов) можно предотвратить множество потенциальных проблем, связанных с SQL-инъекциями. Когда же данные проблемы обнаруживаются, можно отслеживать запросы и видеть, что случилось.

2. Межсайтовый скриптинг

Межсайтовый скриптинг (англ. CrossSite Scripting – XSS) – это ещё один из типов атак, также связанный с проверкой входных данных. Механизм данных атак очень схож с атаками SQL-инъекции, но в отличие от второго все зловердные действия проводятся с клиентом веб-ресурса, то есть код выполняется в браузере посетителя.

Таким образом, в XSS-атаках жертвой является сам пользователь, а не веб-приложение. При XSS-атаках вредоносный контент доставляется пользователям с использованием языка программирования, выполняемого на стороне клиента, такого как JavaScript. К тому же XSS-атаки, в отличие от SQL-инъекций, наносят вред исключительно клиентской стороне, оставляя сервер приложения полностью в рабочем состоянии.

При применении XSS-атак злоумышленник может преследовать, например, следующие цели:

- завладеть сессионной Cookie пользователя и нанести вред от его лица;
- украсть входные данные пользователя, вводимые через формы на веб-ресурсе (например, данные кредитной карты и т.п.);
- изменить входные данные, подменив их подставными (например, реквизиты счета и т.п.);
- использовать недостаток для внедрения зловердной рекламы и т.д.

2.1. Основные понятия и принципы

Чтобы понять принцип XSS-атак, для начала необходимо понять основную концепцию Same Origin Policy (SOP). Правило ограничения домена (SOP) является базовым механизмом защиты, предлагаемым веб-браузерами против данных атак. Это политика контроля доступа, обеспечивающая строгое разделение между содержимым, предоставляемым различными веб-источниками. Концепция SOP описана в статье [12].

Данная политика разрешает сценариям, находящимся на страницах одного сайта, доступ к методам и свойствам друг друга без ограничений, но предотвращает доступ к большинству методов и свойств для страниц на разных сайтах. Одинаковые источники – это источники, у которых совпадают три признака: домен, порт, протокол.

В результате действия SOP, например, скрипты, запущенные на странице, загруженной с «http://attacker.com», не позволяют получить доступ к файлам, установленным на сайте «http://trusted.com». Это является предварительным условием для того, чтобы злоумышленники не могли захватывать различные файлы, например, сессионные Cookie, с надежного веб-ресурса, раскрывать их и использовать в своих целях.

Под сессионными Cookie понимаются временные данные, частично хранящиеся на стороне клиента (может храниться только ID сессии) и доступные на период, пока пользователь находится на ресурсе. Такие данные могут содержать логин и зашифрованный пароль пользователя. Когда злоумышленник заполучает данную Cookie он может обмануть сервер и выдать себя за жертву.

К сожалению, применения политики SOP недостаточно для предотвращения множества распространенных атак, таких как XSS.

Межсайтовый скриптинг является способом обхода концепции SOP. Всякий раз, когда HTML-код динамически генерируется, а входные данные пользователя не подвергаются какой-либо проверке или фильтрации и отражаются на странице, злоумышленник может использовать данный недостаток для того, чтобы встроить свой собственный HTML-код.

В таком случае злоумышленник может легко вставить JavaScript-код, который будет запускаться в контексте сайта. Таким образом, он сможет получить доступ к другим страницам в одном домене и будет иметь право читать данные, такие как CSRF-токены или установленные файлы Cookie.

Если файлы Cookie, которые обычно содержат информацию идентификатора сессии, могут быть прочитаны с помощью JavaScript, злоумышленник имеет возможность применить их в своем браузере и войти в веб-приложение под идентификационными данными жертвы. Если данный вектор не работает, злоумышленник может считывать личную информацию со страниц, например, читать CSRF-токены и делать запросы от имени пользователя. Такой тип атаки называется CSRF (англ. Cross Site Request Forgery – Межсайтовая подделка запроса). Данная уязвимость также может эксплуатироваться совместно с XSS-атаками. В работе [13] авторы дали определения XSS, CSRF и описали их сходства и различия.

Сходство между CSRF и XSS – использование в качестве вектора атаки клиентов веб-приложений. Хотя на первый взгляд CSRF-атаки очень похожи на атаки на основе межсайтового скриптинга (XSS), они отличаются своими целями.

В то время, как целью XSS-атаки является вставка активного кода в HTML-документ либо для эксплуатации уязвимостей среды исполнения сценариев на стороне клиента, либо для отправки важной информации (такой, как данные сессионных Cookie) на неизвестный сайт злоумышленника. Целью CSRF-атаки является выполнение нежелательных для пользователя действий с помощью веб-сайта, на котором он имеет учетную запись и с которым он работал ранее.

Более того, там, где с помощью XSS-атаки злоумышленники ищут возможность для хищения данных из Cookie для манипуляции пользовательской учетной записью, с помощью CSRF-атаки ищут возможность использования пользовательских Cookie для выполнения действий без информирования и получения согласия пользователя.

Приведем пример классического сценария проведения CSRF-атаки. Например, пользователь авторизован на каком-либо сервисе электронной почты, и при этом в браузере запомнена сессионная Cookie. Если пользователь каким-либо образом (методами социальной инженерии и т.п.) попадет на подготовленную злоумышленником страницу, на которой размещен вредоносный скрипт, браузер жертвы совершает некий запрос к серверу электронной почты. Сайт электронной почты проверяет есть ли Cookie, видит, что посетитель авторизован и обрабатывает вредоносный запрос, тем самым выполняя нужные злоумышленнику действия.

Таким образом, можно сказать, что в случае XSS-атак используется доверие, оказываемое пользователем веб-ресурсу, а в случае CSRF-атак – доверие веб-сайта своему пользователю.

2.2. Участники XSS-атаки

Перед тем, как приступить к описанию работы XSS-атак, необходимо определить все стороны, участвующие в них. В статье [14] авторы дали определение всем основным участникам данной атаки. При ее проведении задействованы три участника: веб-ресурс, жертва и атакующий.

Веб-ресурс выводит HTML-страницы для пользователей, которые запрашивают их. В представленных примерах он находится по адресу <http://website/>.

База данных веб-ресурса – это часть приложения, которая хранит вводимые пользовательские данные на страницах сайта.

Жертва – это обычный посетитель ресурса, запрашивающий его страницы, используя свой браузер.

Атакующий – это злоумышленник, намеревающийся провести атаку на жертву используя XSS-уязвимости на ресурсе.

Сервер злоумышленника – это ресурс, находящийся под контролем злоумышленника, применяемый для кражи конфиденциальной информации жертвы. В приведенных примерах он находится по адресу <http://attacker/>.

2.3. Типы межсайтовых скриптов

Сначала были обнаружены и идентифицированы два основных вектора XSS-атак: хранимый и отраженный XSS, но в 2005 году Амит Клейн определил и ввел третий вектор данной атаки, который был назван DOM-ориентированный XSS. В работе [15] авторами был описан каждый из трех векторов данной атаки.

Эти три типа XSS-атак определяются следующим образом:

1) Хранимые (постоянные) XSS (англ. Stored (Persistent) XSS).

Данный тип атаки является самым разрушительным. Хранимые XSS обычно совершаются, когда пользовательские входные данные хранятся на целевом сервере, в виде сообщений на форуме, в журнале посетителей, в поле комментариев и т.д.

Классическим примером является вредоносный скрипт, вставленный злоумышленником в поле комментариев в блоге или в сообщения на форуме. Когда жертва переходит на уязвимую веб-страницу в браузере, полезная нагрузка XSS будет использоваться как часть самой веб-страницы (точно также, как и сами законные комментарии) [16]. Это означает, что жертвы, в конечном итоге, случайно выполнят вредоносный сценарий, как только страница будет просмотрена в браузере.

Пример проведения данного типа XSS-атаки, изображён на рис. 2. В данном и последующих примерах мы будем считать, что конечной целью злоумышленника является кража Cookie жертвы с использованием XSS-уязвимости веб-ресурса. Данная операция будет совершена, если браузер жертвы обработает и выполнит следующий код:

```
<script>
window.location='http://attacker/?cookie='+document.cookie
</script>
```

Этот сценарий выполнит HTTP-запрос на другой URL-адрес, который перенаправит браузер пользователя на сервер атакующего. При этом данный URL-адрес включает в себя Cookie жертвы в качестве параметра запроса. Когда HTTP-запрос поступит на сервер злоумышленника, он сможет извлечь полученные Cookie из самого запроса и дальше использовать их своих целях.

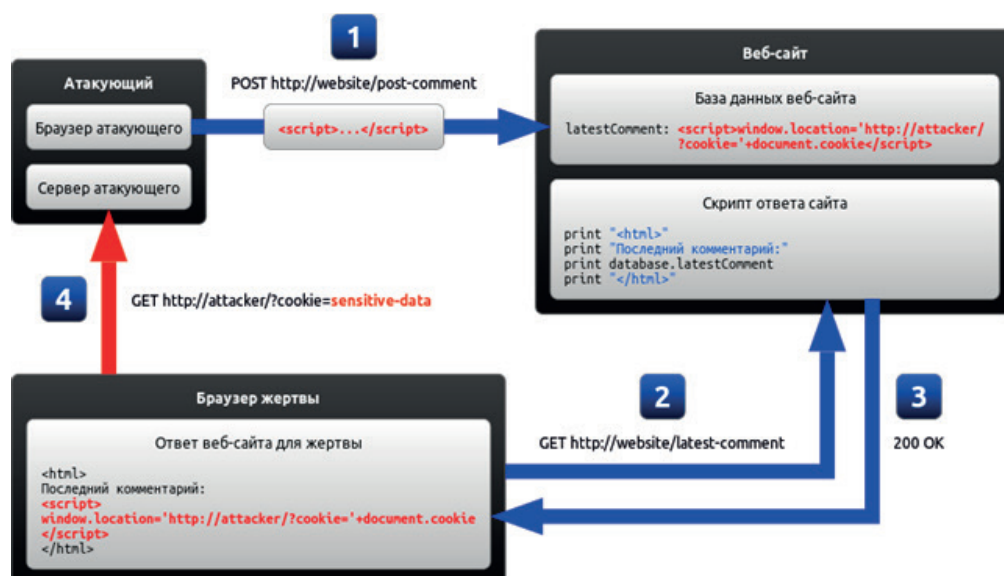


Рис. 2. Пример постоянного XSS.

На рис. 2, представлена следующая последовательность действий: шаги:

1. Злоумышленник использует какую-либо из форм на ресурсе (например, форму комментариев) для того, чтобы отправить вредоносный код в базу данных веб-ресурса.
2. Жертва запрашивает страницу с веб-сайта.
3. Веб-ресурс в ответ включает вредоносный код из базы данных и отправляет его обратно жертве.
4. Браузер жертвы считывает JavaScript код и выполняет вредоносный сценарий внутри ответа, отправляя Cookie на сервер злоумышленника.

Таким образом любой из пользователей, посетивший данную страницу с внедрённым зловредным сценарием, будет подвержен хранимой XSS-атаке.

С появлением HTML5 и других технологий браузера можно предположить, что полезная нагрузка атаки будет постоянно храниться в браузере жертвы, такой как база данных HTML5 (Web SQL Database), и никогда не будет отправлена на сервер приложения. Таким образом, хранимые XSS не обязательно выполняются через сервер БД, а могут быть выполнены и через локальную базу данных, хранимую на клиенте.

2.4. Отражённые (непостоянные) XSS (англ. Reflected (Non-Persistent) XSS).

Вторым распространённым типом XSS-атаки является отраженные XSS. Данный тип атаки происходит, когда входные данные пользователя немедленно возвращаются веб-приложением в сообщении об ошибке, результатах поиска или любом другом ответе, который включает в себя часть или все данные, предоставленные пользователем в рамках запроса.

Здесь сценарий полезной нагрузки злоумышленника должен быть частью запроса, который отправляется на веб-сервер и отражается обратно таким образом, что HTTP-ответ включает полезную нагрузку из HTTP-запроса [17].

Используя фишинговые электронные письма и другие методы социальной инженерии, злоумышленник заманивает жертву непреднамеренно сделать запрос на сервер, который содержит полезную нагрузку XSS, и завершает выполнение сценария, который отражается и выполняется внутри браузера. Пример данной атаки представлен на рис. 3.

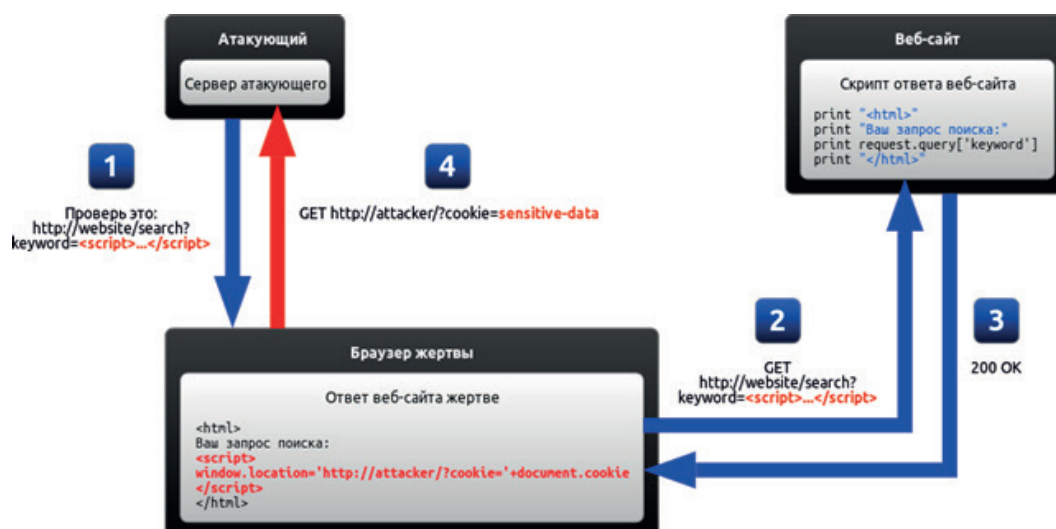


Рис. 3. Пример отраженного XSS.

1. Злоумышленник создает и отправляет жертве URL-адрес, содержащий вредоносную строку.

2. Жертва обманным путем злоумышленника, переходя по ссылке, отправляет URL-запрос на веб-ресурс.

3. Веб-сайт в ответ включает вредоносный код из полученного запроса.

4. Браузер жертвы выполняет вредоносный сценарий, содержащийся в ответе, тем самым отправляя Cookie жертвы на сервер злоумышленника.

Поскольку «Отраженный XSS» не является постоянной атакой, злоумышленник должен доставлять полезную нагрузку каждой жертве, поэтому, например, социальные сети часто используются для распространения данных атак.

Существует множество способов, которыми злоумышленник может побудить жертву инициировать отраженный XSS-запрос. Например, злоумышленник может отправить жертве вводящее в заблуждение электронное письмо со ссылкой, содержащей вредоносный JavaScript. Чтобы жертва не смогла распознать строку адреса с зловредным скриптом, злоумышленники могут прибегать к применению служб, позволяющих «укоротить» ссылку, тем самым маскируя всю вредоносную строку.

Если жертва нажимает на такую ссылку, HTTP-запрос инициируется из браузера жертвы и отправляется в уязвимое веб-приложение. Затем вредоносный JavaScript возвращается к браузеру жертвы, где он выполняется в контексте сессии пользователя.

2) XSS в DOM (англ. DOM Based XSS).

Как определил Амит Клейн, который опубликовал первую статью об этой проблеме, «DOM Based XSS» представляет собой форму XSS, при которой в браузере происходит весь нарушенный поток данных от источника к приёмнику, то есть источник данных находится в DOM, приемник также находится в DOM, и поток данных никогда не покидает браузер.

Данный тип атаки не зависит от вредоносного содержимого, отправляемого на сервер. В хранимом и отраженном XSS-скрипт включен в ответ сервера. Браузер жертвы прини-

мает его, полагая, что он является законной частью веб-страницы и выполняет его при загрузке страницы. В «DOM Based XSS» выполняется только законный сценарий, предоставляемый сервером. В статье [18] был описан третий тип XSS, известный как «DOM Based XSS».

XSS в DOM является расширенным типом атаки XSS, которая становится возможной, когда сценарии клиентской стороны веб-приложения записывают предоставленные пользователем данные в объектную модель документа (англ. Document Object Model – DOM).

Затем данные считываются из DOM с помощью веб-приложения и выводятся в браузер. Если данные некорректно обрабатываются, злоумышленник может ввести полезную нагрузку, которая будет храниться как часть DOM и будет выполняться при чтении данных из DOM. Пример данного типа XSS, представлен на рис. 4.

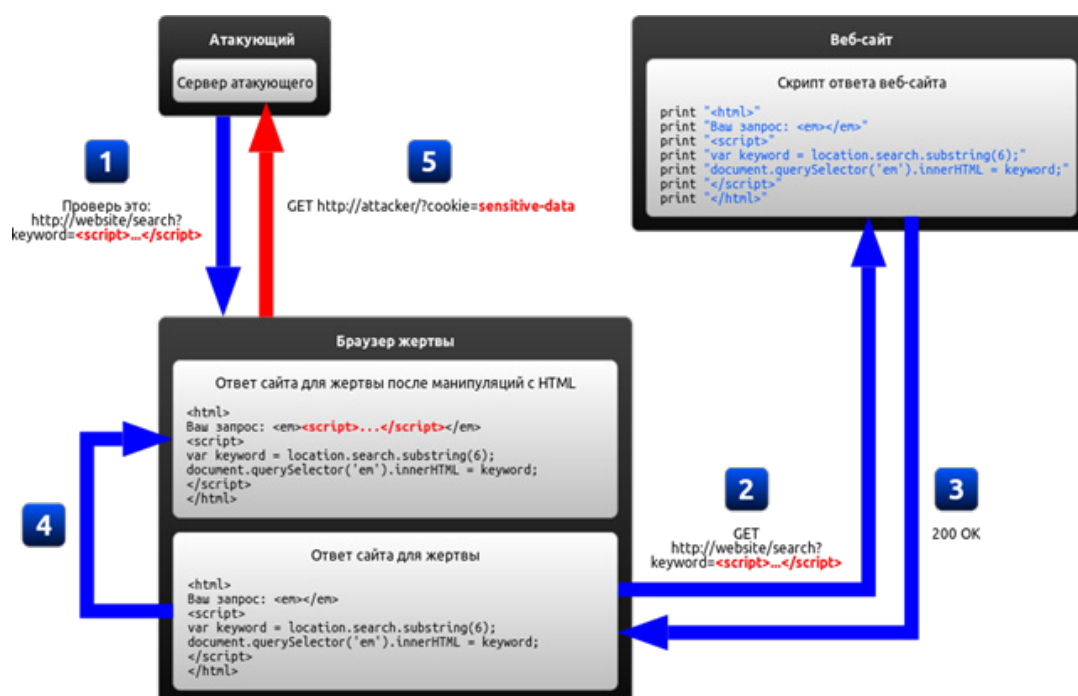


Рис. 4. XSS в Document Object Model.

1. Злоумышленник создаёт URL-адрес, содержащий вредоносную строку, и отправляет его жертве.
2. Жертва обманным путем злоумышленника, переходя по ссылке, отправляет запрос на веб-ресурс.
3. Веб-ресурс принимает запрос, но не включает в ответ вредоносный код.
4. Браузер жертвы выполняет законный сценарий, содержащийся в ответе, в результате чего вредоносный скрипт будет внедрён в страницу.
5. Браузер жертвы выполняет вредоносный сценарий, вставленный в страницу, и отправляет данные Cookie жертвы на сервер злоумышленника.

Самой опасной вариацией данного типа атаки является атака на стороне клиента, при этом полезная нагрузка злоумышленника никогда не отправляется на сервер [19]. Это происходит тогда, когда вредоносный код содержится в фрагменте идентификатора

URL-адреса (что-либо после символа #). Браузеры не отправляют эту часть адреса на сервер, так что веб-ресурс не имеет доступа к нему на стороне сервера. Однако, код со стороны клиента имеет доступ к нему, и таким образом возможно проведение XSS-атаки.

Это затрудняет обнаружение такой атаки различными брандмауэрами веб-приложений (WAF) и разработчиками средств безопасности, анализирующими журналы сервера, так как они не смогут увидеть проведенную атаку.

Данный случай не ограничивается идентификатором фрагмента. Существуют и другие пользовательские данные, которые будут невидимыми для сервера, например, новые функции HTML5, такие как LocalStorage и IndexedDB.

Среди различных объектов, составляющих DOM, есть некоторые объекты, которыми злоумышленник может манипулировать, чтобы генерировать условие XSS. К таким объектам относятся URL (`document.URL`), часть URL-адреса за хэшем (`location.hash`) и Referrer (`document.referrer`).

3) Отличие XSS в DOM от других типов XSS-атак.

В первых двух вышеописанных типах XSS-атак (Хранимые и Отраженные) сервер веб-приложения вставляет вредоносный сценарий на страницу, которая затем отправляется в ответе обратно жертве. Когда браузер жертвы получает ответ, он подразумевает, что вредоносный сценарий – это одна из частей законного содержания страницы, и далее автоматически выполняет его во время загрузки страницы, как и любой другой сценарий.

Рассматривая третий тип «DOM Based XSS» можно заметить, что вредоносный код не вставляется как часть страницы. Единственный сценарий, который будет автоматически выполняться во время загрузки страницы, является законной частью страницы. Проблема состоит в том, что данный законный сценарий напрямую использует пользовательские входные данные для того, чтобы добавить HTML на страницу. Поскольку вредоносный код встраивается в страницу с помощью `innerHTML`, он и будет рассматриваться как HTML, в результате чего данный зловредный скрипт будет работать [20]. Данное различие хоть и не существенное, но является очень важным.

Итак, главное отличие XSS в DOM состоит в следующем. В хранимых и отражённых XSS-атаках вредоносный JavaScript выполняется при загрузке страницы, как часть HTML, отправленного сервером. В случае с «XSS в DOM-модели» зловредный JavaScript выполняется после загрузки страницы, в результате данная страница с закономерным JavaScript обращается небезопасным способом к пользовательскому вводу, включающему вредоносный код.

2.5. Рекомендации по устранению XSS-атак

Для предотвращения уязвимостей, связанных с межсайтовым скриптингом, очень важно применять контекстно-зависимую кодировку выходных данных. В некоторых случаях этого может быть достаточно для кодирования специальных символов HTML, таких как открытие и закрытие тегов.

В других случаях необходимо правильно применять кодирование URL. Ссылки, как правило, должны быть запрещены, если их адреса не начинаются с протоколов из «белого списка», таких как `<http://>` или `<https://>`, таким образом предотвращая использование URI схем, таких как `<javascript://>`. В работе [21] описаны некоторые из способов устранения XSS.

Несмотря на то, что большинство современных веб-браузеров имеют встроенный фильтр XSS, их не следует рассматривать как альтернативу дезинфекции. Они не могут улавливать все виды межсайтовых скриптовых атак и не являются достаточно точными, чтобы не приводить к ложным срабатываниям, которые помешали бы правильной загрузке некоторых страниц ресурса. Фильтр XSS веб-браузера должен быть использован только как «вторая линия защиты», их главная цель состоит в том, чтобы минимизировать воздействие уже существующих уязвимостей.

Разработчики не должны использовать «черные списки», поскольку для них существует множество обходов. Еще одна вещь, которую им следует избегать – это удаление опасных функций и символов, поскольку фильтры XSS браузеров не могут распознавать опасные полезные нагрузки, когда результат подделывается с учетом возможных обходов. При этом единственной рекомендацией предотвращения XSS является кодирование, как было указано выше.

2.6. Способы защиты от XSS-атак

Рассмотрим подробнее способы защиты от XSS-атак. Далее будет приведена простая модель для предотвращения XSS, использующая экранирование/кодирование выходных данных должным образом. Хотя существует огромное количество векторов атаки XSS, следующие несколько простых правил могут полностью защитить от этой серьезной атаки.

Напомним, что XSS является атакой встраивания кода, то есть входные данные пользователя ошибочно интерпретируются как зловредный код. Для того, чтобы не допустить данной атаки, требуется безопасная обработка входных данных. Для веб-разработчиков существуют два способа выполнения безопасной обработки вводимых данных:

Кодирование – позволяет обрабатывать входные данные пользователя только как текст и не позволяющий браузеру обрабатывать входные параметры как код.

Кодирование подразумевает под собой замену всех управляющих символов на эквивалентные. Самый популярный тип кодирования – это маскирование HTML, который преобразует символы, такие как < и > в эквивалентные < и > соответственно.

Если, например, пользователь введёт <script>...</script>, то результирующий HTML станет выглядеть следующим образом: <script>...</script> [22]. Таким образом, если все управляющие символы будут замаскированы, то браузер не воспримет введенные данные как зловредный код, а выдаст их обезвреженными как обычный текст.

Валидация – позволяет производить фильтрацию пользовательских данных так, что браузер будет интерпретировать их как код без вредоносных команд.

Один из применяемых способов проверки в веб-разработке позволяет использовать некоторые HTML-элементы (например, и), но запрещает другие (например, <script>). Фильтрация может производиться двумя способами: через «чёрный список» либо через «белый список». Хотя это достаточно различные методы предотвращения XSS, они имеют несколько общих черт, которые являются важными для понимания при использовании любого из них.

Концепция «чёрного списка» рассматривает запрещённые шаблоны, которые не должны появляться в пользовательском вводе. Например, разрешить пользователям отправлять ссылки с любыми протоколами, кроме «javascript:».

Но главным недостатком данного подхода является сложность реализации, так как приходится учитывать множество различных факторов. Например, для примера выше

первую букву можно закодировать как «jascript:», тогда поиск по подстроке пропустит данный вариант, и атака окажется выполнимой [23].

Подход же «белого списка» определяет разрешенный шаблон, в противоположность «чёрному списку», и отмечает вводимые данные недействительными, если они не соответствуют данному шаблону. Как пример, можно разрешить пользователям использовать лишь протоколы «http:» и «https:» и ничего более. «Белый список» гораздо проще в реализации, и он не устаревает, так как, если появится новая функция, то её просто необходимо внести, дополнив таким образом список.

Контекст. Безопасная обработка входных данных должна быть выполнена по-разному в зависимости от того, где на странице используется пользовательский ввод.

Есть множество контекстов на странице, где может быть применен пользовательский ввод. Для каждого из них должны быть соблюдены особые правила для того, чтобы пользовательский ввод не мог рассматриваться вне своего контекста и не мог быть интерпретирован как вредоносный код. В таблице приведены наиболее распространенные контексты.

Контексты

Контекст	Пример кода
Контент в виде HTML элемента	Пользовательские данные
Атрибуты значений в HTML	<input value=" Пользовательские данные">
Значения в URL-запросе	http://example.com/?parameter=Пользовательские данные
Значения в JavaScript	var name = "Пользовательские данные"

В рассмотренных контекстах уязвимость, приводящая к XSS, может возникнуть, если вводимые пользователем данные были вставлены до первого кодирования или проверки. Злоумышленник может внедрить вредоносный код, просто дописав закрывающий разделитель для данного контекста и следом за ним вредоносный код [24].

Рассмотрим пример для пользовательских данных, вводимых в атрибуты значений HTML. Исходя из данного контекста, строка зловредного кода должна выглядеть следующим образом:

"><script>...</script><input value=".

Тогда в итоге, будет получен код следующего вида:

<input value=""><script>...</script><input value="">.

Данную уязвимость можно устранить путём удаления кавычек, используемых в пользовательских данных, и тогда XSS не сможет быть выполнена, но это применимо лишь к данному контексту. Поэтому безопасная обработка вводимых данных всегда должна быть применена к контексту, где будут вставляться пользовательские данные.

Проверка входящих/исходящих данных. Безопасная обработка данных может быть выполнена когда на ресурс поступают входные данные, или прямо перед тем, как веб-приложение вставляет пользовательские данные в содержимое страницы (исходящие данные).

Защита может быть выполнена путём обезвреживания данных, как только они поступают на сервер веб-ресурса, и таким образом можно обеспечить, что все вредоносные коды будут нейтрализованы. Но проблема заключается в том, что пользовательские данные могут быть вставлены в несколько контекстов, как было описано выше. Тогда нет простого способа отловить все возможные пути внедрения XSS и обезопасить их.

Вместо этого необходимо использовать защиту на уже исходящих данных от сервера, потому что средства защиты могут принимать во внимание каждый конкретный контекст и то, какие вводимые пользователем данные будут вставлены.

Обработка на Клиенте/Сервере. Безопасная обработка может быть проведена либо на стороне клиента, либо на стороне сервера, данные варианты стоит рассматривать при различных обстоятельствах.

В современных веб-приложениях проверка данных на наличие всех типов XSS-атак должна производиться как на стороне сервера, так и на стороне клиента.

При защите от хранимых и отражённых XSS безопасная обработка входных данных должна быть выполнена в коде на стороне сервера. Это производится при помощи различных инструментов языка программирования, используемого сервером, например, PHP.

При защите от атак типа «XSS в DOM», при которых сервер никогда не получает зловредный код (например, рассмотренная ранее атака через идентификатор #), обработка входных данных должна быть выполнена в коде на стороне клиента [25]. Это производится с помощью методов и свойств клиентского языка JavaScript.

В качестве второй линии обороны можно использовать Политики безопасности контента (англ. Content Security Policy – CSP). Они позволяют вносить ограничения на использование ресурсов только из надёжных источников. Это означает, что если даже злоумышленнику удастся внедрить вредоносный контент (скрипт) на веб-ресурс, CSP предотвратит его исполнение.

2.7. Вывод

Межсайтовый скриптинг является одной из самых опасных уязвимостей веб-ресурса, равно как и SQL-инъекции. Он осуществляется различными способами, чтобы навредить пользователям ресурса.

В основном он используется для атаки на захват сессии (кража сессионной Cookie). Защита от уязвимостей XSS возможна, но никогда нельзя на 100% сказать, что никто не сможет сломать разработанную защиту или фильтр.

Всемирная паутина развивается и появляются новые функции и технологии, поэтому злоумышленники всегда находят способы обойти защиту. Все рассмотренные векторы атаки XSS выполняются по-разному, но имеют один и тот же эффект, если выполняются успешно. Так как атака XSS основана на вводимых пользователем данных, то стоит учитывать безопасную обработку входных данных.

Кодирование должно выполняться везде, где используется пользовательский ввод. В различных ситуациях кодирование должно быть дополнено фильтрацией данных (валидацией). Для предотвращения всех типов XSS-атак обработка вводимых данных должна выполняться в коде как на стороне клиента, так и на стороне сервера.

В качестве дополнительного уровня защиты стоит рассмотреть Политики безопасности контента (CSP), которые позволят избежать выполнения различных вредоносных сценариев в случае, если безопасная обработка вводимых данных содержит ошибку.

Заключение

Существует множество подходов и конструкций, реализованных в различных веб-приложениях, но безопасность по-прежнему является одним из основных вопросов во всем мире. В данной статье были рассмотрены две из наиболее опасных уязвимостей

в сфере веб-технологий, а также конкретные случаи и примеры SQL-инъекций и XSS-атак на веб-приложения. Наличие уязвимостей XSS и SQL-инъекций в веб-приложениях, имеет огромный риск не только для веб-приложений, но и для самих пользователей.

Также в статье были рассмотрены различные существующие подходы к выявлению и предотвращению этих уязвимостей в приложении. Разработчик должен использовать предоставленные механизмы и стараться разрабатывать безопасный код.

Для облегчения обнаружения различных уязвимостей существуют различные инструменты (сканеры), которые могут помочь в анализе безопасности веб-приложений и облегчить разработку защиты. Но данные инструменты в большинстве своём могут только идентифицировать проблемы, но не способны устранять их. Поэтому знания разработчика безопасности являются ключевым фактором при построении безопасного веб-ресурса.

Для устранения проблем безопасности приложений, разработчики должны знать все пути и векторы проведения различных атак, чтобы иметь возможность разрабатывать механизмы защиты.

Межсайтовый скриптинг, также как и атаки SQL-инъекций, связан с проверкой входных данных. Механизмы таких атак очень схожи, но в XSS-атаках жертвой является сам пользователь, а в атаках SQL-инъекцией – сервер базы данных веб-приложения. При XSS-атаках вредоносный контент доставляется пользователям с использованием языка программирования, выполняемого на стороне клиента, такого как JavaScript, а при использовании SQL-инъекции используется язык запросов к БД SQL.

При этом XSS-атаки, в отличие от SQL-инъекций, наносят вред исключительно клиентской стороне, оставляя сервер приложения полностью в рабочем состоянии.

Разработчики должны применять защиту, как для серверных составляющих, так и для клиентской части веб-приложения. В большинстве языков программирования, ориентированных на веб-разработку, есть множество средств и инструментов, позволяющих защитить веб-приложение и избежать большинства атак.

Таким образом, правильно спроектированные и реализованные механизмы защиты позволят веб-приложению оставаться неуязвимым для большинства существующих атак.

Литература / References:

1. Kaur D., Kaur P. Empirical Analysis of Web Attacks. *Procedia Computer Science*. 2016;78:298-306. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.02.057>
2. Nagpal B., Chauhan N., Singh N. A Survey on the detection of SQL injection attacks and their countermeasures. *J. Inf. Process. Syst.* 2017;13(4):689-702. <https://doi.org/10.3745/JIPS.03.0024>
3. Wang K. and Hou Y. Detection method of SQL injection attack in cloud computing environment. In: *2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*. P. 487-493. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2016.7867260>
4. Hu H. Research on the technology of detecting the SQL injection attack and non-intrusive prevention in WEB system. In: *2017 AIP Conference Proceedings*. 2017;1839(1):020205. <https://doi.org/10.1063/1.4982570>
5. Lounis O., Guermeche S.E.B., Saoudi L., Benaicha S.E. A new algorithm for detecting SQL injection attack in Web application. In: *2014 Science and Information Conference (SAI)* 2014. P. 589-594. <https://doi.org/10.1109/SAI.2014.6918246>
6. Voitovych O.P., Yuvkovetskyi O.S., Kupershtein L.M. SQL injection prevention system. In (2016) *International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)* 2016. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2016.7739642>

7. Razzaq A., Anwar Z., Ahmad H.F., Latif K., Munir F. Ontology for attack detection: An intelligent approach to Web application security. *Computers & Security*. 2014;45:124-146.
<https://doi.org/10.1016/j.cose.2014.05.005>
8. Vibhandik R., Bose A.K. Vulnerability assessment of Web applications – a testing approach. In: Forth International Conference on e-Technologies and Networks for Development (ICeND). 2015. P. 16-21.
<https://doi.org/10.1109/ICeND.2015.7328531>
9. Sahu D.R., Tomar D.S. Analysis of Web application code vulnerabilities using secure coding standards. *Arab. J. Sci. Eng.* 2017;42(2):885-895.
<https://doi.org/10.1007/s13369-016-2362-5>
10. Shar L.K., Tan H.B.K. Predicting SQL injection and Cross site scripting vulnerabilities through mining input sanitization patterns. *Inform. Software Tech.* 2013;55(10):1767-1780.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2013.04.002>
11. Canfora G., Visaggio C.A. A set of features to detect Web security threats. *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*. 2016;12(4):243-261.
<https://doi.org/10.1007/s11416-016-0266-2>
12. Wang C.-H., Zhou Y.-S. A new Cross-Site scripting detection mechanism integrated with HTML5 and CORS properties by using browser extensions. In: *International Computer Symposium (ICS)*. 2016. P. 264-269.
<https://doi.org/10.1109/ICS.2016.0060>
13. Alvarez E.D., Correa B.D., Arango I.F. An analysis of XSS, CSRF and SQL injection in colombian software and web site development. In: *8th Euro American Conference on Telematics and Information Systems (EATIS)*. 2016. P. 1-5.
<https://doi.org/10.1109/EATIS.2016.7520140>
14. Gupta S., Gupta B. B. Automated Discovery of JavaScript Code Injection Attacks in PHP Web Applications. *Procedia Computer Science*. 2016;78:82-87.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.02.014>
15. Vishnu B.A., Jevitha K.P. Prediction of Cross-Site Scripting Attack Using Machine Learning Algorithms. In: *Procc. International Conference on Interdisciplinary Advances in Applied Computing 2014 (ICONIAAC '14)*. Article 55.
<https://doi.org/10.1145/2660859.2660969>
16. Shrivastava A., Choudhary S., Kumar A. XSS vulnerability assessment and prevention in web application. In: *2nd International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT-2016)*. P. 850-853.
<https://doi.org/10.1109/NGCT.2016.7877529>
17. Sivakorn S., Keromytis A.D., Polakis J. That's the way the Cookie crumbles: Evaluating HTTPS enforcing mechanisms. In: *Proceedings of the 2016 ACM on Workshop on Privacy in the Electronic Society (WPES '16)*. P. 71-81.
<http://dx.doi.org/10.1145/2994620.2994638>
18. Wang R., Xu G., Zeng X., Li X., Feng Z. TT-XSS: A novel taint tracking based dynamic detection framework for DOM Cross-Site Scripting. *J. Parallel Distrib. Comput.* 2017;118(1):100-106.
<https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2017.07.006>
19. Zalbina M.R., Septian T.W., Stiawan D., Idris M.Y., Heryanto A., Budiarto R. Payload recognition and detection of Cross Site Scripting attack. In: *2nd International Conference on Anti-Cyber Crimes (ICACC-17)*. 2017. P. 172-176.
<https://doi.org/10.1109/Anti-Cybercrime.2017.7905285>
20. Jerkovic H., Vranesic P., Dacic S. Securing web content and services in open source content management systems. In: *39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO) 2016*. P. 1402-1407.
<https://doi.org/10.1109/MIPRO.2016.7522359>
21. Zhang S., Wang W., Chen Z., Gu H., Liu J., Wang C. A web page malicious script detection system. In: *3rd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems*. IEEE 2014. P. 394-399.
<https://doi.org/10.1109/CCIS.2014.7175767>
22. Rexha B., Halili A., Rrmoku K., Imeraj D. Impact of secure programming on web application vulnerabilities. In: *International Conference on Computer Graphics, Vision and Information Security (CGVIS)*. 2015 IEEE. P. 61-66.
<https://doi.org/10.1109/cgvis.2015.7449894>
23. Filipe R., Araujo F. Client-side monitoring techniques for web sites. In: *15th International Symposium on Network Computing and Applications (NCA)*. 2016 IEEE. P. 363-366.
<https://doi.org/10.1109/NCA.2016.7778642>
24. Zachara M. Identification of scanning and attacks against web applications with graph-based modeling of users' behavior. In: *3rd IEEE International Conference on Cybernetics 2017 (CYBCONF)*. 8 p.
<https://doi.org/10.1109/CYBCONF.2017.7985783>
25. Jemi Hazel J., Valarmathie P., Saravanan R. Guarding web application with multi-angled attack detection. In: *International Conference on Soft-Computing and Network Security (ICSNS -2015)*. 4 p.
<https://doi.org/10.1109/ICSNS.2015.7292382>

Об авторе:

Лесько Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладные информационные технологии» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 57189664364, <https://orcid.org/0000-0002-6641-1609>

About the author:

Sergey A. Lesko, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department «Applied information technology», Institute of Integrated Security and Special Instrumentation, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 57189664364, <https://orcid.org/0000-0002-6641-1609>

Поступила: 18.05.2020; получена после доработки: 02.09.2020; принята к опубликованию: 10.10.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-34-46>



УДК 004.7

Разработка технологии контроля доступа к цифровым порталам и платформам на основе встроенных в интерфейс оценок времени реакции пользователей

**Ш.Г. Магомедов^{1,@},
П.В. Колясников^{1,2},
Е.В. Никульчев^{1,2}**

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Российская академия образования, Дата-центр, Москва 119121, Россия

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

Статья посвящена разработке технологии контроля доступа к цифровым порталам и платформам на основе встроенных в интерфейс оценок персональных характеристик поведения пользователей. В распределенных цифровых платформах и порталах, использующих персональные данные, осуществляется сбор и обработка данных большого объема с помощью специализированных приложений, использующих компьютерные сети. Согласно законодательству Российской Федерации хранение данных происходит на внутрикорпоративных серверах и центрах обработки данных. Задачам разграничения и контроля доступа в современных информационных системах уделяется особое внимание. Широкая доступность и массовость сервисов должна сопровождаться более тщательным контролем и верификацией пользователя. Обеспечение контроля доступа к таким системам не может быть осуществлено только за счет технологий и средств информационной безопасности, повысить эффективность можно за счет программно-аппаратных архитектурных решений. В работе предлагается расширить развивающуюся в настоящее время SIEM-технологию (Security information and event management), объединяющую концепцию управления событиями безо-

пасности и управление информационной безопасностью, блоками анализа поведения пользователей. В качестве характеристики, которая может быть оценена без перегрузок каналов связи и независима от используемого типа устройств, предложено использовать время психомоторной реакции, измеряемое при выполнении действий с интерфейсом. Разработано технологическое решение, которое может быть реализовано в широком спектре цифровых платформ – банковских, медицинских, образовательных и др. Приведены результаты экспериментов с использованием цифровой платформы массовых психологических исследований. Для анализа использовались данные массового опроса при ответе (в форме выбора из имеющихся вариантов) на анкетные вопросы об уровне образования. Анализ данных о времени реакции показал возможность нормирования и одинаковые показатели конкретных пользователей при ответах на разные вопросы.

Ключевые слова: контроль доступа, цифровые платформы, обработка больших объемов данных, управление событиями безопасности, информационная безопасность, вычислительные комплексы, анализ поведения пользователей.

Для цитирования: Магомедов Ш.Г., Колясников П.В., Никульчев Е.В. Разработка технологии контроля доступа к цифровым порталам и платформам на основе встроенных в интерфейс оценок времени реакций пользователей. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):34-46. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-36-46>

Development of technology for controlling access to digital portals and platforms based on estimates of user reaction time built into the interface

Shamil G. Magomedov^{1,@},
Pavel V. Kolyasnikov^{1,2},
Evgeny V. Nikulchev^{1,2}

¹MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

²Russian Academy of Education, Data Center, Moscow 119121, Russia

@Corresponding author e-mail: magomedov_sh@mirea.ru

The paper addresses the development of technology for controlling access to digital portals and platforms based on assessments of personal characteristics of user behavior built into the interface. In distributed digital platforms and portals using personal data, big data is collected and processed using specialized applications using computer networks. In accordance with the law, the data is stored on internal corporate servers and data centers. Special attention is paid to the tasks of differentiation and control of access in modern information systems. Wide availability and mass scale of services should be accompanied by more careful control and user verification. Access control to such systems cannot be ensured only through technologies and information security tools; efficiency can be increased through software and hardware architectural solutions. The paper proposes to expand the currently developing SIEM technology (Security information and event management), which combines the concept of security event management and information security management, with blocks of user behavior analysis. As a characteristic that can be measured without overloading communication channels and is independent of the type of device used, the psychomotor reaction time is proposed, measured as the performance of actions with the interface. A technological solution has been developed for implementation in a wide range of digital platforms: banking, medical, educational, etc. The results of experimental research using a digital platform of mass psychological research are presented. For the research, data from a

mass survey were used when answering (in the form of a choice from the available options) to questions about the level of education. Analysis of the reaction time data showed the possibility of standardization and the same indicators of specific users when answering different questions.

Keywords: access control, digital platforms, big data processing, security event management, information security, computing systems, user behavior analysis.

For citation: Magomedov Sh.G., Kolyasnikov P.V., Nikulchev E.V. Development of technology for controlling access to digital portals and platforms based on estimates of user reaction time built into the interface. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):34-46 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-34-46>

Введение

Цифровизация внесла во все сферы общественной жизни широкое распространение платформ, порталов, вычислительных сервисов, что определило развитие новых технологий сбора, хранения, обработки и передачи данных, и соответственно, специализированных архитектур вычислительных комплексов и служб передачи данных по компьютерным сетям, механизмов взаимодействия клиентов с элементами вычислительного комплекса с использованием различных телекоммуникационных технологий, технологий защиты компьютерных сетей и приложений.

В распределенных цифровых платформах и порталах (ЦП), использующих персональные данные, осуществляется сбор и обработка большого объема данных с помощью специализированных приложений с использованием компьютерных сетей и, согласно законодательству, хранение данных происходит на серверах на территории РФ [1]. К ЦП относятся такие системы, как платформы государственных услуг, муниципальные и региональные платформы, банковские порталы, медицинские системы, платформы психологических исследований, образовательные системы дистанционного обучения и др. Задачам разграничения и контроля доступа в современных информационных системах уделяется особое внимание. Широкая доступность и массовость сервисов должна сопровождаться более тщательным контролем и верификацией пользователей. Обеспечение контроля доступа к таким системам не может быть осуществлено только за счет технологий и средств информационной безопасности, повысить эффективность можно за счет программно-аппаратных архитектурных решений.

Цифровые платформы и порталы, обрабатывающие большие данные, имеют ряд общих особенностей: как правило, веб-интерфейс или приложение с доступом по сети; большое количество пользователей; сложную инфраструктуру вычислительного комплекса; разграничение прав доступа к данным; различные типы интерфейсов в зависимости от прав доступа; большие объемы обрабатываемых данных; наличие конфиденциальных, а часто и частных (банковские, медицинские) данных; веб-интерфейсы, формирующие запросы к базам данных.

Верификация пользователей не обеспечивает требуемый контроль доступа к данным. Например, в образовательных системах передача пароля позволяет одному учащемуся удаленно сдать тесты за нескольких человек; в системах здравоохранения, в случае, когда компьютер оставлен включенным, другой сотрудник может получить доступ к медицинским данным. Стоит отметить, что в банковских системах разрабатываются

антифрод-системы, контролирующие транзакции для выявления мошенников. Важной особенностью такого нарушения доступа к большим данным является отсутствие аномалий на уровне трафика. Получение индивидуальных характеристик пользователей, особенностей работы однотипной группы пользователей с системой позволит также повысить эффективность хранения данных за счет структурирования наиболее вероятных запросов данных, а также сформировать клиент-ориентированный интерфейс на основе предпочтений пользователей. Указанные особенности новых технологий создают сложности в разграничении доступа.

В настоящее время развивается концепция [2] SIEM (Security information and event management). Она объединяет две концепции: управление событиями безопасности (Security Event Management, SEM), основанную на мониторинге и корреляции событий безопасности в реальном времени; управление информационной безопасностью (Security Information Management, SIM), предназначенную для хранения, обработки и анализа данных. Системы SIEM создаются для выявления кибератак, уязвимостей, оценки рисков безопасности через программно-аппаратные комплексы, предоставляющие информацию из различных источников данных. SIEM-система разворачивается над защищаемой информационной системой [3] и представляет собой интегрированные устройства либо многокомпонентные комплексы. Существуют коммерческие решения SIEM-систем: QRadar IBM, Arc Sight HP, Symantec Security Services, FortiSIEM и др.[4]. Однако разработка альтернативных моделей, которые предоставляют дополнительную информацию на основе тех же источников данных, а также формирование новых источников данных на этапе разработки комплексов с критически важным разграничением доступа является важной и актуальной задачей современных исследований.

Настоящая статья посвящена разработке технологии повышения эффективности контроля доступа на основе встроенных в интерфейс вычислительных комплексов оценок времени реакций пользователей как индивидуальных индикаторов психологических и психофизических реакций.

1. Разработка технологии

Разработке архитектур SIEM-систем, обнаружения источников угроз и механизмов их выявления посвящено значительное количество современных исследований [5]: в распределенных системах [6], для блокировки вредоносного трафика с устройств IoT [7], по интеллектуальной обработке данных из нескольких источников [8, 9], по использованию методов классификации событий [10] и др.

Существует направление исследований, связанное с анализом поведения пользователей (User behavior analytics, UBA) [11], направленное на обеспечение процесса безопасности – обнаружение внутренних угроз, целевых атак и финансового мошенничества. Решения UBA изучают шаблоны человеческого поведения, после чего применяют алгоритмы обнаружения аномалий этих шаблонов. Например, в [12] рассмотрена ситуация, когда злоумышленник в сети компании может использовать украденные учетные данные для скрытого сбора конфиденциальных данных. Такое поведение трудно обнаружить, если оно не вызывает предупреждение о нарушении доступа или утечке данных.

Альтернативой многоуровневой технологии является использование встраиваемых динамических моделей в интернет-приложения [13]. Авторами разработаны структуры,

включающие ситуационные модели и интерпретатор. Модель содержит заданные конечные наборы состояний, переходов и правил, определяющих переходы. Интерпретатор отслеживает и сохраняет текущие состояния модели, проверяя условия переходов. Известен подход [14], включающий получение характеристик действий пользователя (логин пользователя, движение мыши, среднее время между нажатием клавиши мыши и началом движения курсора, скорость набора текста и др.). Подобные исследования интересны, но носят ограниченный характер – для многопользовательских систем получение, передача, хранение и обработка данных вычислительно очень затратны. Кроме того, использование манипулятора мыши для анализа реакций сложно реализуемо – задержки сильно зависят от производителя и от поверхности, на которой в данный момент работает пользователь. Кроме того, веб-интерфейсы подразумевают использование их на разных устройствах, в том числе с сенсорными экранами.

Однако использовать психомоторные реакции представляется целесообразным. Современные психологические исследования выявили достоверность данных по исследованию реакций, полученных с использованием веб-интерфейсов с данными, полученными в лабораторных условиях. Например, в [15] сравнивались результаты сложных лингвокогнитивных тестов, что в некотором смысле соответствует выполнению действий с интерфейсами ЦП.

Таким образом, предлагается разработать технологию построения архитектуры многоуровневой защиты, использующую в качестве дополнительного идентификатора пользователя время реакций при работе с элементами интерфейса. При этом сбор данных будет осуществляться встроенными программными средствами, а элементы интерфейса передаваться в систему.

На рис. 1 представлена ситуация, когда «Пользователь 1» ввел все необходимые данные для доступа, однако он может быть заменен другим пользователем, как с рабочего места «Пользователя 1», так и из другого места. Если в системе отсутствуют блоки, связанные с поведением пользователя и его местонахождением, «Пользователь 2» может осуществлять доступ к данным.

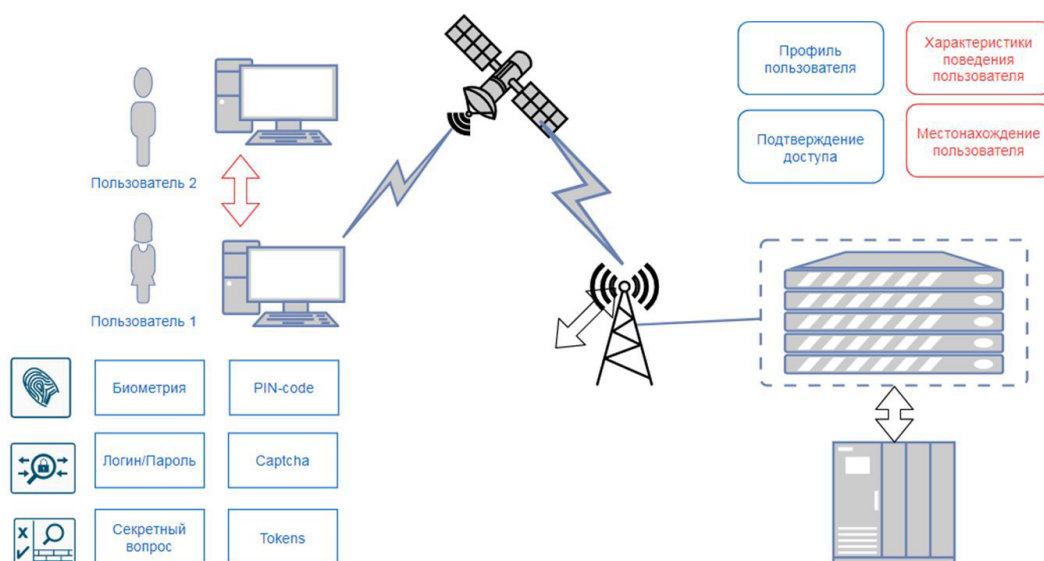


Рис. 1. Пример системы с контролем доступа.

Для ЦП предлагается встроить в системы контроля доступа и верификации вспомогательные индикаторы использования элементов интерфейса – время реакции (ВР) при выполнении определенных, заранее зафиксированных действий. Это позволит использовать только персональные реакции, исключив ситуации смены пользователя в одном сеансе работы. Также возможно определение пользователя при использовании чужих паролей для входа в систему. Возможные ситуации с изменением реакций под текущим психоэмоциональным состоянием требуют проведения дополнительных подтверждений личности пользователя. Так, в случаях, например, болезни или снижения концентрации пользователя допуск пользователя в системы с критическим доступом может быть проверен специальными службами.

В общем виде разрабатываемую технологию можно представить в следующем виде:

1. Технология реализуется вычислительным комплексом (ВК). ВК может предоставлять клиенту одну или несколько услуг, таких как, например, услуги мониторинга событий, финансовые, банковские, правительственные, образовательные услуги, услуги передачи данных в реальном времени, игровые услуги, услуги поиска и т.п.

2. ВК включает компьютерные сети, системы управления передачей данных, то есть среду, используемую для обеспечения каналов связи между компьютерами, системами обработки данных и другими устройствами. Сеть может включать в себя соединения в виде проводных линий связи, каналов беспроводной связи и оптоволоконные кабели.

3. ВК могут отправлять инциденты безопасности на облачную платформу для дальнейшего анализа приложением машинного обучения на основе идентифицированных характеристик инцидентов безопасности, обнаруженных во время локального анализа с помощью модуля безопасности и диспетчера событий. Идентифицированные характеристики могут включать, например, информацию о том, что наблюдаемые параметры имеют оценку риска безопасности выше порогового значения.

4. В ВК создается постоянное хранилище информации о безопасности и менеджер событий, которые могут быть аппаратным компонентом или комбинацией аппаратных и программных компонентов. Менеджер информации и событий безопасности управляет процессом выбора только определенных инцидентов безопасности для локального и удаленного анализа.

5. Интервал оценки психомоторных реакций пользователя представляет собой заранее определенный интервал времени, на основе которого формируются инциденты безопасности.

Архитектура ВК, реализующего технологии контроля доступа с использованием персональных психомоторных реакций, имеет 4 уровня:

- уровень аппаратного и программного обеспечения;
- уровень виртуализации;
- уровень управления;
- уровень рабочих нагрузок.

Уровень аппаратного и программного обеспечения может включать мэйнфреймы, серверы, блейд-серверы, устройства хранения, программное обеспечение серверов и сетевых приложений, программное обеспечение базы данных, прикладное программное обеспечение.

Уровень виртуализации обеспечивает уровень абстракции: виртуальные серверы, виртуальная память, виртуальные сети, виртуальные приложения, операционные системы и виртуальные клиенты.

Уровень управления определяет контроль доступа к сервисам ВК по компьютерным сетям, обеспечивает доступ к ВК для пользователей и системных администраторов. Управление уровнями обслуживания обеспечивает распределение ресурсов ВК и управление таким образом, чтобы удовлетворялись заданные уровни доступа.

Уровень рабочих нагрузок предоставляет функциональные возможности, для которых используется ВК. В интерфейс клиентских приложений необходимо встроить сбор характеристик поведения. Так, для систем, подразумевающих передачу состояния Representational State Transfer (REST), необходимо собирать данные о запросах пользователей к Application programming interface (API), ведя учет времени, параметров и идентификатора пользователя, а для систем с графическим пользовательским интерфейсом Graphical user interface (GUI) – собирать данные о действиях в отношении интерфейса, ведя учет времени осуществления действий и идентификаторы пользователя.

Таким образом, элементы интерфейса вместе со встроенными реакциями передаются в ВК и анализируются на уровне доступа (рис. 2).

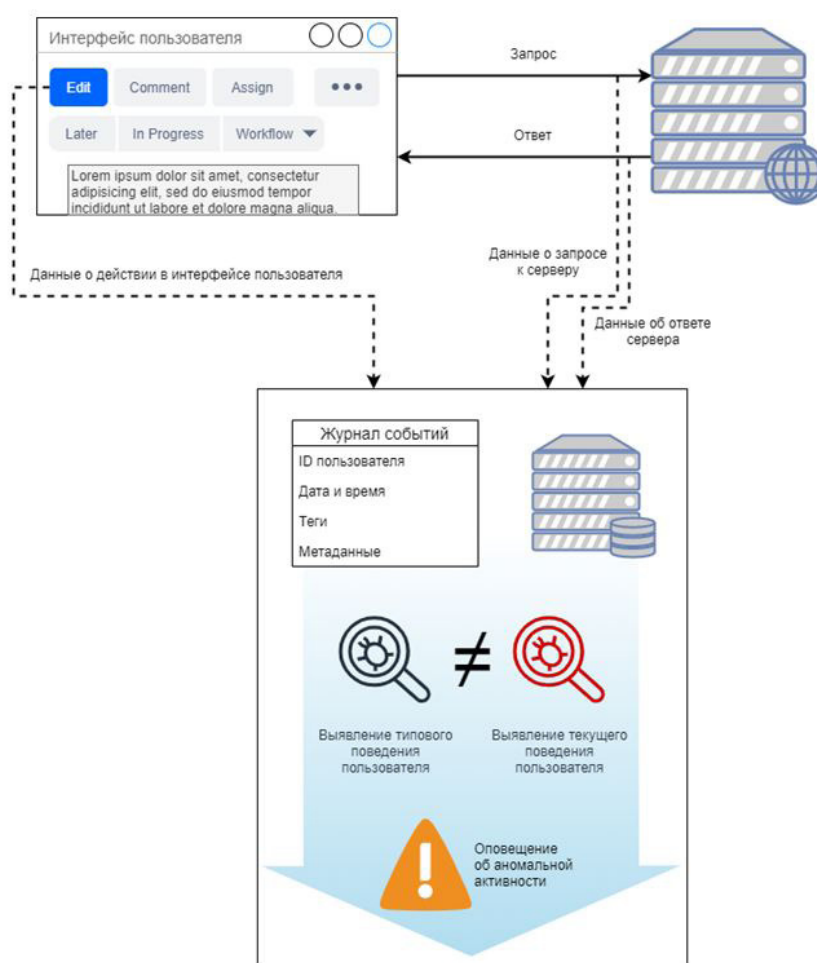


Рис. 2. Уровень анализа действий пользователя в архитектуре ВК.

Концептуальная схема взаимодействия уровня управления и серверной части приведена на рис. 3.

В процессе работы пользователя с интерфейсом системы необходимо проверять условия переходов на основе ранее совершенных наборов действий, записанных в журнал событий.

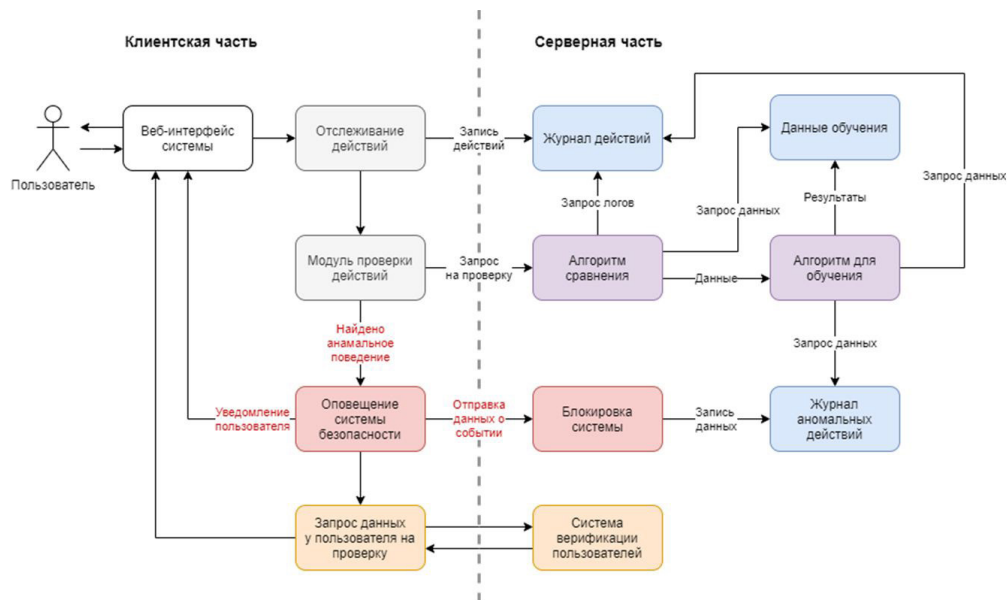


Рис. 3. Технология взаимодействия уровня управления с клиентскими интерфейсами.

2. Экспериментальные исследования

Исследования проводились с помощью цифровой платформы DigitalPsyTools [16]. Система является одновременно цифровой платформой с веб-интерфейсом и инструментом психодиагностики, используемым для популяционных исследований в системе образования. В элементы ее интерфейса встроены платформонезависимые функции оценки когнитивных реакций. Идентифицируемость распределения, определяемого действием пользователя, базируется на моделях, аналогичных [17].

Между приложением внешнего стимула и соответствующей двигательной реакцией на стимул существует определенный период времени, называемый временем реакции. Оценка этого времени – один из важных методов изучения скорости когнитивной обработки информации человеком и скоординированной реакции периферических движений.

На время реакции влияют многие факторы, такие как пол, возраст, физическое состояние, утомляемость, состояние здоровья и т.п. Увеличенное время реакции означает снижение производительности. Время показа является временем от начала показа страницы, на которой можно сделать действие, до времени на момент, когда пользователь осуществил какое-либо действие в интерфейсе. Иными словами, ВР – это время от появления стимула до нажатия кнопки (на основании психологических терминов).

Время реакции пользователя для конкретного действия можно разделить на:

- минимальное ВР (минимальная латентность ответа),
- максимальное ВР (максимальная латентность ответа),
- усредненное ВР (усредненная латентность ответа).

Для анализа использованы реакции 1980 студентов при ответе на 4 вопроса:

1. Основа обучения (выбор из трех вариантов: бюджетная/контрактная/целевая).
2. Вы поступили на ту специальность, которую хотели? (Да/Нет).
3. Укажите профиль Вашего образования (выбор из четырех вариантов: технический/гуманитарный/естественнонаучный/нет профиля).
4. Программа обучения (выбор из четырех вариантов: бакалавриат/магистратура/специалитет/аспирантура).

Анкета организована в виде веб-интерфейса. После получения архива с опросом он распаковывается и загружается в браузер на устройстве клиента. В каждом элементе опроса фиксируется ответ и время реакции в миллисекундах (с момента загрузки до выбора ответа и нажатия кнопки «далее»), т.е. время, за которое пользователь прочитал вопрос, выбрал нужный вариант и нажал кнопку «далее». Опрос был большой и включал когнитивные тесты, и пользователь был заинтересован перейти на следующую страницу. Данные передавались в платформу после окончания всего опроса, либо после закрытия пользователем веб-страницы. Это гарантировало невмешательство сетей в оценку времени реакции.

Также были собраны сведения об используемых при проведении опроса операционных системах и браузерах. Эти сведения представлены на рис. 4 и 5.

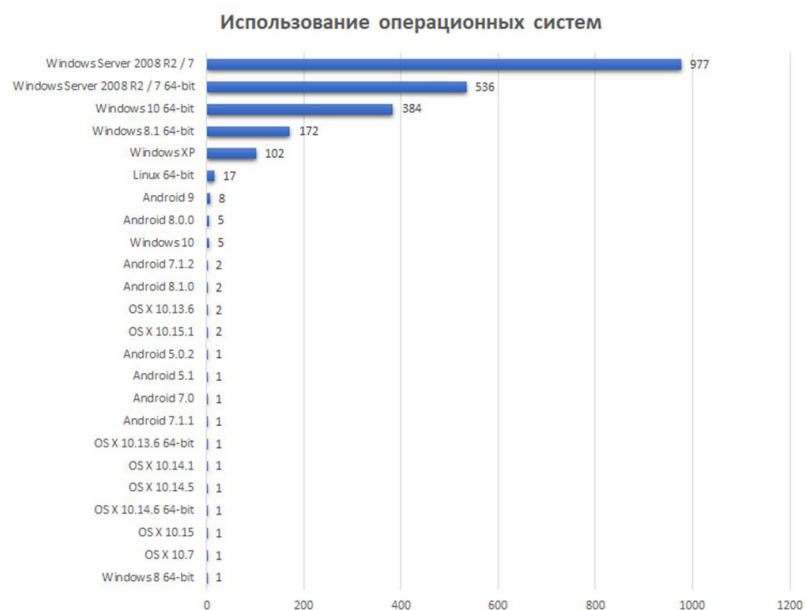


Рис. 4. Операционные системы, используемые пользователями в опросе.

Гипотеза анализа данных о времени реакции состояла в возможности определения зависимости в реакциях пользователей в работе с элементами интерфейса при ответе на заданный вопрос, а также возможности определения индивидуальных психомоторных реакций при работе с интерфейсом. Анализ данных показал состоятельность гипотезы.

На рис. 6 представлены полученные гистограммы для каждого вопроса и индивидуальные реакции трех произвольно выбранных пользователей. Из представленных результатов видно, что замедленная реакция (рис. 6а) характерна для ответа на все вопросы, средние и быстрые реакции (рис. 6б,в) сохраняются при изменении вопроса и количества вариантов ответов, то есть этот подход позволяет выявить, был ли в процессе ответа на анкетные вопросы заменен пользователь.

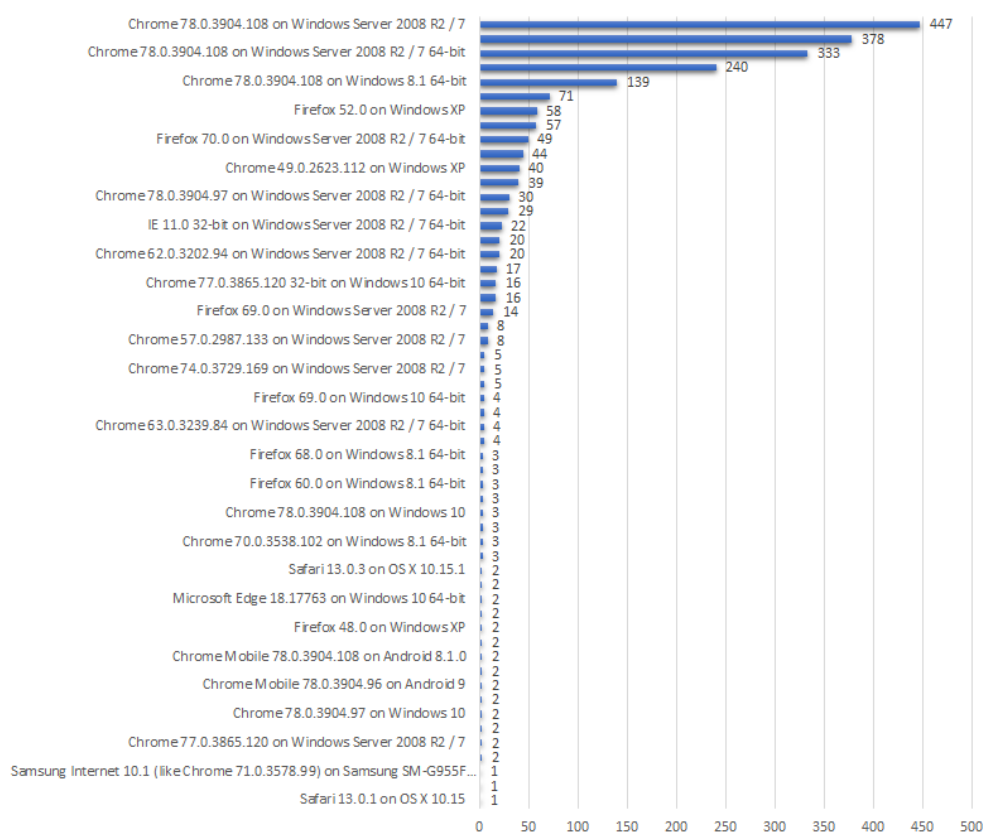


Рис. 5. Типы и версии браузеров, используемых в опросе.

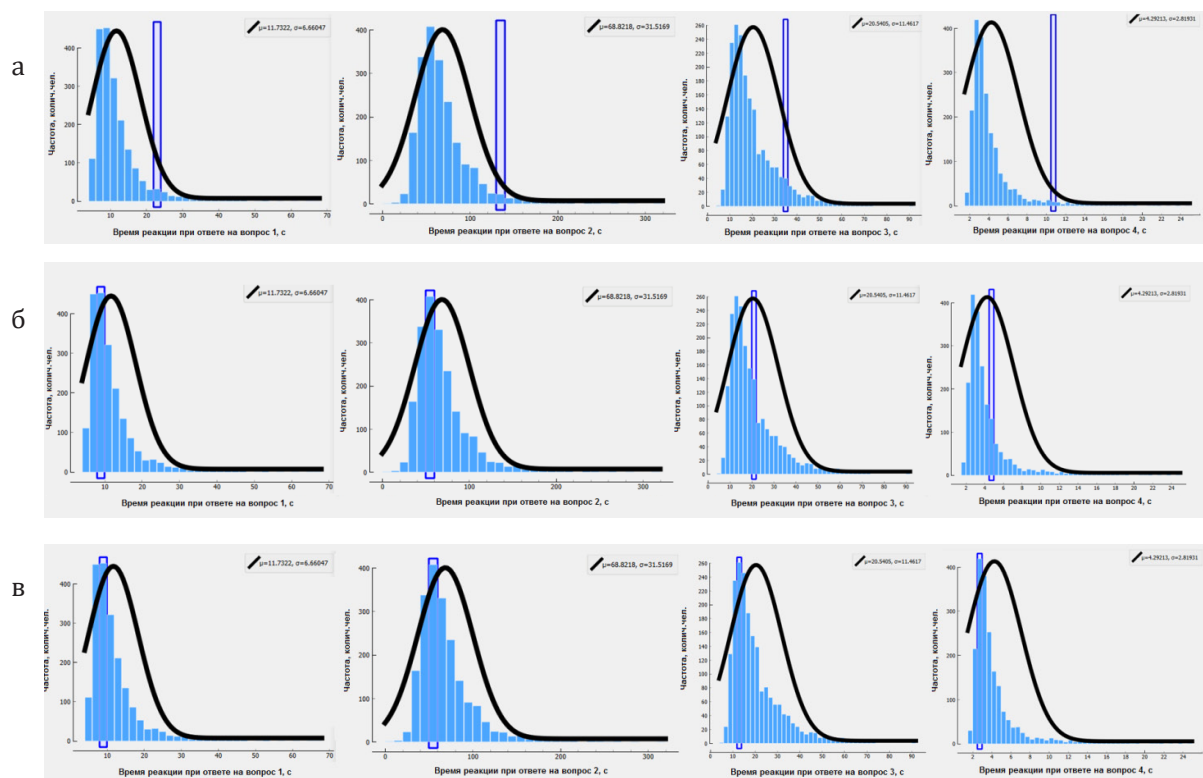


Рис. 6. Примеры реакций случайно выбранных пользователей при ответах на 4 вопроса в веб-опросе:
а – замедленная реакция; б – средняя реакция; в – быстрая реакция.

На основании предварительных результатов анализа можно сделать вывод, что данные реакции могут быть использованы в разработанной технологии контроля доступа к ЦП, в том числе с использованием веб-интерфейсов. Данные могут использоваться для валидации и дополнительной верификации пользователей, участвующих в опросах и использующих интерфейсы.

Заключение

В работе предлагается расширить SIEM-технологии анализом психомоторных реакций пользователей. В качестве характеристики, которая может быть измерена без перегрузок каналов связи и быть независимой от используемого типа устройств, предложено время реакции, измеряемое при выполнении действий с интерфейсом. Разработано технологическое решение, которое может быть реализовано в широком спектре цифровых платформ – банковских, медицинских, образовательных и др. Приведены результаты экспериментальных исследований с использованием цифровой платформы массовых психологических исследований. Для исследований использовались данные массового опроса при ответе (в форме выбора из имеющихся вариантов) на анкетные вопросы об уровне образования. Анализ данных о времени реакции показал возможность нормирования и одинаковые показатели конкретных пользователей при ответах на разные вопросы.

В качестве развития разработанного подхода представляется актуальным использование инструментов искусственного интеллекта для выявления скрытых зависимостей в данных, полученных с логирования пользователей и выявления наиболее вероятных действий пользователей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-29-02198).

Литература:

1. Никульчев Е.В., Ильин Д.Ю., Колясников П.В., Исмагуллина В.И., Захаров И.М., Малых С.Б. Разработка открытой цифровой платформы масштабных психологических исследований. *Вестник РФФИ*. 2019;4(104):99-113.
<https://doi.org/10.22204/2410-4639-2019-104-04-105-119>
2. Khan A., Khan R., Nisar F. Novice threat model using SIEM system for threat assessment. In: 2017 International Conference on Communication Technologies (ComTech). IEEE. 2017. P. 72-77.
<https://doi.org/10.1109/COMTECH.2017.8065753>
3. El Arass M., Souissi N. Smart SIEM: From big data logs and events to smart data alerts. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 2019;8(8):3186-3191.
4. Lavrova D.S. An approach to developing the SIEM system for the Internet of Things. *Automatic control and computer sciences*. 2016;50(8):673-681.
<https://doi.org/10.3103/S0146411616080125>
5. Khan T., Alam M., Akhunzada A., Hur A., Asif M., Khan M.K. Towards augmented proactive cyberthreat intelligence. *J. Parallel Distrib. Comput.* 2019;124:47-59.
<https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2018.10.006>
6. Kufel L. Security event monitoring in a distributed systems environment. *IEEE Secur. Priv.* 2013;11(1):36-43.
<https://doi.org/10.1109/MSP.2012.61>
7. Al-Duwairi B., Al-Kahla W., AlRefai M.A., Abdelqader Y., Rawash A., Fahmawi R. SIEM-based detection and mitigation of IoT-botnet DDoS attacks. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* 2020;10(2):2182-2191.
<http://doi.org/10.11591/ijece.v10i2.pp2182-2191>
8. Lee J., Kim J., Kim I., Han K. Cyber threat detection based on artificial neural networks using event profiles. *IEEE Access*. 2019;7:165607-16562.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953095>

9. Moukafih N., Orhanou G., El Hajji S. Neural Network-Based Voting System with High Capacity and Low Computation for Intrusion Detection in SIEM/IDS Systems. *Security and Communication Networks*. 2020; Article ID 3512737.
<https://doi.org/10.1155/2020/3512737>
10. Sancho J.C., Caro A., Ávila M., Bravo A. New approach for threat classification and security risk estimations based on security event management. *Future Generation Computer Systems*. 2020;113:488-505.
<https://doi.org/10.1016/j.future.2020.07.015>
11. Csaba K., Péter H.B. Analysis of Cyberattack Patterns by User Behavior Analytics. *AARMS – Academic and Applied Research in Military Science* 2018;17(3):101-114.
12. Xi X., Zhang T., Ye W., Wen Z., Zhang S., Du D., Gao Q. An Ensemble Approach for Detecting Anomalous User Behaviors. *Int. J. Softw. Eng. Knowl. Eng.* 2018;28(11n12):1637-1656.
<https://doi.org/10.1142/S0218194018400211>
13. Миронов В.В., Гусаренко А.С., Юсупова Н.И. Применение веб-сервисов на основе ситуационно-ориентированной базы данных для мониторинга просмотра учебного видеоконтента. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(3(26)): 27.
<https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.26.3.031>
14. Монахова М.М., Шерунтаев Д.А., Марков И.С., Мазуро Д.В. Модель поведения пользователя корпоративной сети передачи данных. В: Сб. трудов Девятой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. Екатеринбург; 2019. С. 603-608.
15. Kim J., Gabriel U., Gyax P. Testing the effectiveness of the Internet-based instrument PsyToolkit: A comparison between web-based (PsyToolkit) and lab-based (E-Prime 3.0) measurements of response choice and response time in a complex psycholinguistic task. *PloS ONE*. 2019;14(9):e0221802.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221802>
16. Nikulchev E., Ilin D., Silaeva A., Kolyasnikov P., Belov V., Runtov A., Pushkin P., Laptev N., Alexeenko A., Magomedov S., Kosenkov A., Zakharov I., Ismatullina V., Malykh S. Digital Psychological Platform for Mass Web-Surveys. *Data*. 2020;5(4):95.
<https://doi.org/10.3390/data5040095>
17. Борисов А.В., Босов А.В., Иванов А.В., Чавтараев Р.Б. Имитационное моделирование пользовательской активности для оценивания вероятностно-временных характеристик программного обеспечения. *Системы и средства информатики*. 2018;28(2):20-33.
<https://doi.org/10.14357/08696527180202>

References:

1. Nikulchev E.V., Ilyin D.Yu., Kolyasnikov P.V., Ismatullina V.I., Zakharov I.M., Malykh S.B. Development of the open digital platform for conducting the large-scale psychological research. *RFBR Journal*. 2019;(104):99-113 (in Russ.).
<https://doi.org/10.22204/2410-4639-2019-104-04-105-119>
2. Khan A., Khan R., Nisar F. Novice threat model using SIEM system for threat assessment. In: 2017 International Conference on Communication Technologies (ComTech). IEEE. 2017. P. 72-77.
<https://doi.org/10.1109/COMTECH.2017.8065753>
3. El Arass M., Souissi N. Smart SIEM: From big data logs and events to smart data alerts. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 2019;8(8):3186-3191.
4. Lavrova D.S. An approach to developing the SIEM system for the Internet of Things. *Automatic control and computer sciences*. 2016;50(8):673-681.
<https://doi.org/10.3103/S0146411616080125>
5. Khan T., Alam M., Akhunzada A., Hur A., Asif M., Khan M.K. Towards augmented proactive cyberthreat intelligence. *J. Parallel Distrib. Comput.* 2019;124:47-59.
<https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2018.10.006>
6. Kufel L. Security event monitoring in a distributed systems environment. *IEEE Secur. Priv.* 2013;11(1):36-43.
<https://doi.org/10.1109/MSP.2012.61>
7. Al-Duwairi B., Al-Kahla W., AlRefai M.A., Abdelqader Y., Rawash A., Fahmawi R. SIEM-based detection and mitigation of IoT-botnet DDoS attacks. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* 2020;10(2):2182-2191.
<http://doi.org/10.11591/ijece.v10i2.pp2182-2191>
8. Lee J., Kim J., Kim I., Han K. Cyber threat detection based on artificial neural networks using event profiles. *IEEE Access*. 2019;7:165607-16562.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953095>
9. Moukafih N., Orhanou G., El Hajji S. Neural Network-Based Voting System with High Capacity and Low Computation for Intrusion Detection in SIEM/IDS Systems. *Security and Communication Networks*. 2020; Article ID 3512737.
<https://doi.org/10.1155/2020/3512737>
10. Sancho J.C., Caro A., Ávila M., Bravo A. New approach for threat classification and security risk estimations based on security event management. *Future Generation Computer Systems*. 2020;113:488-505.
<https://doi.org/10.1016/j.future.2020.07.015>

11. Csaba K., Péter H.B. Analysis of Cyberattack Patterns by User Behavior Analytics. *AARMS – Academic and Applied Research in Military Science*. 2018;17(3):101-114.
12. Xi X., Zhang T., Ye W., Wen Z., Zhang S., Du D., Gao Q. An Ensemble Approach for Detecting Anomalous User Behaviors. *Int. J. Softw. Eng. Knowl. Eng.* 2018;28(11n12):1637-1656.
<https://doi.org/10.1142/S0218194018400211>
13. Mironov V.V., Gusarenko A.S., Yusupova N.I. Application of web services based on situation-oriented database for monitoring the viewing of the educational video content. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(3(26):27 (in Russ.).
<https://doi.org/10.26102/2310-6018/2019.26.3.031>
14. Monakhova M.M., Sheruntaev D.A., Markov I.S., Mazurok D.V. Behavior model of the user for a corporate data transmission network. In: *Proc. The 9th All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation and Its Application in Science and Industry*. Ekaterinburg; 2019. P. 603-608 (in Russ.).
15. Kim J., Gabriel U., Gyax P. Testing the effectiveness of the Internet-based instrument PsyToolkit: A comparison between web-based (PsyToolkit) and lab-based (E-Prime 3.0) measurements of response choice and response time in a complex psycholinguistic task. *PLoS ONE*. 2019;14(9):e0221802.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221802>
16. Nikulchev E., Ilin D., Silaeva A., Kolyasnikov P., Belov V., Runtov A., Pushkin P., Laptev N., Alexeenko A., Magomedov S., Kosenkov A., Zakharov I., Ismatullina V., Malykh S. Digital Psychological Platform for Mass Web-Surveys. *Data*. 2020;5(4):95.
<https://doi.org/10.3390/data5040095>
17. Borisov A.V., Bosov A.V., Ivanov A.V., Chavtaraev R.B. Monte Carlo based user activity simulation for software performance evaluation. *Sistemy i sredstva informatiki = Systems and Means of Informatics*. 2018;28(2):20-33 (in Russ.).
<https://doi.org/10.14357/08696527180202>

Об авторах:

Магомедов Шамиль Гасангусейнович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: M-5782-2016, Scopus Author ID 57204759220, <https://orcid.org/0000-0001-8560-1937>.
https://www.researchgate.net/profile/Shamil_Magomedov

Колясников Павел Владимирович, главный аналитик Дата-центра, Российская академия образования (119121 Москва, ул. Погодинская, 8), ассистент кафедры «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: O-1885-2018, Scopus Author ID 57204774687, <https://orcid.org/0000-0003-3633-5913>. https://www.researchgate.net/profile/Pavel_Kolyasnikov

Никулчев Евгений Витальевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78), главный аналитик Дата-центра, Российская академия образования (119121 Москва, ул. Погодинская, 8). ResearcherID: G-6557-2015, Scopus Author ID: 6504081534, <http://orcid.org/0000-0003-1254-9132>.
https://www.researchgate.net/profile/Evgeny_Nikulchev

About the authors:

Shamil G. Magomedov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Intelligent Information Security Systems of the Institute of Integrated Security and Special Instrumentation MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID: M-5782-2016, Scopus Author ID 57204759220, <https://orcid.org/0000-0001-8560-1937>. https://www.researchgate.net/profile/Shamil_Magomedov

Pavel V. Kolyasnikov, Chief Analyst of the Data Center, Russian Academy of Education (8, Pogodinskaya ul., Moscow 119121, Russia), Assistant of the Department of Intelligent Information Security Systems, Institute of Integrated Security and Special Instrumentation MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID: O-1885-2018, Scopus Author ID 57204774687, <https://orcid.org/0000-0003-3633-5913>.
https://www.researchgate.net/profile/Pavel_Kolyasnikov

Evgeny V. Nikulchev, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Intelligent Information Security Systems of the Institute of Integrated Security and Special Instrumentation MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia), Chief Analyst of the Data Center, Russian Academy of Education (8, Pogodinskaya ul., Moscow 119121, Russia). ResearcherID: G-6557-2015, Scopus Author ID: 6504081534, <http://orcid.org/0000-0003-1254-9132>. https://www.researchgate.net/profile/Evgeny_Nikulchev

Поступила: 23.08.2020; получена после доработки: 30.09.2020; принята к опубликованию: 30.10.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-47-53>



УДК 537.5

Беспроводная передача электрической энергии

В.И. Каганов[@],
Буй Хыу Чык

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

Электрическая энергия от электростанций к промышленным объектам и населенным пунктам в большинстве случаев передается по проводным воздушным или подземным линиям, охватывающим территории значительного размера. Однако иногда возникает необходимость в беспроводной передаче электрической энергии на объекты, расположенные в труднодоступных районах. С развитием космической электроэнергетики, основанной на размещении солнечных электростанций в космическом пространстве, проблема беспроводной передачи электрической энергии станет особенно актуальной. В этой связи в некоторых странах проводятся исследования в области беспроводной передачи электрической энергии с помощью как лазерного, так и СВЧ-излучения.

Рассмотрены основы построения систем беспроводной передачи электрической энергии на небольшие расстояния с помощью СВЧ-излучения. Анализируются и рассчитываются два варианта построения подобных систем: с применением параболических антенн, и с помощью фазированных антенных решеток (ФАР). Для обоих вариантов рассчитаны основные параметры систем при беспроводной передаче электрической энергии на 200 м. В первом случае используются мощные электровакуумные приборы – магнетрон или прямопролетный клистрон, во втором – мощные СВЧ-полевые транзисторы. Для второго варианта предлагается суммирование мощностей СВЧ-генераторов путем их взаимной синхронизации.

Ключевые слова: электрическая энергия, параболическая антенна, фазированная антенная решетка, СВЧ-генератор.

Для цитирования: Каганов В.И., Буй Хыу Чык. Беспроводная передача электрической энергии. Российский технологический журнал. 2020;8(6):47-53. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-47-53>

Wireless power transmission

William I. Kaganov[@],
Bui Huu Chuc

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

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

Electrical energy from power plants to industrial facilities and settlements is mostly transmitted by wire-connected air or underground lines covering vast territories. However, in some rare cases there is a need for wireless transmission of electrical power to objects located in hard-to-reach areas. The problem of wireless transmission of electrical energy will become especially urgent as space electric power industry based on the placement of solar power plants in outer space is being developed. In this regard, several countries are conducting studies on the problem of electrical energy transmission using both laser and microwave radiation. The fundamentals of building systems for wireless transmission of electrical energy over short distances using microwave radiation are considered. Two options for constructing such systems are analyzed and calculated: using parabolic antennas and using phased array antennas. For both options the main parameters of systems for wireless transmission of electrical energy at 200 m were calculated. In the first case, powerful microwave devices are used: a magnetron or a direct-flight klystron; in the second case, microwave powerful field-effect transistors. For the second option the summation of the powers of microwave generators by means of their mutual synchronization is proposed.

Keywords: electrical energy, parabolic antenna, phased array antenna, microwave generator.

For citation: Kaganov W.I., Bui Huu Chuc. Wireless power transmission. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):47-53 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-47-53>

Сущность проблемы

Электрическая энергия от электростанций к промышленным объектам и населенным пунктам в подавляющем числе случаев передается по проводным воздушным или подземным линиям, охватывающим территории значительного размера. Однако в некоторых случаях возникает необходимость в беспроводной передаче электрической энергии на объекты, расположенные в труднодоступных районах, на современные летательные аппараты типа квадрокоптера или иные транспортные средства.

С развитием космической электроэнергетики, основанной на размещении солнечных электростанций в космическом пространстве [1], проблема беспроводной передачи электрической энергии станет особенно актуальной. В связи с этим в некоторых странах проводятся исследования по проблеме беспроводной передачи электрической энергии с помощью как лазерного, так и СВЧ-излучения. Приведем несколько примеров по второму направлению.

Первый пример. Во Франции с помощью СВЧ-излучения (частота 2450 МГц) осуществлена передача энергии мощностью 10 кВт на остров, удаленный от берега на расстояние 700 м [2].

Второй пример. В Японии компания JAXA создала установку по передаче СВЧ-излучения (частота 5.8 ГГц) мощностью 1.8 кВт. При этом на расстоянии 55 м от передающего устройства мощность принятого СВЧ-сигнала составила 340 Вт [3].

Установки по передаче электрической энергии посредством СВЧ-излучения

Структура системы передачи электрической энергии включает два терминала: передающий и принимающий (рис. 1).

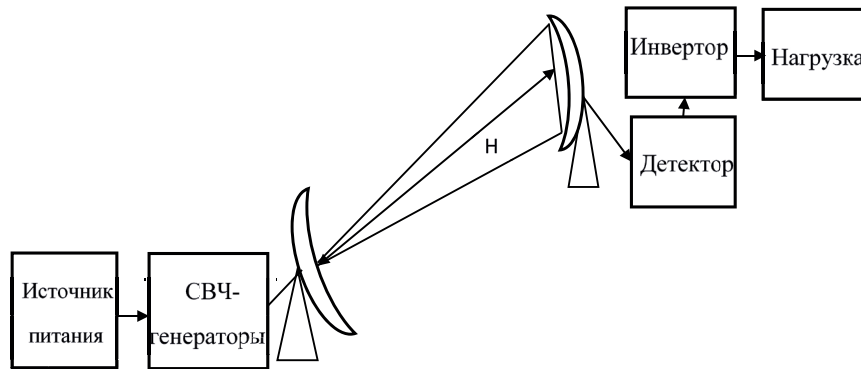


Рис. 1. Структура системы передачи электрической энергии.

С помощью первого терминала осуществляется преобразование электрической энергии первичного источника в СВЧ-излучение, с помощью второго – преобразование мощности принятого СВЧ-излучения в электрическую энергию постоянного тока, которая с помощью инвертора может быть преобразована в электрическую энергию переменного тока частотой 50 Гц. Передача и прием СВЧ-энергии осуществляется с помощью антенн параболического или иного типа.

Общий КПД установки определяется по формуле:

$$\eta = K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент преобразования энергии первичного источника в энергию СВЧ-колебаний, K_2 – коэффициент потерь, связанный непосредственно с излучением, K_3 – коэффициент преобразования СВЧ-энергии принятого сигнала в энергию постоянного тока, K_4 – КПД инвертора, преобразующего постоянный ток с переменной частотой 50 Гц. Значение общего КПД, вычисленное согласно (1), не превышает 20%.

СВЧ-генератор передающего терминала может быть электровакуумного или полупроводникового типа. В первом случае наиболее целесообразно применение магнетрона или прямопролетного клистрона, как имеющих наиболее высокий КПД (не менее 50%).

Во втором случае возможно применение СВЧ-нитрид-галлиевых или арсенид-галлиевых транзисторов, как имеющих наибольшую мощность в СВЧ-диапазоне [4]. Так, например, транзистор типа SGK5867-30A имеет мощность до 30 Вт при частоте до 6 ГГц. В случае увеличения мощности СВЧ-генератора потребуется суммирование мощностей определенного числа СВЧ-транзисторных усилителей.

Антенны обоих терминалов могут быть параболического типа или представлять собой фазированные антенные решетки.

Основные параметры антенн терминалов

Рассмотрим сначала случай с параболической антенной (рис. 2).

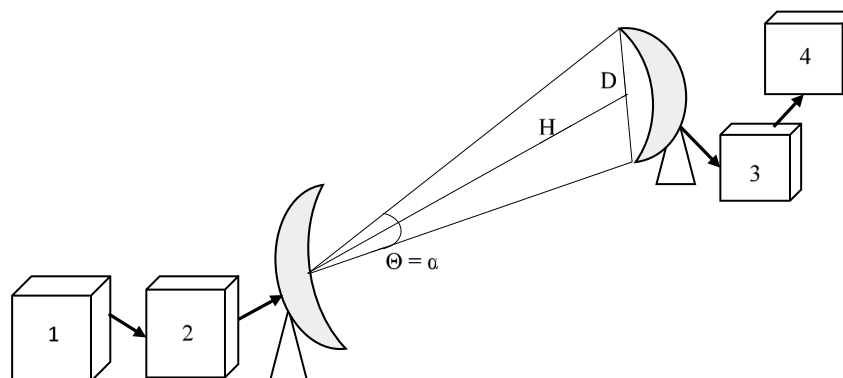


Рис. 2. Система с параболической антенной:

1 – источник питания, 2 – СВЧ-генераторы, 3 – СВЧ-детекторы, 4 – нагрузка.

Вычисления можно провести, используя формулу, связывающую основные параметры параболической антенны [5]:

$$\Theta = 57(\lambda / D), \quad (2)$$

где Θ – ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны (град), λ – длина волны (м), D – диаметр антенны (м)

$$D = \sqrt{(2/3)\lambda H}, \quad (3)$$

H – расстояние между двумя параболическими антеннами с равными диаметрами зеркала (рис. 2).

В случае применения на обоих терминалах фазированных антенных решеток одинакового типа расчет можно провести по формулам 4–7.

Согласно рис. 3 телесный угол раскрытия (в градусах) диаграммы направленности спутниковой антенны следует определить по формуле:

$$\alpha = 2 \frac{180}{\pi} \arctan(L / 2H), \quad (4)$$

где H – расстояние между антеннами (м), L – размер ФАР (м).

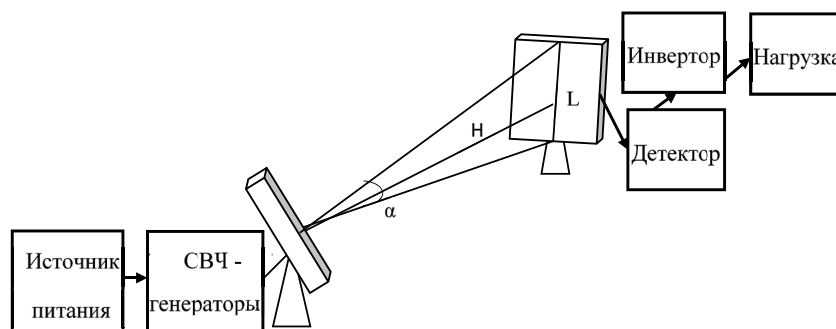


Рис. 3. Система с фазированной антенной решеткой.

Диаграмма направленности такой ФАР в одной плоскости [6,7] имеет вид:

$$E(\Theta) = U_0 \left| \frac{\sin(0,5N\beta)}{\sin(0,5\beta)} \right|, \quad (5)$$

где

$$\beta = (2\pi b / \lambda)(\sin \Theta - \sin \Theta_0), \quad (6)$$

$$\Theta_0 = \arcsin(\Delta\varphi\lambda / 2\pi b), \quad (7)$$

λ – длина волны (см); b – расстояние между двумя соседними излучателями (см); N – число излучателей в одной плоскости, $\Delta\varphi$ – разность фаз сигналов между двумя соседними излучателями.

При вертикальном луче угол $\Theta_0 = 0$ и $\Delta\varphi = 0$.

Рассчитаем по приведенным формулам параметры для обоих типов антенн при длине волны $\lambda = 5$ см (частота 6 ГГц).

Для первого варианта (параболическая антенна) при дистанции $H = 200$ м согласно (3) и (4) получим: $\Theta = 1.10$, $D = 2.58$ м.

Для второго варианта при $b/\lambda = 1$ и $N = 32$ диаграмма направленности ФАР в одной плоскости, рассчитанная по (4)–(7), приведена на рис. 4.

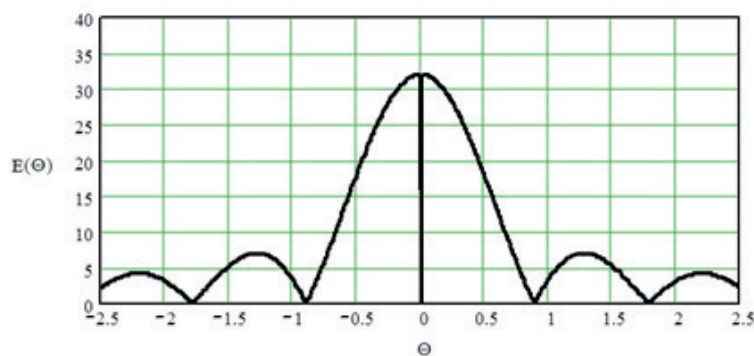


Рис. 4. Диаграмма направленности ФАР в одной плоскости.

Из данного примера следует, что ширина основного лепестка диаграммы направленности, рассчитываемой ФАР по уровню 0.71 от максимума, равна $\Theta = 10$. Общее число излучателей $N^2 = 1024$, общая площадь $S = L^2 = 10.24$ м², где сторона квадрата $L = bN = 0.1 \cdot 32 = 3.2$ м (рис. 3).

Два варианта СВЧ-генераторов

Первый вариант генератора основан на применении в передающем терминале мощного электровакуумного прибора – магнетрона или прямопролетного клистрона непрерывного типа и параболической антенны.

Второй вариант основан на применении мощных СВЧ-полевых транзисторов (их мощность не превышает 50 Вт) и ФАР. Для исключения применения множества делителей-сумматоров мощности наиболее рациональным является построение мощного СВЧ-генератора по принципу взаимной синхронизации множества СВЧ-автоге-

нераторов [9]. Структурная схема такого генератора приведена на рис. 5, в которой каждая ячейка состоит из автогенератора (транзисторного или на основе диода Ганна) и СВЧ-усилителя мощности, подключаемого к одному из излучателей ФАР.

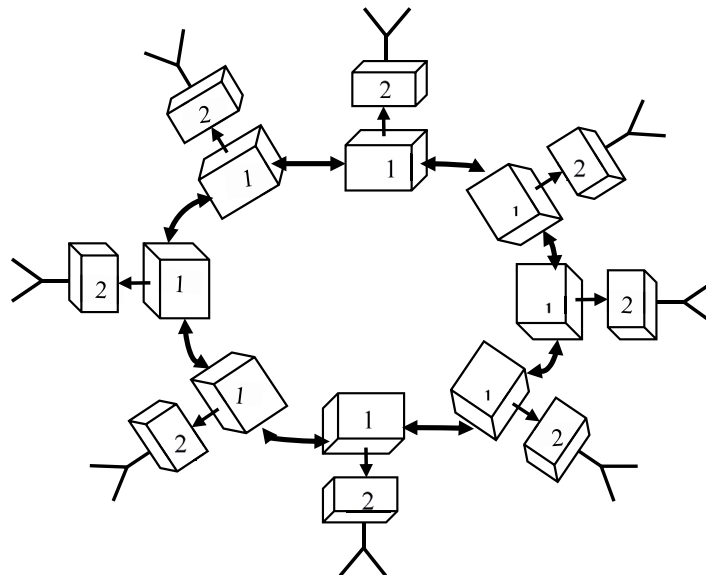


Рис. 5. Структура СВЧ-автогенераторов с взаимной синхронизацией:
1 – СВЧ-автогенераторы, 2 – СВЧ-усилители мощности.

Анализ СВЧ-генератора, основанного на принципе взаимной синхронизации множества автогенераторов приведен в [8]. В этой работе показано, что при расхождении в момент включения колебаний автогенераторов по частоте в пределах 5%, в системе устанавливается единый, одинаковый по частоте, режим работы всех автогенераторов.

Заключение

Проведенный в статье анализ может явиться основой для проектирования систем беспроводной дистанционной передачи электрической энергии не только на небольшие расстояния, но и для проектирования в будущем космических систем солнечной электроэнергетики.

Литература:

1. Каганов В.И., Буй Хыу Чык. Беспроводная передача электрической энергии с наземного терминала на квадрокоптер. *Инженерная физика*. 2019;1:34-38.
<https://doi.org/10.25791/infizik.01.2019.391>
2. Lan Sun Luk J.D., Celeste A., Romanacce P., Chane Kuang Sang L., Gatina J.C. Point-to-point wireless power transportation in Reunion Island. In: Proceedings 48th International Astronautical Congress, Turin, Italy, 6-10 October 1997. IAF-97- R.4.08
3. Ground demonstration testing of microwave wireless power transmission. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/150301.html>
4. Гаврилов В.А. Мощные нитрид-галлиевые транзисторы. *Новости электроники*. 2015;7:5-20.
5. Нефедов Е.И. Электромагнитные поля и волны. М.: Академия, 2014. 359 с. ISBN 978-5-4468-0565-5.
6. Каганов В.И. Радиоэлектронные системы автоматического управления. М.: Горячая линия - Телеком, 2009. 432 с. ISBN 978-5-9912-0058-5
7. Активные фазированные антенные решетки, под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2004. 488 с. ISBN 5-93108-045-7
8. Каганов В.И. Взаимная синхронизация как способ суммирования мощностей сверхвысокочастотных генераторов. *Радиотехника и электроника*. 2019;64(1):51-53.
<https://doi.org/10.1134/S0033849419030069>

References:

1. Kaganov W.I., Bui Huu Chuc. Wireless Transmission of Electrical Energy from the Ground Terminal to Quadrocopter. *Inzhenernaya fizika = Engineering Physics*. 2019;1:34-38 (in Russ.). <https://doi.org/10.25791/infizik.01.2019.391>
2. Lan Sun Luk J.D., Celeste A., Romanacce P., Chane Kuang Sang L., Gatina J.C. Point-to-point wireless power transportation in Reunion Island. In: Proceedings 48th International Astronautical Congress, Turin, Italy, 6-10 October 1997. IAF-97- R.4.08
3. Ground demonstration testing of microwave wireless power transmission. [Electronic resource]: URL access mode: <http://www.kenkai.jaxa.jp/eng/research/ssps/150301.html>
4. Gavrilov V.A. Powerful gallium nitride transistors. *Novosti elektroniki = Electronics News*. 2015;7:5-20.
5. Nefedov E.I. Elektromagnitnye polya i volny (Electromagnetic fields and waves). Moscow: Akademiya; 2014. 359 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4468-0565-5
6. Kaganov V.I. Radioelektronnye sistemy avtomaticheskogo upravleniya (Radio-electronic automat control systems). Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2009. 432 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0058-5
7. Aktivnye fazirovannye antennnye reshetki (Active phased array antennas). (Ed.). D.I. Voskresenskii. Moscow: Radiotekhnika; 2004. 488 p. (in Russ.). ISBN 5-93108-045-7
8. Kaganov W.I. Mutual synchronization as a method of summing the power of microwave generators. *Radiotekhnika i elektronika = Radio engineering and electronics*. 2019;64(1):51-53 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0033849419030069>

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). Scopus Author ID: 57199328762.

Буй Хыу Чык, 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. Sci. (Engineering), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Department of Radioelectronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author ID: 57199328762.

Bui Huu Chuc, Graduate Student of the Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Department of Radioelectronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 17.02.2020; получена после доработки: 29.07.2020; принята к опубликованию: 06.09.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-54-62>



УДК 621.396.677

Выбор расположения излучателей в неэквидистантной антенной решетке

Н.М. Легкий[@],
Н.В. Михеев

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

Антенны являются одним из основных элементов радиотехнических систем. Фазированные антенные решетки (ФАР), позволяющие регулировать направление излучения благодаря возможности управления фазами или разностями фаз излучаемого сигнала, являются наиболее эффективными типами антенн. Размер, конструкция и форма ФАР зависят от решаемых задач, типа излучателей и характера их расположения. В статье рассматривается преобразование эквидистантной ФАР в неэквидистантную решетку с заданным минимальным расстоянием между излучателями с целью уменьшения уровня боковых лепестков и подавления дифракционных максимумов. Приведены модель неэквидистантной антенной решетки и расчетные формулы для ее анализа. Представленная в работе методика, основанная на итерационных методах вычислений, дает возможность выбрать основные параметры неэквидистантной ФАР с учетом связей, образующихся между соседними излучающими элементами. Расчет координат расположения элементов излучателей неэквидистантной ФАР осуществлен в программе на языке MATLAB. При этом реализован метод поиска оптимального расположения излучателей относительно друг друга, при котором диаграмма направленности антенной решетки будет иметь минимальный уровень дифракционных максимумов и требуемый уровень боковых лепестков. По результатам выполнения программы получены координаты новой неэквидистантной ФАР. Смоделированная по результатам расчета неэквидистантная фазированная антенная решетка показала полное отсутствие дифракционных максимумов в отличие от эквидистантной решетки, но при этом не удалось в достаточной мере получить требуемый уровень боковых лепестков. Приведенные для сравнения расчетные диаграммы направленности антенн показали преимущества неэквидистантной антенной решетки.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, неэквидистантная антенная решетка, диаграмма направленности, синтез антенной решетки, минимаксный уровень боковых лепестков, оптимизация конструкции антенны.

Для цитирования: Легкий Н.М., Михеев Н.В. Выбор расположения излучателей в неэквидистантной антенной решетке. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):54-62. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-54-62>

Selection of location of radiators in a non-equivalent antenna array

Nikolay M. Legkiy[@],
Nikolay V. Mikheev

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

Antennas are one of the main elements of radio engineering systems. Phased antenna arrays (PAR), which make it possible to regulate the direction of radiation due to the ability to control the phases or phase differences of the emitted signal, are the most effective types of antennas. The size, design and shape of the PAR depend on the tasks to be solved, the type of emitters and the nature of their location. The article discusses the transformation of an equidistant PAR into a non-equidistant antenna array in order to reduce the level of side lobes and suppress diffraction maxima with a given minimum distance between the emitters. A model of a non-equidistant antenna array and calculation formulas for its analysis are presented. The method presented in the work based on iterative calculation methods makes it possible to select the main parameters of a non-equidistant PAR taking into account the bonds formed between neighboring radiating elements. The coordinates of the emitter elements of the non-equidistant PAR were calculated in a program using the MATLAB language. At the same time, a method was implemented to search for the optimal arrangement of emitters relative to each other, in which the directional pattern of the antenna array will have a minimum level of diffraction maxima and the required level of side lobes. According to the results of the program execution, the coordinates of the new non-equidistant PAR were obtained. The non-equidistant phased array antenna simulated according to the calculation results showed a complete absence of diffraction maxima, in contrast to the equidistant array, but it was not possible to sufficiently obtain the required level of side lobes. The calculated antenna radiation patterns presented for comparison showed the advantages of a non-equidistant antenna array.

Keywords: phased antenna array, non-equidistant antenna array, directional pattern, antenna array synthesis, minimax side lobe level, antenna design optimization.

For citation: Legkiy N.V., Mikheev N.V. Selection of location of radiators in a non-equivalent antenna array. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):54-62 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-54-62>

Введение

Возможность формирования луча с необходимой диаграммой направленности в фазированных антенных решетках (ФАР) в режиме реального времени является неоспоримым преимуществом данного типа антенн.

Различают два типа фазированных антенных решеток: с эквидистантным (равномерным) и неэквидистантным (неравномерным) расположением излучателей в поле антенны. Антенная решетка (АР) первого типа используется наиболее часто. Но некоторые недостатки таких решеток и желание улучшить характеристики АР привели к созданию и применению неэквидистантных антенных решеток. Использование АР с неравномерно расположенными излучателями позволяет решать задачи, не решаемые классическими эквидистантными АР.

Преимущества неэквидистантных антенных решеток:

- наличие только одного основного лепестка АР, что позволяет сконцентрировать энергию излучения в нужном направлении;
- уменьшение уровня боковых лепестков, что приводит к уменьшению вероятности появления ложных целей;
- уменьшение числа излучателей, и как следствие, уменьшение массы и стоимости антенны.

Качественное выполнение своих задач неэквидистантными антенными решетками полностью зависит от результатов расчета координат излучателей.

Постановка задачи

Рассмотрим формирование неэквидистантной антенной решетки на примере линейной АР с восемью изотропными излучателями (рис. 1) и расстоянием между ними d_i ($i = 1, 2, \dots, 7$), причем $d_i \neq d_{i \pm 1}$.

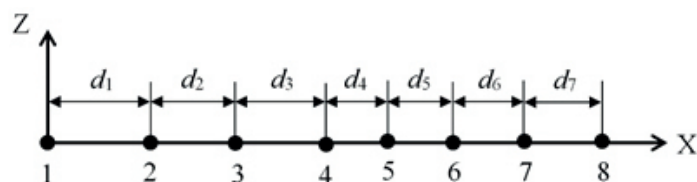


Рис. 1. Модель неэквидистантной антенной решетки.

Необходимо рассчитать d_i для $i = 1, 2, \dots, 7$, чтобы максимально возможно снизить уровни боковых лепестков и подавить дифракционные максимумы антенной решетки.

Методы исследования

Подходы к моделированию неэквидистантных антенных решеток рассмотрены в работах [3–17]. Как правило, разработка АР с заданными или специальными характеристиками направленности требует использования алгоритмов параметрического синтеза [8, 17].

Падающая электромагнитная (ЭМ) волна распространяется через передающую антенную решетку длиной $l = \sum_{i=1}^7 d_i$, составленную из $n = 8$ излучателей с периодичностью p_n . Фазу излучаемого сигнала γ_n в направлении с углом отклонения θ от основного лепестка, можно представить как

$$\gamma_n = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot p \cdot n \cdot \sin \theta = k_0 \cdot p \cdot n \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число.

Следовательно, фаза сигнала α_n в излучателе n может быть определена с помощью формулы

$$\alpha_n = -\gamma_n + \alpha_1 + 2\pi \cdot i, \quad i = 1, 2, \dots, 7, \quad (2)$$

где α_1 – фаза ЭМ волны на первом излучателе.

Направление θ излучаемой волны определяется как функция разности фаз η между смежными излучателями элементов

$$\begin{aligned} \eta = \alpha_n - \alpha_{n-1} = \gamma_n + \gamma_{n-1} &= -k_0 \cdot p \cdot n \cdot \sin \theta + k_0 \cdot p \cdot (n-1) \cdot \sin \theta = \\ &= -k_0 \cdot p \cdot \sin \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, изменяя фазу сигнала каждого излучателя на определенный угол, можно направить ЭМ волну в нужном направлении относительно нормали конструкции:

$$\eta = -k_0 \cdot p \cdot \sin \theta \Rightarrow \theta = -\sin^{-1} \left(\eta \cdot \frac{\lambda}{2\pi \cdot p} \right). \quad (4)$$

Рассмотрим задачу уменьшения уровней мощности бокового излучения.

Необходимо найти ряд d_i для i от 1 до 7, при котором диаграмма направленности (ДН) антенной решетки будет иметь требуемый уровень боковых лепестков $\zeta_{\text{бок}}$.

Известно [1, 2], что у системы с оптимальной ДН существует максимально возможное число равных по уровню боковых лепестков. В случае эквидистантной (симметричной) фазированной антенной решетки (ФАР), имеющей n излучателей, диаграмма направленности описывается следующим образом:

$$F_n \left(\frac{u}{I_n}, x_n \right) = \sum I_n \cdot \sin(x_n \cdot u),$$

где $x_n = 2d/\lambda$, $\sin(x_n \cdot u)$ – направление боковых лепестков.

Найдем оптимальное расположение излучателей для неэквидистантной антенной решетки с числом элементов $n = 8$ и заданным уровнем боковых лепестков. Для решения этой задачи будем использовать метод вариации параметров в программе на языке MATLAB.

Для этого берем произвольную эквидистантную линейную решетку с 8 излучателями и рассчитываем диаграмму направленности с N боковыми лепестками, у которых разные уровни ζ_i .

Задаем приращения координат и токов излучателей:

$$x_n \rightarrow x_n + \Delta x; \quad I_n \rightarrow I_n + \Delta I. \quad (5)$$

Следует отметить, что чем меньше приращение, тем точнее определяется координата, но вместе с тем увеличивается время обработки.

При изменении координат и токов излучателей изменятся также уровни боковых лепестков:

$$u_i \rightarrow u_i + \Delta u; \quad \zeta_i \rightarrow \zeta_i + \Delta \zeta.$$

Приращения определяются с помощью системы дифференциальных уравнений. Если параметры диаграммы направленности еще далеки от необходимых параметров, то процедура (5) повторяется до тех пор, пока уровень боковых лепестков максимально не приблизится к заданным значениям. В результате получим координаты x_n излучателей, при которых будет достигнут требуемый уровень боковых лепестков.

Предложенная и реализованная методика не учитывает взаимное влияние между соседними излучателями. Это влияние можно минимизировать, если ввести ограничения на расстояние между излучателями:

$$d_{n+1} - d_n \geq \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Рассмотрим процесс ослабления дифракционных лепестков при реализации данного метода. Сигналы двух соседних излучателей синфазно складываются сразу в нескольких направлениях θ_M , для которых справедливо равенство

$$k \cdot d \cdot \sin \theta_M - \Delta\Phi = 2\pi \cdot M, \quad M = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

где M – номер дифракционного лепестка; $\Delta\Phi$ – фазовый сдвиг между соседними излучателями; $k \cdot d \cdot \sin \theta_M$ – разность хода.

Углы максимального излучения θ_m можно найти из уравнения

$$\sin \theta_m = \frac{2\pi \cdot M + \Delta\Phi}{k \cdot d} = \frac{2\pi \cdot M}{k \cdot d} + \zeta = \frac{M \cdot \lambda}{d} + \zeta.$$

При изменении шага плоской антенной решетки d/λ направление основного максимума $\theta_0 = \arccos \xi = \frac{\Delta\Phi}{k \cdot d}$ всегда остается постоянным, направления побочных лепестков θ_M изменяются. Задав случайный шаг АР, изменяя величину фазового сдвига $\Delta\Phi$ так, чтобы уровень боковых лепестков ζ оставался неизменным, получаем различные направления дифракционных максимумов для соседних пар излучателей, что приведет к значительному уменьшению побочных лепестков по всей зоне видимости. Если при расчетах d_i придерживаться неравенства (6), то другие характеристики антенной решетки не ухудшатся. Для наиболее эффективного размещения излучателей симметричной АР можно привести расчет с нарастанием расстояния между излучателями в арифметической прогрессии:

$$d_i = d_1 \left(1 + (i-1) \frac{p_n - 1}{n-1} \right),$$

где $p_n = \frac{d_n}{d_1}$ – периодичность антенной решетки.

Определим оптимальный вариант конструкции антенной решетки для подавления дифракционных лепестков.

При отклонении луча на максимальный угол θ_m велика вероятность появления дополнительного максимума ДН. Введем еще одно ограничение на расстояние между излучателями d :

$$\frac{d_i}{\lambda} \leq \frac{n-1}{n} \cdot \frac{1}{1 + |\sin \theta_m|}.$$

Согласно [17], расстояние между излучателями в антенной решетке не должно превышать $\lambda/2$, но вместе с тем элементы АР, исходя из конструктивных особенностей, не могут располагаться относительно друг друга ближе d_{min} . Это расстояние проверяется на каждом шаге расчета антенной решетки.

Результаты исследования

Для решения задачи в качестве алгоритма используем метод перебора. Программа, реализованная на языке MATLAB, определяет координаты излучателей, удовлетворяющих заданной точности. В результате ее выполнения получаем координаты излучателей в антенной решетке, при которых формируемая ДН имеет наименьшее отклонение от необходимой. Таким образом, методом случайного поиска подбирается расположение элемента, при котором будет обеспечено подавление дифракционных максимумов. Однако в данной программе не учитывается межэлементное взаимное влияние.

Результат выполнения программы приведен на рис. 2, где указаны координаты антенных элементов при оптимальном расположении.

Xtop =							
Columns 1 through 8							
0	0.0590	0.1100	0.1970	0.2410	0.3300	0.4100	0.4820

Рис. 2. Результат выполнения программы.

Для наглядной оценки полученных результатов сравним ДН рассчитанной антенной решетки и ДН эквидистантной ФАР. На рис. 3 представлена ДН неэквидистантной антенной решетки с рассчитанным расположением антенных элементов, а на рис. 4 – ДН ФАР с равномерным расположением элементов.

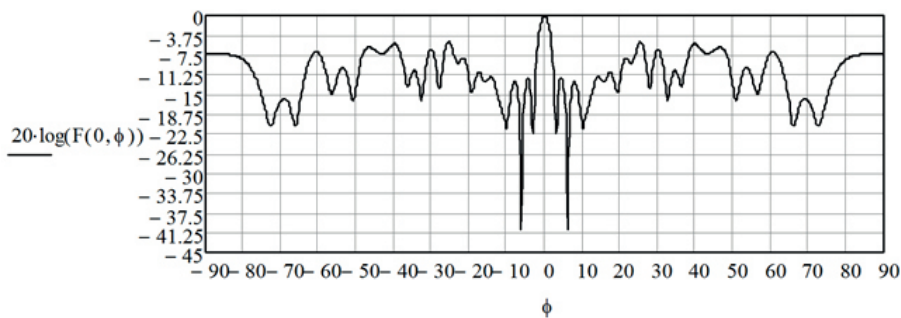


Рис. 3. ДН с рассчитанным расположением антенных элементов.

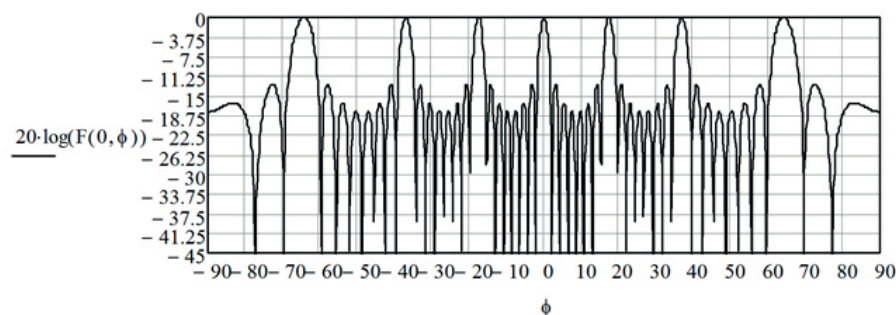


Рис. 4. ДН с эквидистантным расположением антенных элементов.

Как видно из графиков, в рассчитанной неэквидистантной антенной решетке можно полностью избавиться от дифракционных максимумов, появляющихся в эквидистантной решетке через каждые 20° , но уровень боковых лепестков недостаточно низкий. Это можно объяснить тем, что из-за физических размеров антенные элементы невозможно расположить ближе друг к другу.

Заключение

Предложенная в работе методика, основанная на итерационных методах вычислений, дает возможность выбрать основные параметры неэквидистантной ФАР с учетом образующихся между соседними излучающими элементами связей. Данная методика расчета неэквидистантной антенной решетки на языке MATLAB, в отличие от большинства имеющихся на рынке программных продуктов, достаточно проста и не требует дополнительного изучения сложных программ. Кроме того, реализация метода на языке MATLAB позволяет использовать результаты вычисления для дальнейшего расчета в других программах без дополнительного преобразования данных, что дает возможность проведения сквозной автоматизации расчетов всей системы.

Таким образом, рассмотренный подход позволяет совмещать преимущества точного моделирования отдельных СВЧ-систем ФАР в специализированных программах с программами, использующими собственные алгоритмы расчета характеристик ФАР. Полученная по предложенному методу модель антенной решетки хорошо коррелируется с результатами, полученными в других программах.

Литература:

1. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 560 с. ISBN 978-5-94836-323-3
2. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток, под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2012. 744 с. ISBN 978-5-88070-311-1
3. Гончаров В.А. Синтез антенных решеток со стабильной диаграммой направленности применительно к задачам обнаружения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012», часть 5, 3–7 декабря 2012 г. М.: МИРЭА. С. 182-187.
4. Федосеева Е.В., Тарасов А.А. Исследование метода синтеза неэквидистантной равноамплитудной антенной решетки. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2011;3:4-8.
5. Анпилов В., Эйдус А. Неэквидистантная антенная решетка с низким уровнем боковых лепестков. *Технологии и средства связи*. 2017;2(119):40-43.
6. Жуков В.Б. Синтез неэквидистантной гидроакустической антенной решетки. *Гидроакустика*. 2016;28(4):5-9.
7. Березин А.В., Виноградов А.Д., Михин А.Ю., Никитенко Е.П. Способы построения и параметры широкодиапазонных пеленгаторных неэквидистантных линейных антенных решеток. *Антенны*. 2018;5(249):21-30.
8. Кирпичева И.А. Уменьшение уровня бокового излучения в равноамплитудных антенных решетках при сохранении направленных свойств. В сборнике: Физико-математическое моделирование систем. Материалы XVIII Международного семинара. Часть 2. 2018. С. 54-59.
9. Костин М.С., Латышев К.В., Марков Д.В. Мобильный комплекс радиолокационного мониторинга на синхронизированной системе БПЛА. В сборнике: Радиолокация и связь – перспективные технологии. Материалы XVI Всероссийской молодежной научно-технической конференции. 2018. С. 32-37.
10. Тюбаев А.Н., Маничев А.О. Эффективные методы расширения луча неэквидистантной спиральной фазированной антенной решетки. *Антенны*. 2013;1(188):051-056.
11. Останков А.В., Кирпичёва И.А. Оптимизация направленных свойств линейных неэквидистантных антенных решеток. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2013;9(4):8-11
12. Останков А.В., Антипов С.А., Сахаров Ю.С. Минимаксный уровень бокового излучения равноамплитудной неэквидистантной антенной решетки. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2013;9(6-3):10-12.

13. Шкодина А.П. Применение методов углового сверхразрешения в неэквидистантной линейной антенной решетке пассивного радиолокатора. *Молодежный научно-технический вестник*. 2014;10:1.
URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/737417.html>
14. Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Якубов В.П., Цепляев И.С., Юрченко А.В. Планарная неэквидистантная тактированная сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии. *Контроль. Диагностика*. 2013;13:45-49.
15. Lutsenko V.I., Popov I.V., Lutsenko I.V., Luo Y., Mazurenko A.V. Nonequidistant two-dimensional antenna arrays are based on magic squares. In: 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW): Proc. Kharkov, Ukraine, 21–24 June 2016.
<https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538080>
16. Shabunin S., Chechetkin V.A., Klygach D., Ershov A. Non-equidistant antenna array with low level of side lobes. In: 2016 IEEE 6th International Conference on Communications and Electronics (ICCE). *IEEE ICCE* 2016. P. 230-233.
<https://doi.org/10.1109/CCE.2016.7562641>
17. Skiena S.S. The Algorithm design manual. Springer Publishing Company; 2008. 752 p.

References:

1. Hansen R.S. *Fazirovannyye antennnye reshetki* (Phased antenna arrays). Moscow: Tekhnosfera; 2012. 560 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-323-3
[Hansen R.S. Phased antenna arrays. New York: Wiley; 2009. 550 p.]
2. *Ustroystva SVCh i anteny. Proektirovaniye fazirovannykh antennnykh reshetok* (Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays, ed. D.I. Voskresensky. Moscow: Radiotekhnika; 2012. 744 p. (in Russ.). ISBN 978-5-88070-311-1
3. Goncharov V.A. Synthesis of antenna arrays with a stable directional diagram for detection problems. In: Proc. of the International Scientific and Technical Conference «INTERMATIC–2012», part 5, 3 - 7 December 2012. Moscow: MIREA Publishing House. P. 182-187 (in Russ.).
4. Fedoseeva E.V., Tarasov A.A. Research of a method of synthesis unequally spaced and with identical amplitude antenna arrays. *Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye system = Radio and telecommunication systems*. 2011;3:4-8 (in Russ.).
5. Anpilogov V., Eidus A. A non-equidistant antenna array with a low level of side lobes. *Tehnologii i sredstva svyazi = Communication technologies & equipment*. 2017;2(119):40-43 (in Russ.).
6. Zhukov V.B. Synthesis of tapered sonar array. *Gidroakustika = Hydroacoustics*. 2016;28(4):5-9 (in Russ.).
7. Berezin A.V., Vinogradov A.D., Mikhin A.Yu., Nikitenko E.P. Methods of construction and parameters of wideband direction finding density tapered liner antenna array. *Antenny = Antennas*. 2018;5(249):21-30 (in Russ.).
8. Kirpicheva I.A. Decrease of side radiation level in equally amplitude antenna array direction characteristics. In: Physical and mathematical modeling of systems. Proc. of the XVIII International Seminar. V. 2. 2018. P. 54-59 (in Russ.).
9. Kostin M.S., Latyshev K.V., Markov D.V. Mobile complex for radar monitoring on a synchronized UAV system. In: Radar and communication – promising technologies. Proc. of the XVI All-Russian youth scientific and technical conference. 2018. P. 32-37 (in Russ.).
10. Tyuvaev A.N., Manichev A.O. Effective methods of beam expansion to a non-equidistant spiral phased antenna array. *Antenny = Antennas*. 2013;1(188):051-056 (in Russ.).
11. Ostankov A.V., Kirpicheva I.A. Optimization of directional properties of linear non-equidistant antenna arrays. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2013;9(4):8-11 (in Russ.).
12. Ostankov A.V., Antipov S.A., Sakharov Yu.S. Minimax level of side radiation of the non-equidistant antenna array with the uniform amplitude distribution. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2013;9(6-3):10-12 (in Russ.).
13. Shkodina A.P. Application of angular superresolution methods in a non-equidistant linear antenna array of a passive radar. *Molodezhnyi nauchno-tehnicheskii vestnik*. 2014;10:1 (in Russ.).
URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/737417.html>
14. Shipilov S.E., Satarov R.N., Yakubov V.P., Tseplyaev I.S., Yurchenko A.V. Planar non-equidistant UWB clocked liner antenna array for radio tomography. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2013;13:45-49 (in Russ.).
15. Lutsenko V.I., Popov I.V., Lutsenko I.V., Luo Y., Mazurenko A.V. Nonequidistant two-dimensional antenna arrays are based on magic squares. In: 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW): Proc. Kharkov, Ukraine, 21–24 June 2016.
<https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538080>
16. Shabunin S., Chechetkin V.A., Klygach D., Ershov A. Non-equidistant antenna array with low level of side lobes. In: 2016 IEEE 6th International Conference on Communications and Electronics (ICCE). *IEEE ICCE* 2016. P. 230-233.
<https://doi.org/10.1109/CCE.2016.7562641>
17. Skiena S.S. The Algorithm design manual. Springer Publishing Company; 2008. 752 p.

Об авторах:

Легкий Николай Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной экологии техносферы Института радиотехнических и телекоммуникационных ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus AuthorId 56178415900. <https://orcid.org/0000-0003-1242-5113>

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

About the authors:

Nikolay M. Legkiy, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Environmental Engineering, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia). Scopus AuthorId 56178415900. <https://orcid.org/0000-0003-1242-5113>

Nikolay V. Mikheev, Postgraduate Student, Department of Radio-Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Поступила: 18.12.2019; получена после доработки: 12.08.2020; принята к опубликованию: 12.09.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>



УДК 621.391

Оптимизация характеристик цифровых фильтров одновременно в частотной и временной областях

А.В. Смирнов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

Широко используемый метод проектирования цифровых фильтров состоит в преобразовании аналогового фильтра-прототипа с требуемыми характеристиками в цифровой. Этот метод применим, если в результате преобразования сохраняется оптимальность характеристик фильтра по выбранной совокупности показателей качества (ПК). Ранее было показано, что такое возможно при одновременной оптимизации амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазочастотной характеристики (ФЧХ). Представляет интерес также одновременная оптимизация АЧХ и переходной характеристики (ПХ) цифровых фильтров. Другой возможный метод решения этой задачи – прямой поиск оптимальной по АЧХ и ПХ передаточной функции (ПФн) цифрового фильтра. Для исследования возможностей первого метода был выполнен поиск ПФн аналоговых фильтров, Парето-оптимальных по длительностям нарастания и установления переходного процесса при выполнении ограничений на другие показатели АЧХ и ПХ. Затем эти фильтры были преобразованы в цифровые с помощью билинейного преобразования и преобразования методом инвариантности импульсной характеристики. Далее был осуществлен поиск ПФн цифровых фильтров оптимальных по тем же ПК. В обоих случаях поиск проводился в пространстве координат полюсов и нулей ПФн с применением гибридного эвристического алгоритма. Результаты исследования показали, что поиск позволил получить цифровые фильтры, превосходящие по совокупности ПК фильтры, полученные путем преобразования аналоговых фильтров-прототипов. Следовательно, указанные методы преобразования не сохраняют Парето-оптимальность фильтров по АЧХ и ПХ, и для получения оптимальных по этим характеристикам

цифровых фильтров следует применять поиск их ПФн. Кроме того, аналоговые фильтры, полученные путем обратного билинейного преобразования найденных цифровых фильтров, в ряде случаев превосходят по тем же ПК аналоговые фильтры, полученные путем поиска. В таких случаях целесообразно применение цифровых фильтров-прототипов при проектировании аналоговых фильтров.

Ключевые слова: цифровой фильтр, фильтр-прототип, билинейное преобразование, инвариантность импульсной характеристики, амплитудно-частотная характеристика, переходная характеристика, Парето-оптимальность.

Для цитирования: Смирнов А.В. Оптимизация характеристик цифровых фильтров одновременно в частотной и временной областях. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):63-77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>

Optimization of digital filters performances simultaneously in frequency and time domains

Alexander V. Smirnov

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

Wide used method of digital filters design consists in transformation of analog filter-prototype with required performances into digital filter. This method is applicable if the transformation preserves optimality of filter performances under specified set of quality indexes (QI). It was denoted earlier that such situation is possible when gain-frequency response (GFR) and phase-frequency response are optimized simultaneously. The task of simultaneous optimization of digital filters GFR and step response (SR) is also important but yet a little explored. Alternative method of this problem solving consists in search of digital filter transfer function (TF) which is optimal under GFR and SR QI's. To investigate capabilities of the first method we found examples of analog filters Pareto-optimal under rise time and transient duration. Other QI's of these filters fulfilled specified constraints. Then these filters were transformed into digital filters. Bilinear transformation and transformation with invariant impulse response were applied. Further we did the search of digital filters optimal under the same set of QI's. In either method the hybrid heuristic algorithm was applied for search optimal solutions in the space of TF poles and zeroes coordinates. The results of investigation demonstrated that digital filters developed via search are superiorly under specified set of QI's then digital filters developed via transformation of analog filters. Accordingly Pareto-optimality for QI of GFR and SR is not preserved during such transformation and direct search must be applied to optimized digital filters simultaneously in frequency and time domains. Further in some cases analog filters developed via reverse bilinear transformation of the found optimal digital filters are superiorly under the same set of QI's then analog filters developed using search. In such cases using of digital filter-prototypes for design of analog filters is practical.

Keywords: digital filter, filter-prototype, bilinear transformation, impulse response invariance, gain-frequency response, step response, Pareto-optimality.

For citation: Smirnov A.V. Optimization of digital filters performances simultaneously in frequency and time domains. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(6):63-77 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-63-77>

Введение

Цифровые фильтры находят широкое применение в радиотехнических и телекоммуникационных системах. Свойства цифровых фильтров, как и аналоговых, в частотной области описываются амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и фазочастотной характеристикой (ФЧХ) или частотной характеристикой времени задержки (ЧХЗ). Во временной области используют импульсную характеристику (ИХ) и переходную характеристику (ПХ). Все эти характеристики могут быть получены из комплексной передаточной функции (ПФн) [1, 2].

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^{NZ} b_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^{NP} a_k z^{-k}} = K_0 \frac{\prod_{k=1}^{NZ} (1 - z_k z^{-1})}{\prod_{k=1}^{NP} (1 - p_k z^{-1})}, \quad (1)$$

где z – комплексная переменная; a_k, b_k, K_0 – действительные коэффициенты; z_k, p_k – комплексные координаты нулей и полюсов ПФн; NP – порядок фильтра; NZ – число нулей ПФн.

Характеристики цифрового фильтра оцениваются различными показателями качества (ПК). При проектировании фильтра стремятся оптимизировать какие-либо ПК, выбор которых зависит от назначения фильтра.

Стандартный метод проектирования цифровых фильтров основан на использовании аналоговых фильтров-прототипов, в качестве которых применяются фильтры нижних частот (ФНЧ), имеющие АЧХ, оптимальные по каким-либо ПК. К ним относятся фильтры Баттерворта, Чебышева и эллиптические. Из фильтров-прототипов посредством преобразования комплексного аргумента ПФн получают цифровые фильтры требуемого типа и с заданными параметрами АЧХ [1, 2]. Реализация стандартного метода обеспечена наличием обширной справочной и учебной литературы, а также программного обеспечения.

Задача оптимизации характеристик радиотехнических устройств, в том числе и линейных фильтров, является, как правило, многокритериальной, и ее решением должно быть множество Парето-оптимальных по выбранной совокупности ПК решений [3, 4], то есть таких решений, которые нельзя улучшить ни по одному из показателей этой совокупности, не ухудшая при этом хотя бы один из остальных. Далее под оптимальностью везде понимается именно оптимальность по Парето.

Представляет теоретический и практический интерес задача проектирования фильтров, оптимальных по ПК двух или более характеристик частотной и временной областей. Оптимизации аналоговых и цифровых фильтров одновременно по АЧХ и ФЧХ с применением различных численных методов посвящено большое число публикаций, например, [4–8]. Вопрос о возможности применения метода фильтров-прототипов для получения оптимальных по этим характеристикам аппроксимаций ПФн был исследован в работе [9]. При этом были определены условия сохранения такой оптимальности при билинейном преобразовании аналогового ФНЧ в цифровой и при преобразовании Константиноидиса цифрового ФНЧ в цифровой ФНЧ с другим значением верхней граничной частоты полосы пропускания.

Значительно меньше публикаций связано с решением задачи оптимизации характеристик фильтров одновременно в частотной и временной областях. В работе [10] изложен метод решения указанной задачи для аналоговых фильтров с применением эвристического алгоритма поиска экстремумов целевой функции. Продемонстрировано получение множеств Парето-оптимальных аппроксимаций ФНЧ, среди которых есть превосходящие по совокупности ПК фильтры Бесселя и Баттерворта. Однако цифровые фильтры в этой работе не рассматривались. Прямой перенос результатов, полученных для аналоговых фильтров, на цифровые, очевидно, невозможен в силу дискретности процессов в последних.

В работе [11] осуществлялась оптимизация цифровых фильтров по шести ПК, один из которых – взвешенная частичная энергия ИХ (weighted partial energy of the impulse response). Максимизация этого показателя приводит к концентрации энергии в начале переходного процесса, что обеспечивает минимизацию длительности задержки, вносимой фильтром. Другие ПК, относящиеся к временной области, в этой работе не учитываются. Это не дает возможности оптимизировать длительность переходного процесса, которая оказывает существенное влияние на искажения формы сигналов, создаваемые фильтрами. Другие работы по оптимизации цифровых фильтров одновременно в частотной и временной областях автору не известны.

Актуальность задачи оптимизации цифровых ФНЧ по совокупности ПК, характеризующих АЧХ и ПХ, обусловлена тем, что ПХ в наибольшей степени влияет на искажения формы сигнала и межсимвольные искажения в системах передачи информации. В то же время необходимо выполнять требования к АЧХ в полосе задерживания, чтобы предотвратить межканальные помехи. Один из возможных путей решения данной задачи состоит в поиске оптимальных по этим характеристикам аналоговых фильтров-прототипов и последующем преобразовании их в цифровые фильтры. Другой вариант – непосредственное осуществление поиска оптимальных цифровых фильтров. Первый метод позволяет унифицировать методики проектирования аналоговых и цифровых фильтров, но его применимость требует проверки, так как вопрос о сохранении оптимальности одновременно по АЧХ и ПХ при преобразованиях аналоговых фильтров в цифровые не исследован. Второй метод требует разработки алгоритма поиска оптимальных аппроксимаций ПФн цифровых фильтров.

Цель данной работы – реализовать два указанных метода решения задачи одновременной оптимизации ПХ и АЧХ цифровых фильтров, сравнить получаемые с их помощью результаты и сделать выводы о возможностях использования этих методов.

Методы исследования

Предметом исследования в данной работе являются ФНЧ. Фильтры этого типа применяются для ограничения полосы частот сигналов в системах передачи информации, и для них необходимо выполнять требования как к АЧХ, так и к ПХ.

В первую очередь определим ПК, по которым будем оптимизировать характеристики фильтров. В работе [10] были даны определения показателей, оценивающих качество указанных характеристик аналоговых фильтров. Определения, относящиеся к АЧХ, могут быть применены и к цифровым фильтрам. Отличие заключается только в использова-

нии шкалы частот, нормированной к частоте дискретизации $F \in [0, 0.5]$. Из числа этих ПК далее используются следующие:

– минимальное ослабление в полосе задерживания, выраженное в дБ;

$$H_s = -20 \lg(\max(K(F))), \quad F_s \leq F \leq 0.5, \quad (2)$$

где $K(F)$ – АЧХ фильтра, F_s – нижняя граничная частота полосы задерживания;

– максимальное превышение АЧХ над заданным уровнем $K_i(F)$ в полосе перехода между полосами пропускания и задерживания;

$$DH_t = \max\left(\frac{K(F)}{K_i(F)}, 0\right), \quad F_p \leq F \leq F_s, \quad (3)$$

где F_p – верхняя граничная частота полосы пропускания.

При расчете и оценке качества переходного процесса в цифровом фильтре необходимо исходить из дискретной шкалы времени, в которой за единицу принят период дискретизации [12]. Определения ПК во временной области поясняются примером на рис. 1, где ПХ $g(n)$ нормирована к установившемуся значению, а нумерация ее отсчетов начинается с нуля.

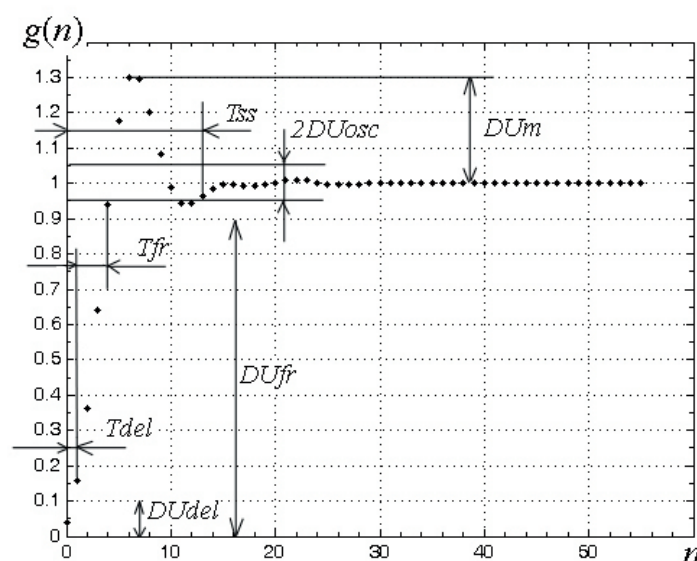


Рис. 1. Определение показателей качества переходной характеристики цифрового фильтра.

Максимальный выброс DU_m равен разности максимума и установившегося значения ПХ. Длительность задержки T_{del} определена как номер первого отсчета $g(n)$, оказавшегося выше порога DU_{del} . Длительность фронта равна разности номера первого отсчета $g(n)$, оказавшегося выше порога DU_{fr} и значения T_{del} . Длительность установления переходного процесса T_{ss} (steady state) определяется как номер первого отсчета, начиная с которого все отсчеты отличаются от установившегося значения ПХ не более, чем на DU_{osc} .

Определенные таким образом величины длительностей являются целочисленными. Их использование затрудняет поиск оптимальных решений, так как в процессе поиска целевая функция изменяется скачками, в промежутках между которыми остается неизменной. Для устранения этого недостатка в данной работе применялись интерполирован-

ные длительности. Интерполяция проводится между отсчетом, входящим в определение дискретного ПК, и предыдущим отсчетом. Интерполированная длительность задержки определяется как

$$T_{deli} = T_{del} - 1 + \frac{DU_{del} - g(T_{del} - 1)}{g(T_{del}) - g(T_{del} - 1)}. \quad (4)$$

Длительность фронта:

$$T_{fri} = T_{fr} - 1 + \frac{DU_{fr} - g(T_{del} + T_{fr} - 1)}{g(T_{del} + T_{fr}) - g(T_{del} + T_{fr} - 1)} + T_{del} - T_{deli}. \quad (5)$$

Длительность установления переходного процесса:

$$T_{ssi} = \begin{cases} T_{ss} - 1 + \frac{g(T_{ss} - 1) - 1 - DU_{osc}}{g(T_{ss} - 1) - g(T_{ss})} & \text{при } g(T_{ss} - 1) > 1; \\ T_{ss} - 1 + \frac{1 - DU_{osc} - g(T_{ss} - 1)}{g(T_{ss}) - g(T_{ss} - 1)} & \text{при } g(T_{ss} - 1) < 1. \end{cases} \quad (6)$$

Поиск оптимальных по АЧХ и ПХ аналоговых ФНЧ-прототипов проводился с применением программы SOFTD, описанной в работе [10]. При этом использовалась нормированная шкала частот, на которой $F_{pa} = 1$ (символ a показывает, что это параметр аналогового фильтра), а F_{sa} – задаваемое значение, например, $F_{sa} = 2$. Результатом поиска являются координаты полюсов и нулей, обеспечивающих минимальное значение целевой функции при заданной совокупности ПК. Для получения цифровых ФНЧ из аналоговых фильтров-прототипов применялись методы билинейного преобразования и инвариантности ИХ [2].

При выполнении билинейного преобразования задаются фиксированное значение частоты дискретизации, например, $f_d = 1$ и нормированное к частоте дискретизации значение нижней границы полосы задерживания цифрового ФНЧ F_s . Затем с использованием формулы обратного билинейного преобразования рассчитывается значение соответствующей аналоговой частоты

$$F^*sa = 2f_d \cdot \operatorname{tg}(\pi \cdot F_s). \quad (7)$$

Далее проводится денормирование аналогового ФНЧ-прототипа путем умножения координат полюсов и нулей его ПФн на коэффициент денормирования

$$K_{\text{дн}} = \frac{F^*sa}{F_{sa}} \quad (8)$$

и последующего расчета коэффициентов многочленов числителя и знаменателя ПФн. Наконец, выполняется билинейное преобразование ПФн денормированного фильтрапрототипа в ПФн цифрового фильтра путем замены комплексной переменной p в соответствии с равенством [2]:

$$p = 2f_d \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}. \quad (9)$$

При преобразовании методом инвариантности ИХ последовательность действий аналогичная. Отличие состоит в том, что частота среза нормированного аналогового ФНЧ-прототипа определяется равенством:

$$F^*sa = Fs. \quad (10)$$

Денормирование фильтра-прототипа выполняется так же, как и в случае билинейного преобразования. ПФн цифрового фильтра при использовании метода инвариантности ИХ получается в виде [2]:

$$H(z) = \sum_{k=1}^{NP} \frac{C_k}{1 - \exp\left(\frac{p_{ak}}{f_d}\right) z^{-1}}, \quad (11)$$

где p_{ak} – полюса ПФн аналогового фильтра, C_k – коэффициенты в разложении этой ПФн на простые дроби вида $\frac{C_k}{p - p_{ak}}$.

Для реализации обоих методов преобразования и последующего расчета ПК цифрового фильтра были написаны программы в среде Matlab. Сами преобразования выполнялись с помощью функций `bilinear(..)` и `impinvar(..)` из модуля `Signal Processing Toolbox`. АЧХ и ПХ цифровых фильтров рассчитывались с применением функций, соответственно, `freqz(..)` и `stepz(..)`. Вычисление ПК производилось в соответствии с соотношениями (2) – (6).

Отметим, что в результате денормирования ПФн аналогового ФНЧ-прототипа его АЧХ растягивается по оси частот в $K_{\text{дн}}$ раз, а ПХ во столько же раз сжимается по оси времени. При этом минимальное ослабление в полосе задерживания Hz и нормированное значение выброса DUm не изменяются, а отношения «больше-меньше» между выражаемыми длительностями интервалов времени ПК разных фильтров сохраняются. Как было показано в [9], преобразование с такими свойствами сохраняет Парето-оптимальность по совокупности этих ПК. В то же время сами билинейное преобразование и преобразование методом инвариантности ИХ могут и не обладать необходимыми для сохранения Парето-оптимальности свойствами.

Далее рассмотрим разработанный метод поиска оптимальных цифровых ФНЧ. Поиск осуществляется в пространстве координат полюсов и нулей ПФн (1). При этом для обеспечения устойчивости цифрового фильтра на координаты полюсов наложено ограничение $|p_k| < 1$. На координаты нулей ограничений нет. Используется гибридный эвристический алгоритм, в основном подобный алгоритмам, описанным ранее в работе [10] и других публикациях автора. Сущность алгоритма – многократное выполнение локального поиска (мульти-старт) с применением различных вариантов выбора стартовой точки.

Минимизируемая целевая функция имеет вид:

$$GF = \sum_{k=1}^N \left(W_k^+ \cdot \frac{(Q_k - Q_{kt})}{Q_{kt}^{q_k}} \cdot S(Q_k - Q_{kt}) + W_k^- \cdot \frac{(Q_k - Q_{kt})}{Q_{kt}^{q_k}} \cdot S(Q_{kt} - Q_k) \right). \quad (12)$$

Здесь N – число ПК; Q_k и Q_{kt} – текущее и целевое (target) значения k -того ПК; W_k^+ и W_k^- – весовые коэффициенты k -того ПК для отклонений вверх и вниз от целевого значения. Пороговая функция $S(x) = 0$ при $x \leq 0$ и $S(x) = 1$ при $x > 0$. Показатель степени $q_k = 1$, если необходимо нормировать отклонение ПК от целевого значения для приведения слагаемых в (12) к одному диапазону величин. Показатель степени $q_k = 0$, если такая нормировка не требуется.

Алгоритм поиска был реализован в виде программы HODF (Heuristic Optimization of Digital Filters), написанной в системе Borland C++ Builder. На рис. 2 приведен фрагмент окна этой программы с перечнем ПК. Обозначения некоторых из них отличаются от использованных в равенствах (2) – (6). Кроме того, есть ряд ПК, не учитывавшихся в данной работе и поэтому здесь не упомянутых.

N	Name	Sel	St	W+	W-	S	WObj
1	DHpmx	*	1.00	0.0	0.0	3.391	0.000
2	Hsmx	*	40.00	0.0	1000.0	40.039	0.000
3	DTdmx		10.00	0.0	0.0		
4	DHtmx	*	0.00	100.0	0.0	0.000	0.000
5	Tdel	*	0.00	0.0	0.0	0.000	0.000
6	Tfr	*	5.00	300.0	0.0	4.913	0.000
7	DUmX	*	0.10	1000.0	0.0	0.099	0.000
8	Tosc		1.00	0.0	0.0		
9	Tss	*	8.00	1.0	0.0	11.369	3.369
10	TUmX		0.00	0.0	0.0		
11	Teq		0.00	0.0	0.0		
12	QIE		0.00	0.0	0.0		

Рис. 2. Фрагмент окна программы.

В столбце «Sel» звездочками указаны ПК, значения которых рассчитываются. В столбце «St» даны целевые значения, в столбцах «W+» и «W-» – весовые коэффициенты, в столбце S – значение, полученное в результате поиска, в столбце WObj – значение вклада данного ПК в значение целевой функции (12).

После задания набора ПК, их целевых значений, весовых коэффициентов, количеств полюсов и нулей программа выполняет поиск координат полюсов и нулей ПФн, при которых достигается глобальный или близкий к глобальному минимум целевой функции. Найденное решение отображается в таблице и может экспортироваться в Excel и другие программы. Получаемые характеристики выводятся в виде графиков.

Для сравнения результатов поиска оптимальных по АЧХ и ПХ аналоговых и цифровых фильтров выполняется обратное билинейное преобразование цифрового фильтра в аналоговый. При этом значения p_{ak} полюсов ПФн аналогового фильтра рассчитываются по формуле

$$p_{ak} = 2f_d \frac{p_k - 1}{p_k + 1}, \quad (13)$$

где p_k , $k = 1, \dots, NP$ – значения полюсов цифрового фильтра. Аналогично рассчитываются значения нулей аналогового фильтра. Затем его ПФн приводится к нормированной шкале частоты путем деления значений полюсов и нулей на коэффициент денормирования, рас-

считываемый по соотношениям (7) и (8). Программа, выполняющая обратное преобразование и последующий расчет ПК аналогового фильтра, была реализована в среде Matlab.

В заключении раздела отметим, что возможно множество вариантов постановки задачи оптимизации фильтра по АЧХ и ПХ, различающихся выбором оптимизируемых ПК и накладываемых на остальные ПК ограничений. Кроме того, можно варьировать параметры фильтра: количество полюсов и нулей, нижнюю граничную частоту полосы задерживания. Также могут изменяться пороговые уровни, по которым определяются значения длительностей участков переходного процесса. Для получения ответа, охватывающего все возможные варианты, необходимо решить задачу в общем виде. Такое решение пока найти не удалось. Поэтому использован эмпирический подход, основанный на рассмотрении конкретных примеров. В связи с ограниченным объемом статьи здесь приведена одна группа примеров. Полученные результаты являются типичными для большого числа других примеров, хотя утверждать, что они универсальны, нельзя.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментального исследования выполнялись поиск оптимальных по АЧХ и ПХ аппроксимаций аналоговых фильтров-прототипов, преобразование найденных решений в цифровые фильтры, поиск оптимальных по тем же ПК цифровых фильтров, преобразование их в аналоговые фильтры и сравнение результатов для цифровых и аналоговых фильтров, полученных посредством поиска и преобразования. Рассматривались ФНЧ 4-го порядка.

Пороговые уровни для расчета ПК во временной области были установлены равными $DU_{del} = 0.01$; $DU_{fr} = 0.9$; $DU_{osc} = 0.01$. Значения нормированной нижней граничной частоты полосы задерживания были равны $F_{sa} = 2$ для аналогового фильтра и $F_s = 0.2$ для цифрового. Как для аналоговых, так и для цифровых фильтров задавались ограничения

$$H_s \geq 40 \text{ дБ}; DH_t \leq 0; DU_m \leq 0.1. \quad (14)$$

Сразу необходимо отметить, что в результате преобразования методом инвариантности ИХ, во-первых, во многих случаях нарушалось выполнение заданного ограничения на АЧХ в полосе задерживания; во-вторых, ПК во временной области для цифрового фильтра, полученного путем такого преобразования оказывались несколько хуже, чем для фильтра, полученного из того же прототипа с помощью билинейного преобразования. Поэтому далее результаты применения метода инвариантности ИХ не излагаются.

Для аналоговых фильтров-прототипов исследовались два случая: $NZ = 0$ и $NZ = 4$. В обоих случаях билинейное преобразование дает цифровые фильтры с $NZ = 4$, но при $NZ = 0$ выполняется равенство

$$z_k = -1, \quad k = 1, \dots, NZ. \quad (15)$$

С учетом этого факта для цифровых фильтров поиск выполнялся при $NZ = 4$ по двум вариантам. В первом варианте координаты нулей задавались равенством (15), а во втором – могли принимать произвольные значения. При обратном билинейном преобразовании цифрового фильтра в аналоговый в первом варианте ПФн аналогового фильтра не имеет нулей, а во втором – имеет 4 нуля.

В экспериментах осуществлялся поиск решений, являющихся точками двумерного среза фронта Парето в многомерном пространстве ПК, в виде зависимости длительности установления переходного процесса T_{ss} от длительности нарастания T_{fr} . Для цифровых фильтров использовались интерполированные значения T_{fri} (5) и T_{ssi} (6). Поиск Парето-оптимальных решений проводился путем последовательного задания целевых значений T_{fr} и минимизации значения T_{ss} при выполнении ограничений (14). При этом весовые коэффициенты всех фиксируемых ПК в (12) устанавливались на 2–3 порядка больше, чем для T_{ss} , как это видно на рис. 2. Для каждой точки поиск выполнялся не менее трех раз при количестве стартов локального поиска равном 1000, и отбирался лучший результат.

Ниже приведены множества Парето-оптимальных решений для четырех случаев: аналоговые фильтры с $NZ = 0$ (рис. 3), аналоговые фильтры с $NZ = 4$ (рис. 4), цифровые фильтры с $NZ = 4$ при выполнении равенства (15) (рис. 5), цифровые фильтры с $NZ = 4$ и произвольным расположением нулей ПФн (рис. 6). Найденные решения представлены сериями точек «Поиск». Единица измерения времени для аналоговых фильтров соответствует нормированной шкале частоты. Единицей времени для цифровых фильтров является период отсчетов.

На тех же графиках в виде серий точек «Преобр.» приведены результаты преобразований найденных оптимальных решений в фильтры другого типа. На рис. 3 показаны результаты обратного билинейного преобразования цифровых фильтров с $NZ = 4$ при условии (15), на рис. 4 – результаты обратного билинейного преобразования цифровых фильтров с $NZ = 4$ и произвольным расположением нулей, на рис. 5 – результаты билинейного преобразования аналоговых фильтров с $NZ = 0$, на рис. 6 – результаты билинейного преобразования аналоговых фильтров с $NZ = 4$. Если в результате преобразования нарушались ограничения (14), то такая точка исключалась. Такая ситуация имела место для нескольких случаев билинейного преобразования, но не встречалась при обратном билинейном преобразовании.

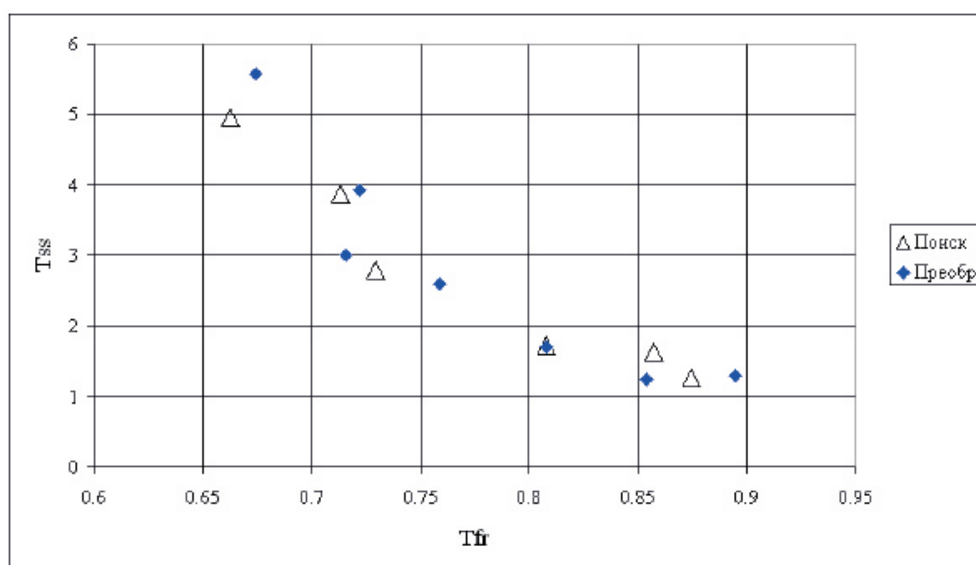


Рис. 3. Результаты для аналоговых фильтров с $NZ = 0$.

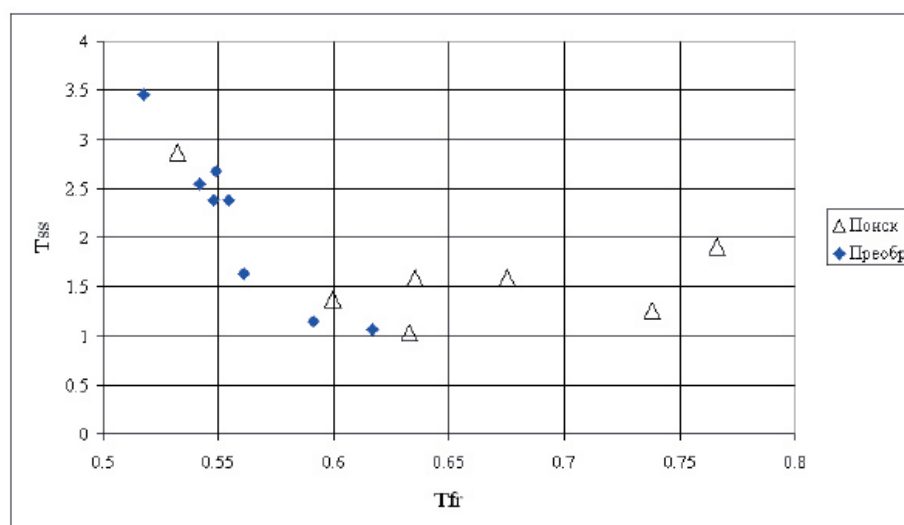


Рис. 4. Результаты для аналоговых фильтров с $NZ = 4$.

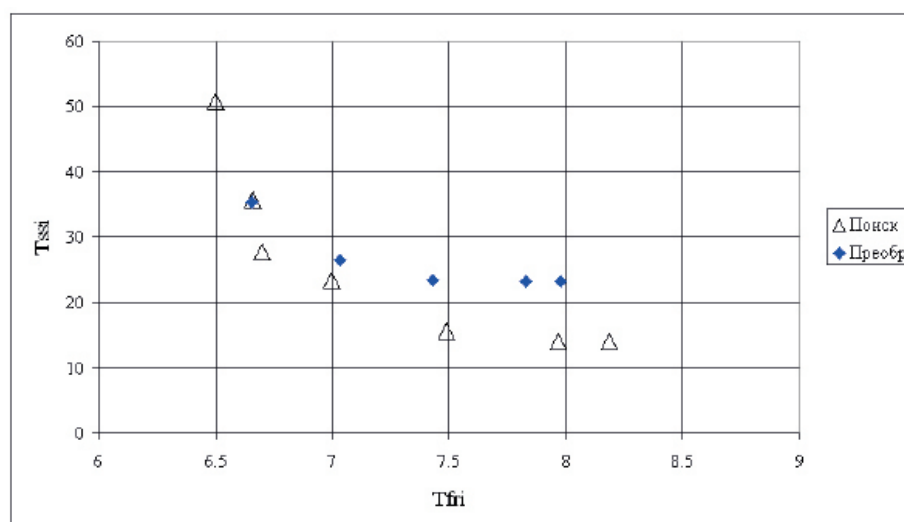


Рис. 5. Результаты для цифровых фильтров с нулями, определяемыми равенством (15).

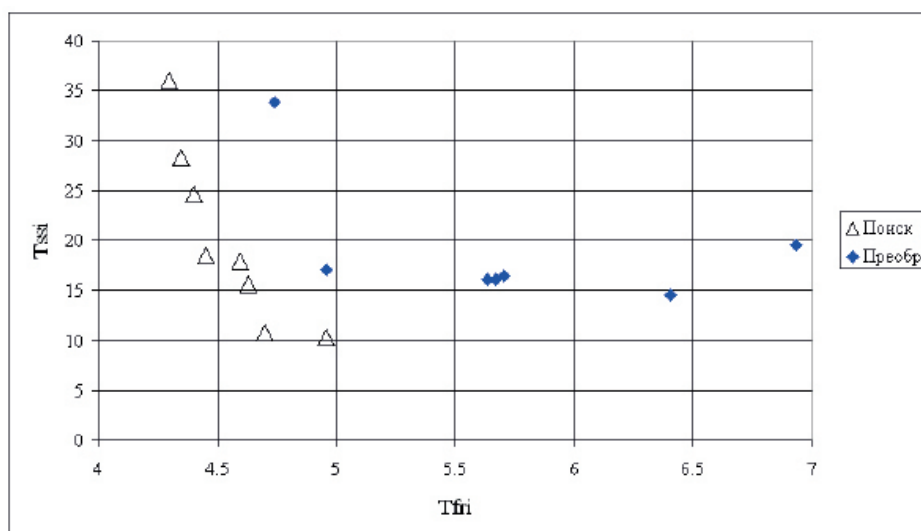


Рис. 6. Результаты для цифровых фильтров с произвольным расположением нулей.

Наглядное представление о характеристиках цифровых фильтров, полученных путем поиска, дают примеры их АЧХ и ПХ на рис. 7.

Кривые 1 получены для фильтра, показанного правой крайней точкой серии «Поиск» на рис. 5. Кривые 2 относятся к фильтру, отмеченному левой крайней точкой той же серии. Кривые 3 принадлежат фильтру, которому соответствует правая крайняя точка серии «Поиск» на рис. 6. Кривые 4 получены для фильтра, показанного левой крайней точкой этой серии.

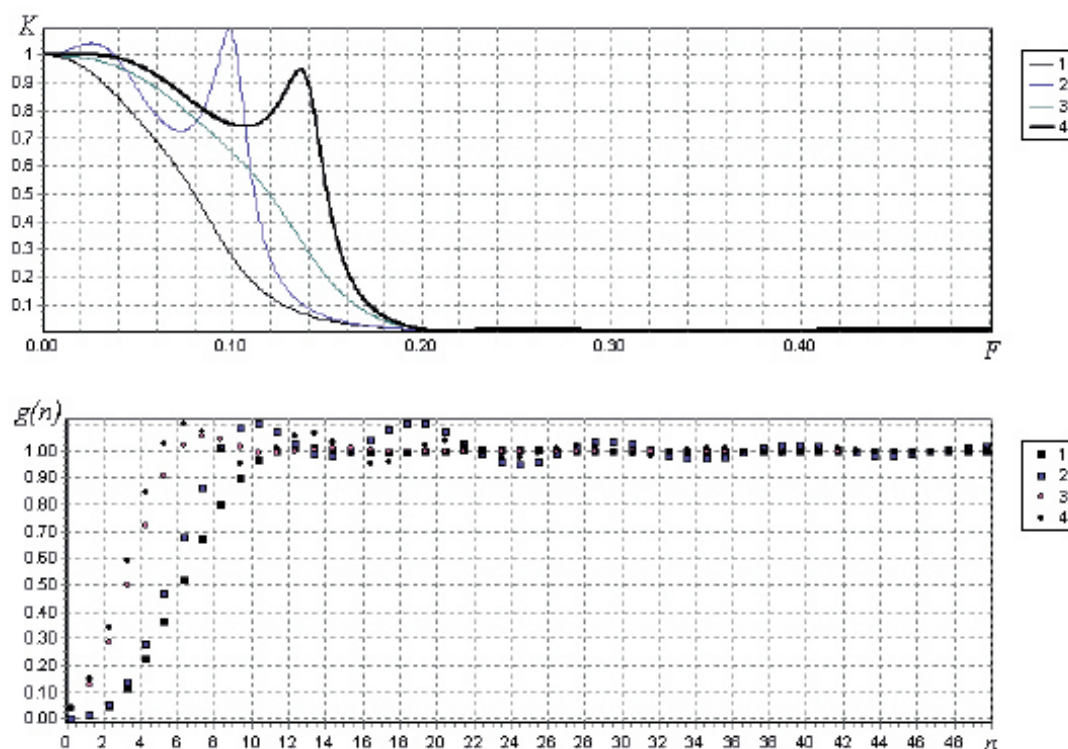


Рис. 7. Примеры АЧХ (верхние графики) и ПХ цифровых фильтров.

В качестве дополнительной информации для последующего сравнения разных методов получения оптимальных цифровых и аналоговых фильтров в таблице приведены данные о среднем времени T_{100} , затрачиваемом на выполнение серии из 100 циклов локального поиска, среднем количестве NGF вычислений целевой функции в цикле локального поиска и среднем времени TGF одного вычисления целевой функции. Счетчик числа расчетов целевой функции и таймер для измерения продолжительности работы имеются в программах SOFTD и HODF. Все эксперименты выполнялись на одном компьютере с двухядерным процессором Intel Core 2 с тактовой частотой 1.87 ГГц.

Затраты времени на поиск

Фильтр	Нули	T_{100} , с	NGF	TGF, мс
Цифровой	В соотв. с (15)	15	260	0.58
	Произвольные	37	620	0.59
Аналоговый	NZ = 0	110	370	2.93
	NZ = 4	260	830	3.10

Первое, что следует из графиков на рис. 5 и рис. 6, это превосходство цифровых фильтров, полученных путем поиска оптимальных решений, над фильтрами, полученными путем преобразования оптимальных по тем же ПК аналоговых фильтров-прототипов. Особенно заметно это преимущество в случае произвольного положения нулей цифрового фильтра (рис. 6). Можно сделать вывод, что при билинейном преобразовании Парето-оптимальность по АЧХ и ПХ не сохраняется.

Для аналоговых фильтров с числом нулей ПФн $NZ = 0$ результаты, полученные путем поиска оптимальных решений и путем обратного билинейного преобразования, приблизительно одинаковые и составляют единый фронт Парето (рис. 3). В случае аналоговых фильтров с $NZ = 4$ результаты, полученные путем обратного билинейного преобразования, образуют вполне определенный фронт Парето. В то же время в результатах поиска оптимальных решений для таких фильтров не видно отчетливой и монотонной закономерности. По-видимому, рельефы целевых функций для этих фильтров слишком сложные, и применяемый алгоритм поиска не находит решений достаточно близких к оптимальным.

Продолжительность вычисления целевой функции для аналогового фильтра приблизительно в 5 раз больше, чем для цифрового. Это связано с тем, что при расчете ПХ цифрового фильтра необходимо учитывать значительно меньше отсчетов, чем при аналогичном расчете для аналогового фильтра, который выполняется методом пространства состояний [10]. В результате поиск оптимальных по АЧХ и ПХ аналоговых фильтров требует значительно большего времени по сравнению с оптимизацией цифровых фильтров.

Заключение

Проведенное исследование показало, что для получения цифровых фильтров, оптимальных по совокупности ПК, характеризующих АЧХ и ПХ, следует выполнять поиск непосредственно цифровых фильтров, так как преобразование в цифровую форму оптимальных в том же смысле аналоговых фильтров-прототипов дает худшие результаты. Разработанная программа поиска Парето-оптимальных цифровых фильтров обеспечивает решение этой задачи и позволяет выбирать необходимые сочетания ПК.

Кроме того, в ряде случаев рациональным способом получения оптимальных по указанной совокупности ПК аналоговых фильтров оказывается обратное билинейное преобразование ПФн найденных оптимальных цифровых фильтров. Такой вариант может обеспечить получение лучших решений при значительной экономии времени по сравнению с поиском оптимальных аналоговых фильтров.

Не исключено, что существуют возможности использования цифровых фильтров-прототипов, оптимальных по каким-то совокупностям ПК с сохранением этой оптимальности при преобразовании в цифровые фильтры с другими параметрами, например, с другой нижней граничной частотой полосы задерживания. Исследование таких возможностей является одной из задач последующих работ.

Полученные результаты еще раз показывают перспективность применения эвристических методов поиска оптимальных решений в радиоэлектронике.

Литература:

1. Нефедов В.И., Сигов А.С. Основы радиоэлектроники и связи: учебное пособие, под ред. В.И. Нефедова. М.: Высшая школа, 2009. 735 с. ISBN 978-5-06-006161-1
2. Гадзиковский В.И. Методы проектирования цифровых фильтров. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 416 с. ISBN 978-5-9912-0007-3
3. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М.: Сов. радио, 1975. 368 с.
4. Смирнов А.В. Оптимальные по Парето аппроксимации передаточных функций электрических фильтров. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2015;5-1(76):74-78.
5. Slowik A., Bialko M. Design and Optimization of IIR Digital Filters with Non-Standard Characteristics Using Particle Swarm Optimization Algorithm. In: 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2007), 11–14 Dec. 2007. P 162-165.
<https://doi.org/10.1109/ICECS.2007.4510955>
6. Walczak K. Multicriteria design of digital filter with evolutionary optimization. In: IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), 14-17 Dec. 2011. P. 331-335.
<https://doi.org/10.1109/ISSPIT.2011.6151583>
7. Sidhu D.S., Dhillon J. S., Kaur D. Design of Digital IIR Filter with Conflicting Objectives Using Hybrid Gravitational Search Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015: Article ID 282809, 16 p.
<https://doi.org/10.1155/2015/282809>
8. Бугров В.Н. Синтез целочисленных рекурсивных фильтров с произвольно заданными селективными требованиями. *Цифровая обработка сигналов*. 2016;2:35-43.
9. Смирнов А.В. Анализ условий сохранения оптимальности амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик при преобразованиях аналоговых и цифровых фильтров. *Российский технологический журнал*. 2020;8(2):43-58.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-43-58>
10. Смирнов А.В. Метод одновременной оптимизации характеристик электрических фильтров в частотной и временной областях. *Российский технологический журнал*. 2018;6(6):20-33.
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>
11. Maghsoudi Y., Kamandar M. Low delay digital IIR filter design using metaheuristic algorithms. In: Proceedings of the 2017 2nd Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC), 7-9 March 2017, Kerman, Iran.
<https://doi.org/10.1109/CSIEC.2017.7940159>
12. Бобцов А.А., Болтунов Г.И., Быстров С.В., Григорьев В.В. Управление непрерывными и дискретными процессами: учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 175 с.

References:

1. Nefedov V.I., Sigov A.S. *Osnovy radioelektroniki i svyazi: uchebnoe posobie* (Basics of radio electronics and communications: text-book, (Ed.). V.I. Nefedov. Moscow: Vysshaya shkola; 2009. 735 p. (in Russ.). ISBN 978-5-06-006161-1
2. Gadzikovskii V.I. *Metody proektirovaniya tsifrovyykh fil'trov* (Methods for designing digital filters. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2007. 416 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0007-3
3. Gutkin L.S. Optimizatsiya radioelektronnykh ustroystv po sovokupnosti pokazatelei kachestva (Optimization of electronic devices in terms of a set of quality indicators. Moscow: Sovetskoe radio; 1975. 368 p. (in Russ.).
4. Smirnov A.V. Pareto-optimal approximations of electric filters transfer functions. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk = Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2015;5-1(76):74-78 (in Russ.).
5. Slowik A., Bialko M. Design and Optimization of IIR Digital Filters with Non-Standard Characteristics Using Particle Swarm Optimization Algorithm. In: 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2007), 11–14 Dec. 2007. P 162-165.
<https://doi.org/10.1109/ICECS.2007.4510955>
6. Walczak K. Multicriteria design of digital filter with evolutionary optimization. In: IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), 14-17 Dec. 2011. P. 331-335.
<https://doi.org/10.1109/ISSPIT.2011.6151583>
7. Sidhu D.S., Dhillon J. S., Kaur D. Design of Digital IIR Filter with Conflicting Objectives Using Hybrid Gravitational Search Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015: Article ID 282809, 16 p.
<https://doi.org/10.1155/2015/282809>
8. Bugrov V.N. Integer design of IIR filters with difficult selective requirements. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital Signal Processing*. 2016;2:35-43 (in Russ.).
9. Smirnov A.V. The analysis of conditions for preservation of gain-frequency and phase-frequency characteristics optimality under analog and digital filters transformation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(2):43-58 (in Russ.).
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-43-58>

10. Smirnov A.V. Method of simultaneous optimization of radio devices performance in frequency and time domain. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2018;6(6):20-33 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-6-13-27>
11. Maghsoudi Y., Kamandar M. Low delay digital IIR filter design using metaheuristic algorithms. In: Proceedings of the 2017 2nd Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC), 7-9 March 2017, Kerman, Iran. <https://doi.org/10.1109/CSIEC.2017.7940159>
12. Bobtsov A.A., Boltunov G.I., Bystrov S.V., Grigor'ev V.V. *Upravlenie nepreryvnymi i diskretnymi protsessami: uchebnoe posobie* (Control of continuous and discrete processes). St. Petersburg: St. Petersburg ITMO; 2010. 175 p. (in Russ.).

Об авторе:

Смирнов Александр Витальевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Систем связи и телекоммуникаций Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author Id:56380930700

About the author:

Alexander V. Smirnov, Cand. Sci. (Engineering), Professor of Department of Communication and Telecommunications Systems, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia). Scopus Author Id:56380930700

Поступила: 24.12.2019; получена после доработки: 28.09.2020; принята к опубликованию: 10.10.2020.

Металинза на основе одиночных диэлектрических микрочастиц для фотопроводящих оптико-терагерцовых преобразователей

И.А. Глинский^{1,@},
Н.В. Зенченко¹,
Д.С. Пономарев²

¹МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

²Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова
Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), Москва 117105, Россия

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

В работе теоретически исследовано влияние эффекта фокусировки лазерного импульса накачки ($\lambda_0 = 800$ нм) одиночной диэлектрической микрочастицей, размещенной в зазоре между электродами оптико-терагерцового преобразователя (ОТП). Данный подход предложен в противовес методу повышения эффективности ОТП за счет структурирования краев электродов для формирования плазмонных решеток. Для уменьшения потерь на отражение импульса накачки от поверхности фотопроводника предложено использовать просветляющий слой из оксида алюминия (Al_2O_3). С помощью электромагнитного моделирования методом конечных элементов были получены картины распределения интенсивности E^2 в фотопроводящем слое ОТП при различных диаметрах микрочастицы и толщины просветляющего покрытия Al_2O_3 . В качестве материала фотопроводника использовался полупроводящий арсенид галлия. Изучены свойства формируемой фотонной струи и построены зависимости коэффициента усиления поля (δ_{opt}) и полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWHM) от диаметра микрочастицы. Показано, что благодаря оптимизации диаметра микрочастицы ($d_{particle} = 1.2$ мкм) и подбору оптимальной толщины Al_2O_3 ($h_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 200$ нм), возможно добиться максимально эффективного пропускания импульса лазерной накачки в фотопроводник с повышенной амплитудой пространственной локализации излучения ($\delta_{opt} \sim 8.7$ раз) и добиться значения $\text{FWHM} \sim 0.34 \cdot \lambda_0$, тем самым преодолев дифракционный предел Аббе.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о значительных преимуществах применения диэлектрических метаповерхностей при проектировании ОТП, а предложенная конструкция металинзы на основе одиночной диэлектрической микрочастицы может стать перспективным методом повышения эффективности конверсии ОТП.

Ключевые слова: терагерцовые технологии, терагерцовая импульсная спектроскопия, источники и детекторы ТГц излучения, суб-волновая фокусировка излучения, терагерцовые оптические элементы и системы, оптико-терагерцовая конверсия, метаповерхность, металинза

Для цитирования: Глинский И.А., Зенченко Н.В., Пономарев Д.С. Металинза на основе одиночных диэлектрических микрочастиц для фотопроводящих оптико-терагерцовых преобразователей. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):78-86. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-78-86>

All-dielectric metalens based on a single colloidal particle for photoconductive optical-to-terahertz switches

Igor A. Glinskiy^{1,@},
Nikolay V. Zenchenko¹,
Dmitry S. Ponomarev²

¹MIREA – Russian Technological University, 119454 Moscow, Russia

²Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow 117105, Russia

@Corresponding author, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru

In this paper, we theoretically study the focusing of laser pump pulse ($\lambda_0 = 800$ nm) by a single dielectric microparticle placed onto the gap between the electrodes of an optical-to-terahertz (THz) switches (OTS). We propose an alternative to the incorporation of plasmonic grating approach that is aimed at the increase of the optical-to-THz conversion efficiency. To reduce the Fresnel losses due to reflection of the pump pulse from the surface of the photoconductor, we additionally use an antireflection coating layer – aluminum oxide (Al_2O_3). By using electromagnetic modeling with finite element method we plot the intensity distribution E^2 profiles within the photoconductive layer of the OTS which were obtained for different diameters of the microparticle and the thickness of the Al_2O_3 antireflection coating layer. We use a semi-insulating gallium arsenide as a photoconductor. The properties of the formed photonic jet are studied, and the dependences of the field enhancement factor (δ_{opt}) and full width at the half-maximum level (FWHM) on the microparticle diameter are plotted. It is shown that the optimization of the microparticle diameter ($d_{\text{particle}} = 1.2 \mu\text{m}$) and the selection of the optimal Al_2O_3 thickness ($h\text{Al}_2\text{O}_3 = 200$ nm) makes it is possible to achieve the most efficient transmission of the laser pump pulse into the photoconductor with an increased amplitude of spatial radiation localization ($\delta_{\text{opt}} \sim 8.7$ times) and to achieve the FWHM $\sim 0.34 \lambda_0$, thereby overcoming the Abbe diffraction limit. Thus, the obtained results indicate advantages of

such dielectric metasurfaces in the designing of OTS. Moreover, the proposed design of a meta lens based on a single dielectric microparticle can become a promising method for increasing the efficiency of OTS.

Keywords: terahertz technology, pulsed terahertz spectroscopy, emitters and detectors of THz radiation, sub-wavelength radiation, terahertz optical elements and systems, optical to terahertz conversion, metasurface, metalens

For citation: Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Ponomarev D.S. All-dielectric metalens based on a single colloidal particle for photoconductive optical-to-terahertz switches *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):78-86 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-78-86>

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон представляет значительный научный и практический интерес, поскольку именно в этой области спектра лежат частоты некоторых элементарных возбуждений полупроводников, диэлектриков и сверхпроводников, колебательные и вращательные спектры полимеров и сложных молекул [1, 2]. Это позволяет применять ТГц-излучение для диагностики онкологических заболеваний, обнаружения биологических и химических агентов, загрязнений верхних слоев почвы и лакокрасочных покрытий, контроля качества продуктов питания и медикаментов [3, 4]. Одним из основных источников ТГц-излучения стали системы, основанные на взаимодействии ультракоротких лазерных импульсов с фотопроводящими полупроводниковыми материалами – оптико-ТГц-преобразователи (ОТП) [5]. Они позволяют генерировать сверхширокополосное импульсное или же плавно перестраиваемое в широком диапазоне непрерывное ТГц-излучение, стабильно работают при комнатной температуре и не требуют мощных лазерных источников для накачки. Однако существует ряд фундаментальных ограничений, влияющих на эффективность работы ОТП, связанных с необходимостью повышения коэффициента преобразования лазерного излучения накачки в электромагнитные колебания ТГц-диапазона. Одним из таких ограничений является высокий коэффициент преломления в используемых для ОТП фотопроводниках, вследствие чего большая часть падающего лазерного излучения отражается от их поверхности [6, 7].

Наиболее успешным методом повышения эффективности ОТП является структурирование краев электродов для формирования так называемых «плазмонных решеток» [5, 8–10]. Плазмонные решетки увеличивают концентрацию фотовозбужденных носителей тока вблизи их краев, что позволяет большему числу фотоносителей достигать электродов и вносить вклад в переходной ток (фототок), а значит усиливать генерацию ТГц-импульсов. В работе [11] было впервые теоретически показано, что увеличение топологической размерности плазмонной решетки от 2D к 3D целесообразно при использовании двух пассивирующих диэлектриков и дает потенциальную возможность возбудить более высокие плазмонные моды [12]. Возбуждение таких мод приводит к увеличению коэффициента преобразования ОТП, а также расширяет его спектр излучения. Нами была предложена технология создания ОТП с 3D-плазмонными электродами с высотой (толщиной) металлизации 100 нм и аспектным соотношением между высотой электрода и периодом решетки 1:1, что позволило заметно усилить генерацию ТГц-излучения и увеличить переходной ток [7].

В противовес плазмонным решеткам, довольно привлекательным выглядит применение диэлектрических метаповерхностей [13, 14], позволяющих сфокусировать лазерный импульс накачки ОТП на суб-волновом масштабе. В отличие от широко используемых сферических и асферических линз [15–17], линза на основе диэлектрической метаповерхности (металинза) позволяет сформировать суб-волновые каустики и сосредоточить максимальное число фотовозбужденных носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника [11]. Кроме того, путем оптимизации ее диаметра и расположения относительно электродов ОТП возможно управлять фокусом каустики [5], и как следствие, влиять на мощность генерации ТГц-излучения посредством ОТП.

В настоящей работе численным методом исследовано влияние металинзы на основе одиночной диэлектрической микрочастицы, размещенной в зазоре между электродами ОТП, на процессы перераспределения энергии лазерной накачки в фотопроводящем слое. Путем оптимизации диаметра микрочастицы показано, что в области теневой поверхности микрочастицы формируется фотонная струя [18, 19], которая характеризуется сильной пространственной локализацией и высокой интенсивностью оптического поля в области фокусировки. Для уменьшения потерь на отражение импульса накачки поверхность фотопроводника была дополнительно покрыта просветляющим слоем из оксида алюминия (Al_2O_3). Показано, что благодаря оптимизации диаметра микрочастицы и подбору оптимальной толщины Al_2O_3 возможно добиться максимально эффективного пропускания импульса лазерной накачки в фотопроводник (до 1 мкм) с повышенной амплитудой пространственной локализации излучения (до 8.7 раз) и добиться значения полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWHM) $\sim 0.34\lambda_0$ (где λ_0 – длина волны падающего излучения), что меньше дифракционного предела Аббе $0.5\lambda_0$.

Методы исследований

Электромагнитное моделирование проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics. Использовался метод конечных элементов путем численного решения дифференциальных уравнений с частными производными, суть которого заключается в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве конечных элементов – кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей [20]. Преимущества использования данного метода заключается в высокой точности результатов при приемлемых вычислительных затратах, а также в гибкости самого метода, позволяющего учитывать множество физических эффектов во время моделирования. Для оценки амплитуды пространственной локализации излучения были численно решены уравнения Максвелла в частотной области с использованием модуля «Electromagnetic Waves, Frequency Domain». Исследования были проведены для ОТП на основе полуизолирующего GaAs (далее – semi-insulate GaAs, SI GaAs), который характеризуется показателем преломления $n_{\text{GaAs}} = 3.64$. Схематичное изображение ОТП с металинзой, а также используемой модели приведено на рис. 1а и 1б, соответственно.

Модель, помимо полубесконечного фотопроводящего слоя SI GaAs, включает в себя сферическую диэлектрическую микрочастицу, а также просветляющее покрытие на основе Al_2O_3 . В качестве материала для сферической микрочастицы использовался поли-

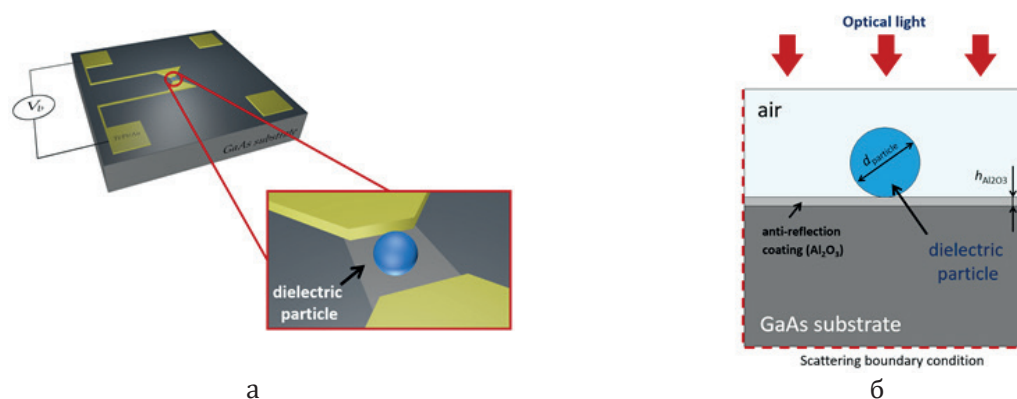


Рис. 1. ОТП для генерации ТГц-излучения:

а – схематичное изображение ОТП с металинзой на основе одиночной диэлектрической микрочастицы; б – изображение 2D-модели для электромагнитного моделирования методом конечных элементов.

метилметакрилат (ПММА) с показателем преломления $n_{\text{particle}} = 1.48$. Просветляющее сапфировое покрытие с показателем преломления $n_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1.75$ способствует снижению градиента между показателями преломления микрочастицы и фотопроводника SI GaAs. ОТП с металинзой взаимодействует с лазерным пучком, заданным как плоский волновой фронт с амплитудой электрического поля, ограниченной в плоскости параллельной поверхности фотопроводника по Гауссову распределению. Длина волны лазерного пучка составляет $\lambda_0 = 800$ нм с максимальной амплитудой электрического поля $E_0 = 1$ В/м. Для построения картины распределения была применена неоднородная сетка с минимальным размером ячейки $\lambda_0/8$ для области теневой поверхности микрочастицы и $\lambda_0/4$ для остальной части модели. Для внешних границ модели использованы граничные условия рассеяния (scattering boundary condition, SBC), которые представляют собой плоскости, прозрачные для всех падающих на них электромагнитных волн, исключая вторичные переотражения в модели.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2а можно наблюдать полученное с помощью электромагнитного моделирования распределение интенсивности E^2 в фотопроводящем слое ОТП с диэлектрической микрочастицей диаметром 1.2 мкм и просветляющим покрытием толщиной $h_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 116$ нм. Видно, что в области теневой поверхности диэлектрической микрочастицы формируется фотонная струя с ярко выраженной локализацией интенсивности вблизи поверхности фотопроводника. На рис. 2б представлены сечения распределения интенсивности E^2 вдоль оси x на разной глубине фотопроводника (s – расстояние от поверхности фотопроводника). На расстоянии от поверхности фотопроводника $s = 1$ мкм амплитуда интенсивности поля E^2 уменьшается в 2 раза.

Для оценки свойств фотонной струи были использованы два параметра. Первым параметром является коэффициент усиления поля δ_{opt} , который определяется как отношение максимальной интенсивности поля в фотопроводнике при фокусировке диэлектрической микрочастицей E_{max}^2 к максимальной интенсивности в случае отсутствия микрочастицы E_0^2 :

$$\delta_{\text{opt}} = \frac{|E_{\text{max}}^2|}{|E_0^2|}.$$

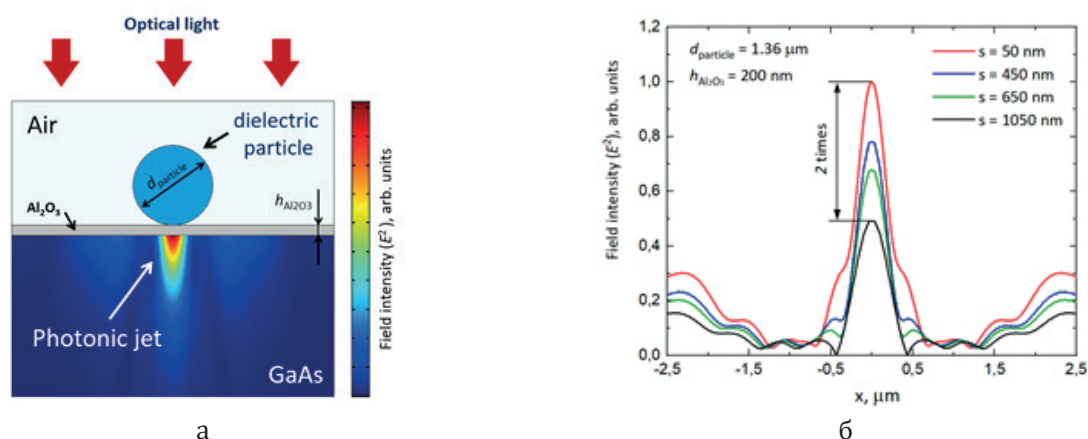


Рис. 2. Результаты электромагнитного моделирования ОТП:

а – распределение интенсивности E^2 в фотопроводящем слое ОТП с диэлектрической микрочастицей с диаметром 1.2 мкм и антиотражающим слоем толщиной $h_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 116$ нм; б – распределение интенсивности E^2 вдоль оси x на разной глубине s в фотопроводнике.

Коэффициент усиления поля δ_{opt} позволяет оценить насколько выше эффективность ОТП с металинзой на основе одиночной диэлектрической микрочастицы по сравнению с традиционным ОТП, где волновой фронт падающего лазерного излучения взаимодействует с плоской границей фотопроводящего слоя. Вторым параметром – это полная ширина на уровне половинной амплитуды (FWHM), нормированная к длине волны падающего излучения λ_0 , которая характеризует степень пространственной локализации фотонной струи. На рис. 3 представлены полученные зависимости величин δ_{opt} (а) и FWHM (б) от диаметра микрочастицы при разной толщине просветляющего слоя. Диаметр микрочастицы d_{particle} в модели варьировался в пределах 0.4–2.5 мкм, а толщина сапфирового покрытия $h_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ изменялась в диапазоне 50–200 нм.

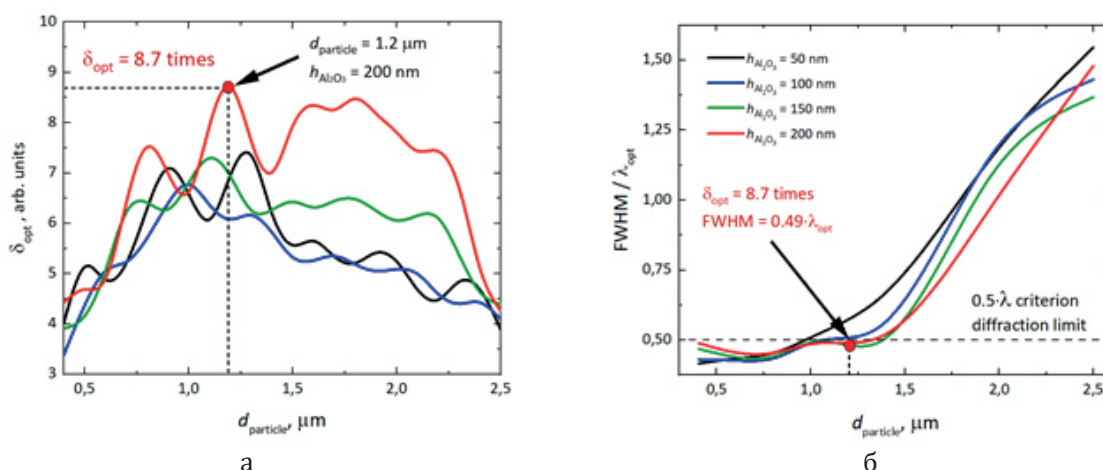


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления поля δ_{opt} (а) и полной ширины на уровне половинной амплитуды (FWHM), нормированной к длине волны падающего излучения (б), от диаметра микрочастицы при разной толщине просветляющего покрытия Al_2O_3 .

Видно, что для значений коэффициента усиления поля δ_{opt} характерны максимумы при использовании частиц диаметром от 1.0 до 1.5 мкм. Кроме того, значительное влияние оказывает просветляющий слой Al_2O_3 , который в отдельных случаях позволяет существенно повысить эффективность проникновения импульса лазерной накачки в фо-

топроводящий слой. Это связано с тем, что показатель преломления сапфира несколько больше показателя преломления микрочастицы, и сапфировый слой позволяет эффективнее передавать излучение в фотопроводник. Максимальное значение δ_{opt} составило 8.7 раз при диаметре микрочастицы 1.2 мкм и толщине антиотражающего слоя 200 нм. Кроме того, при данных размерах частицы можно получить достаточно низкое значение FWHM равное $0.49 \cdot \lambda_0$, что позволяет сосредоточить максимум плотности фотовозбужденных носителей заряда в очень узкой каустике вблизи поверхности. Отметим, что при уменьшении диаметра микрочастицы возможно добиться значений FWHM вплоть до $0.34 \cdot \lambda_0$ при сохранении коэффициента усиления δ_{opt} до 7 раз. Таким образом, предложенная конструкция металинзы на основе одиночной диэлектрической микрочастицы открывает широкие возможности для повышения эффективности работы ОТП.

Заключение

Методом численного моделирования получены картины распределения интенсивности E^2 в фотопроводящем слое ОТП при различных диаметрах микрочастицы и толщине просветляющего покрытия Al_2O_3 . Полученные распределения интенсивности E^2 , зависимости коэффициента усиления поля δ_{opt} и FWHM от диаметра микрочастицы позволяют оценить влияние металинзы на основе одиночной диэлектрической микрочастицы, размещенной на поверхности фотопроводника, на процессы локализации энергии лазерной накачки вблизи электродов ОТП. Определены оптимальный диаметр микрочастицы $d_{particle}$ и толщина антиотражающего слоя $h_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, которые обеспечат максимальную пространственную локализацию излучения в приповерхностном слое фотопроводника при длине волны лазерного излучения $\lambda_0 = 800$ нм. Максимальный коэффициент усиления поля δ_{opt} составил 8.7 раз при диаметре микрочастицы $d_{particle} = 1.2$ мкм и толщине антиотражающего слоя $h_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 200$ нм. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения диэлектрических металинз при проектировании фотопроводящих оптико-терагерцовых преобразователей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РТУ МИРЭА «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий».

Литература / References:

1. Pereira M.F. TERA-MIR radiation: materials, generation, detection and applications. *Opt. Quant. Electron.* 2014;46(4):491-493.
<https://doi.org/10.1007/s11082-014-9883-5>
2. Zaytsev K.I., Dolganova I.N., Chernomyrdin N.V., Katyba G.M., Gavdush A.A., Cherkasova O.P., Komandin G.A., Shchedrina M.A., Khodan A.N., Ponomarev D.S., Reshetov I.V., Karasik V.E., Skorobogatiy M., Kurlov V.N., Tuchin V.V. The progress and perspectives of terahertz technology for diagnosis of neoplasms: A review. *Journal of Optics (United Kingdom)*. 2020;22(1):013001.
<https://doi.org/10.1088/2040-8986/ab4dc3>
3. Ting H., Jing ling S. Applications of Terahertz Spectroscopy in Illicit Drugs Detection. *PubMed*. 2013;33(9):2348-2353.
4. Musina G.R., Nikitin P.V., Chernomyrdin N.V., Dolganova I.N., Gavdush A.A., Komandin G.A., Ponomarev D.S., Potapov A.A., Reshetov I.V., Tuchin V.V., Zaytsev K.I. Prospects of terahertz technology in diagnosis of human brain tumors - A review. *Journal of Biomedical Photonics & Engineering (J-BPE)*. 2020;6(2):020201.
<https://doi.org/10.18287/JBPE20.06.020201>
5. Yachmenev A.E., Lavrukhin D.V., Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Goncharov Yu.G., Spektor I.E., Khabibullin R.A., Otsuji T., Ponomarev D.S. Metallic and dielectric metasurfaces in photoconductive terahertz devices: a review. *Opt. Eng.* 2019;59(6):061608 (19 p.).
<https://doi.org/10.1117/1.OE.59.6.061608>

6. Lavrukhin D.V., Yachmenev A.E., Pavlov A.Yu., Khabibullin R.A., Goncharov Yu.G., Spector I.E., Komandin G.A., Yurchenko S.O., Chernomyrdin N.V., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Shaping the spectrum of terahertz photoconductive antenna by frequency-dependent impedance modulation. *Semicond. Sci. Technol.* 2019;34(3):034005. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aaff31>
7. Lavrukhin D.V., Yachmenev A.E., Glinskiy I.A., Khabibullin R.A., Goncharov Y.G., Ryzhii M., Otsuji T., Spector I.E., Shur M., Skorobogatiy M., Zaytsev K.I., Ponomarev D.S. Terahertz photoconductive emitter with dielectric-embedded high-aspect-ratio plasmonic grating for operation with low-power optical pumps. *AIP Advances*. 2019;9(1):015112. <https://doi.org/10.1063/1.5081119>
8. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P. Enhancement of terahertz photoconductive antenna operation by optical nanoantennas. *Laser & Photonics Reviews*. 2017;11(1):1600199. <https://doi.org/10.1002/lpor.201600199>
9. Yardimci N.T., Cakmakyan S., Hemmati S., Jarrahi M. A high power broadband terahertz source enabled by three-dimensional light confinement in a plasmonic nanocavity. *Scientific Reports*. 2017;7(1):4166. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04553-4>
10. Castro-Camus E., Alfaro M. Photoconductive devices for terahertz pulsed spectroscopy: a review. *Photon. Res.* 2016;4(3):A36-A42. <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000A36>
11. Park S.-G., Jin K.H., Yi M., Ye J.C., Ahn J., Jeong K.-H. Enhancement of terahertz pulse emission by optical nanoantenna. *ACS Nano*. 2012;6(3):2026-2031. <https://doi.org/10.1021/nn204542x>
12. Catrysse P.B., Veronis G., Shin H., Shen J.-T., Fan S. Guided modes supported by plasmonic films with a periodic arrangement of subwavelength slits. *Appl. Phys. Lett.* 2006;88(3):031101. <https://doi.org/10.1063/1.2164905>
13. Mitrofanov O., Siday T., Thompson R.J., Luk T.S., Brener I., Reno J.L. Efficient photoconductive terahertz detector with all-dielectric optical metasurface. *APL Photonics*. 2018;3(5):051703. <https://doi.org/10.1063/1.5011420>
14. Katyba G.M., Zaytsev K.I., Dolganova I.N., Shikunova I.A., Chernomyrdin N.V., Yurchenko S.O., Komandin G.A., Reshetov I.V., Nesvizhevsky V.V., Kurlov V.N. Sapphire shaped crystals for waveguiding, sensing and exposure applications. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2018;64(4):133-151. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrw.2018.10.002>
15. Lo Y.H., Leonhardt R. Aspheric lenses for terahertz imaging. *Opt. Express*. 2008;16(20):15991-15998. <https://doi.org/10.1364/OE.16.015991>
16. Formanek F., Brun M.-A., Umetsu T., Omori S., Yasuda A. Aspheric silicon lenses for terahertz photoconductive antennas. *Appl. Phys. Lett.* 2009;94(2):021113-021113-3. <https://doi.org/10.1063/1.3072357>
17. Chernomyrdin N.V., Frolov M.E., Lebedev S.P., Reshetov I.V., Spector I.E., Tolstoguzov V.L., Karasik V.E., Khorokhorov A.M., Koshelev K.I., Schadko A.O., Yurchenko S.O., Zaytsev K.I. Wide-aperture aspherical lens for high-resolution terahertz imaging. *Rev. Sci. Instrum.* 2017;88(1):014703. <https://doi.org/10.1063/1.4973764>
18. Minin I.V., Liu C.-Y., Geints Y.E., Minin O.V. Recent advances in integrated photonic jet-based photonics. *Photonics*. 2020;7(2):41. <https://doi.org/10.3390/photonics7020041>
19. Minin I.V., Minin O.V., Glinskiy I.A., Khabibullin R.A., Malureanu R., Lavrinenko A.V., Yakubovsky D.I., Arsenin A.V., Volkov V.S., Ponomarev D.S. Plasmonic nanojet: an experimental demonstration. *Opt. Lett.* 2020;45(12):3244-3247. <https://doi.org/10.1364/OL.391861>
20. Edsberg L. Introduction to Computation and Modeling for Differential Equations, 2nd Edition. Hoboken, New Jersey: Wiley; 2015. 288 p. ISBN: 978-1-119-01844-5

Об авторах:

Глинский Игорь Андреевич, ведущий инженер отдела разработки ИТ-решений Инжинирингового центра мобильных решений, ассистент кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: I-4334-2015, Scopus Author ID: 57190616854, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Зенченко Николай Владимирович, ведущий инженер отдела разработки ИТ-решений Инжинирингового центра мобильных решений, ассистент кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: K-2233-2015, Scopus Author ID: 56891470400, <https://orcid.org/0000-0002-7932-1821>

Пономарев Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе, ведущий научный сотрудник ФГАНУ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) (117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр.5). ResearcherID: K-1632-2014, Scopus Author ID: 37124831400, <https://orcid.org/0000-0002-9567-8927>

About the authors:

Igor A. Glinskiy, Leading Engineer, IT Solutions Development Department, Mobile Solutions Engineering Center, Assistant Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). ResearcherID: I-4334-2015, Scopus Author ID: 57190616854, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Nikolay V. Zenchenko, Leading Engineer, IT Solutions Development Department, Mobile Solutions Engineering Center, Assistant Department of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russia). ResearcherID: K-2233-2015, Scopus Author ID: 56891470400, <https://orcid.org/0000-0002-7932-1821>

Dmitry S. Ponomarev, Ph.D. in Physics and Math, Deputy Director, Chief Researcher at V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS) (Nagorny proezd, 7/5, Moscow, 117105, Russia). ResearcherID: K-1632-2014, Scopus Author ID: 37124831400, <https://orcid.org/0000-0002-9567-8927>

Поступила: 02.08.2020; получена после доработки: 07.10.2020; принята к опубликованию: 30.10.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-87-108>



УДК 621.318.12

Перспективы применения ферритов с высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей в качестве радиопоглощающих материалов

**В.Г. Костишин^{1, @},
Р.М. Вергазов²,
С.Б. Меньшова³,
И.М. Исаев¹**

¹НИТУ «МИСиС», Москва 117049, Россия

²Колледж электронных технологий, г. Кузнецк Пензенской обл. 442500, Россия

³ГБОУ школа №962, Москва 127562, Россия,

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

В работе представлен обзор исследований по влиянию основных параметров ферритов на их способность поглощения электромагнитного излучения (более 10 дБ) в мегагерцовом диапазоне. Основным преимуществом ферритов является высокий показатель преломления (более 1000) в мегагерцовом диапазоне длин волн благодаря сочетанию высоких значений магнитной и диэлектрической проницаемостей, позволяющий изготавливать эффективные радиопоглощающие покрытия малой толщины (менее 10 мм). Исследования показывают, что ослабление мощности отраженного от поверхности феррита электромагнитного излучения обусловлено как интерференционными процессами, так и процессами диссипации электромагнитной энергии при распространении в феррите. Обратная пропорциональная связь между показателем преломления и частотой электромагнитного излучения в мегагерцовом диапазоне обеспечивает условие интерференционного минимума отраженного излучения при постоянстве толщины ферритовых покрытий. Высокий показатель преломления обеспечивает замедление скорости распространения электромагнитных волн в ферритах, что усиливает процессы диссипации их энергии.

Представлены исследования по влиянию базового химического состава ферритов, легирующих добавок, параметров микроструктуры и технологических режимов на их магнитную и диэлектрическую проницаемости. Исследования показали, что избыток оксида железа сверх стехиометрии, обеспечивающий полупроводниковые свойства зерен феррита, заметно повышает диэлектрическую проницаемость. Высокие значения диэлектрической проницаемости ферритов обеспечиваются сочетанием диэлектрических свойств зернограницных прослоек и полупроводниковых свойств самих зерен, формирующих барьерную емкость границ зерен согласно механизму Окадзаки. Легирование ферритов оксидами TiO_2 , Bi_2O_3 , CaO в количестве до 1 масс.% позволяет повысить электросопротивление и диэлектрическую проницаемость зернограницных прослоек, обеспечивая повышение диэлектрической проницаемости феррита в целом. Установлено, что формирование плотной крупнозернистой структуры обеспечивает повышение как магнитной, так и диэлектрической проницаемостей.

Ключевые слова: радиопоглощающий феррит, базовый состав, легирующие добавки, микроструктура, магнитная и диэлектрическая проницаемости.

Для цитирования: Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Меньшова С.Б., Исаев И.М. Перспективы применения ферритов с высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей в качестве радиопоглощающих материалов. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):87-108. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-87-108>

Prospects for the use of ferrites with high magnetic permeability and permittivity as radio-absorbing materials

Vladimir G. Kostishin^{1,@},
Rashit M. Vergazov²,
Svetlana B. Menshova³,
Igor M. Isaev¹

¹NUST "MISiS", Moscow 117409, Russia

²College of Electronic Technologies, Kuznetsk, Penza Region 442500, Russia

³GBOU school №962, Moscow 127562, Russia

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

The paper presents an overview of studies on the influence of the main parameters of ferrites on their ability to absorb electromagnetic radiation in the megahertz range (more than 10 dB). The main advantage of ferrites is a high refractive index (more than 1000) in the megahertz range due to the combination of high values of magnetic and dielectric permeability, which makes it possible to produce radio-absorbing coatings of small thickness (less than 10 mm) that effectively absorb electromagnetic radiation. Studies show that the attenuation of the power of electromagnetic radiation reflected from the surface of the ferrite is due to both interference processes and the processes of dissipation of electromagnetic energy during propagation in the ferrite.

The inversely proportional relationship between the refractive index and the frequency of electromagnetic radiation in the megahertz range provides the condition for the interference minimum of the reflected radiation at a constant thickness of the ferrite coatings. A high refractive index slows down the speed of propagation of electromagnetic waves in ferrites, which enhances the processes of dissipation of their energy.

The paper presents studies on the influence of the basic chemical composition of ferrites, alloying additives, microstructure parameters and technological modes on their magnetic and dielectric permeability. Studies have shown that an excess of iron oxide in excess of stoichiometry, which provides the semiconducting properties of ferrite grains, significantly increases the dielectric constant. High values of the dielectric constant of ferrites are provided by a combination of the dielectric properties of grain-boundary layers and the semiconducting properties of the grains themselves, which form the barrier capacity of grain boundaries according to the Okazaki mechanism. Alloying ferrites with oxides TiO_2 , Bi_2O_3 , CaO in an amount of up to 1 wt.% allows increasing the electrical resistance and dielectric constant of grain-boundary layers, providing an increase in the dielectric constant of ferrite as a whole. It has been established that the formation of a dense coarse-grained structure provides an increase in both the magnetic permeability and permittivity.

Keywords: radio-absorbing ferrite, basic composition, alloying additives, microstructure, magnetic permeability and permittivity.

For citation: Kostishin V.G., Vergazov R.M., Menshova S.B., Isaev I.M. Prospects for the use of ferrites with high magnetic permeability and permittivity as radio-absorbing materials. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(6):87-108 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-87-108>

1. Основные факторы, определяющие перспективность ферритовых радиопоглощающих материалов

Широкое применение токов высокой частоты в электронных приборах создает фон электромагнитного излучения, усиление которого в результате многократного переотражения от стен в помещениях отрицательно влияет на рабочий персонал и может привести к сбоям в работе оборудования [1, 2]. Поэтому весьма актуальна проблема снижения мощности этого фона путем применения покрытий из материалов, эффективно поглощающих электромагнитное излучение. Материалы должны иметь высокое электросопротивление, термостойкость, низкую горючесть, а сами покрытия небольшую толщину.

Эффективность поглощения излучения определяется процессами диссипации и интерференции и во многом зависит от значений магнитной и диэлектрической проницаемостей материала покрытия. Из исследований А.Г. Алексеева, Е.А. Штагера, Д. Фоксвела, Д. Джаксена и др. [3–9] следует, что покрытие, используемое в качестве экрана, наилучшим образом работает при толщине, соизмеримой с длиной электромагнитной волны в материале λ_{ϕ} . Уменьшить длину волны в материале можно за счет увеличения показателя преломления $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ [3]:

$$\lambda_{\phi} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1)$$

где λ – длина волны в вакууме, ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала покрытия, соответственно.

В гигагерцовом диапазоне частот для поглощения электромагнитного излучения используются композиционные материалы на основе диэлектрической матрицы с проводящими включениями в виде частиц графита, карбонильного железа и др. [3–10]. Поскольку длина электромагнитной волны в гигагерцовом диапазоне не превышает 30 см, толщина покрытий из композиционных материалов, как правило, менее 10 см, несмотря на низкие значения показателя преломления этих материалов (не более 10) [5–9].

В мегагерцовом диапазоне частот (1–1 000 МГц) для поглощения электромагнитного излучения композиционные материалы используются редко из-за низких значений показателя преломления, а применяются покрытия на основе ферритов [11, 12]. Перспективность использования ферритов в качестве радиопоглощающих материалов в мегагерцовом диапазоне главным образом обусловлена возможностью создания относительно тонких покрытий, сочетающих высокую эффективность поглощения и низкую стоимость [12]. Эффективность ферритов определяется сочетанием высоких значений магнитной и диэлектрической проницаемостей, а также оптимальных значений удельного электрического сопротивления. По этим показателям ферриты находятся вне конкуренции по сравнению с другими радиопоглощающими материалами [3].

Уменьшение толщины покрытий позволяет снизить их массу и стоимость. Для разработки покрытий толщиной менее 10 мм при частотах менее 50 МГц требуется разработка материала с высоким значением произведения $\epsilon\mu$, превышающим 10^7 [12]. У известных радиопоглощающих ферритов значения магнитной проницаемости близки к предельным значениям (2000–3000 в мегагерцовом диапазоне), при этом значения диэлектрической проницаемости не превышают 100 [13, 14]. Однако имеются существенные резервы для повышения диэлектрической проницаемости ферритов. В основном они связаны с реализацией барьерного механизма электрической емкости Окадзаки путем формирования определенной микроструктуры и применением легирующих добавок [15, 16]. Это обстоятельство обуславливает актуальность исследований по повышению диэлектрической проницаемости радиопоглощающих ферритов.

Основным параметром радиопоглощающего материала является коэффициент отражения, который определяется как отношение мощности потока излучения, отраженного материалом, к падающей мощности и выражается в децибелах [3–5]. Ослабление мощности отраженной электромагнитной волны от поверхности материала сильно зависит от явлений, происходящих при интерференции падающей и отраженной волн.

Перераспределение интенсивности волн в результате суперпозиции двух и более когерентных волн известно, как интерференция электромагнитных волн. В результате в пространстве происходит чередование максимумов и минимумов интенсивности излучения. Это приводит к формированию интерференционной картины [17, 18].

Интерференция возникает при разделении первоначальной волны на две волны при его прохождении через пластину феррита, расположенную на металлической поверхности (рис. 1). Волна, проходя через ферритовую пластину толщиной d , отразится два-

ды – от внутренней (граница раздела «феррит-металл») и наружной (граница раздела «феррит-воздух») ее поверхности [12, 17]. При каждом отражении от оптически более плотной среды теряется полуволна. Поскольку потеря полуволны при отражении от наружной поверхности компенсируется потерей полуволны при отражении от металлической поверхности, отражённые волны будут иметь оптическую разность хода Δ , определяемую выражением (2) [17]:

$$\Delta = 2d\sqrt{\epsilon \mu - \sin^2 \alpha}, \quad (2)$$

где α – угол падения излучения. Поскольку, величина $\sin^2 \alpha$ значительно меньше произведения $\epsilon \cdot \mu$ феррита, выражение (2) можно записать в виде:

$$\Delta = 2d\sqrt{\epsilon \cdot \mu}, \quad (3)$$

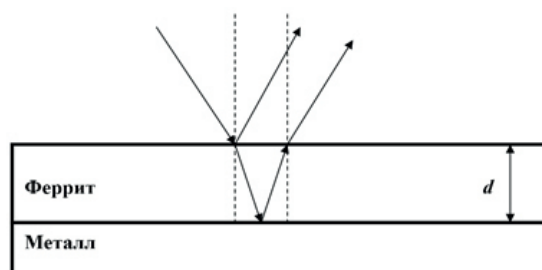


Рис. 1. Схема интерференции волн при отражении от поверхностей ферритовой пластины на металле.

Значительное гашение отраженных волн произойдет при условии интерференционного минимума, когда оптическая разность хода лучей, отраженных от наружной и внутренней поверхностей пластины будет равна [17]:

$$\Delta = \lambda(1/2 + m), \quad (4)$$

где m – целое число (0, 1, 2, 3 и т.д.).

При нулевом значении целого числа m из выражений (1) и (4) следует, что при толщине пластины, равной четверти длины электромагнитной волны в материале феррита, наблюдается основной интерференционный минимум отражения [9, 17]:

$$d = \frac{\lambda}{4\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{\lambda_{\phi}}{4}. \quad (5)$$

В пластинах с заданной толщиной интерференционный минимум должен достигаться лишь при фиксированных длинах излучения [17]

$$\lambda = \frac{4d\sqrt{\epsilon\mu}}{2m+1}. \quad (6)$$

В случае ферритовых материалов, формируя заданные зависимости проницаемостей ϵ и μ от длины волны, обеспечивающие постоянство отношения длины волны к показателю преломления (согласно (5)) в мегагерцовом частотном диапазоне, можно обеспечить интерференционный минимум отражения от поверхности при постоянстве толщины покрытия [7].

2. Основные виды ферритов, используемых в качестве радиопоглощающих материалов

Согласно исследованиям С.Б. Бибикова, Д.Н. Покусина, Л. Гарнеро, А. Франкуа, Дж. Хьюгонина, С. Пихота [14, 18, 19] в интервале частот 100–1 000 МГц перспективно использование в качестве поглотителей электромагнитного излучения Mg-Zn-ферритов со значениями магнитной проницаемости до 1000 и диэлектрической проницаемости до 100. Преимуществом Mg-Zn-ферритов является относительная дешевизна и доступность сырьевых компонентов по сравнению с другими ферритами, поскольку они не содержат в составе соединения никеля. Использование Ni-Zn-ферритов с высокими значениями магнитной (до 2000) и диэлектрической (до 1000) проницаемостей позволяет изготавливать эффективные поглощающие слои с толщиной не более 10 мм в диапазоне частот 50–100 МГц [16]. У разработанных в настоящее время Ni-Zn-ферритов магнитная проницаемость в указанном диапазоне частот не превышает 2400, тогда как значения диэлектрической проницаемости не превышают 100 [13, 19]. Хорошими перспективами обладают Mn-Zn-ферриты, магнитная проницаемость которых достигает 10 000, а диэлектрическая проницаемость 50 000 [19].

В таблице приведены значения $\rho_{\text{эфф}}$ в зависимости от частоты [19]. Для Mn-Zn-феррита с $\mu_n = 1000$ и для Ni-Zn-феррита с $\mu_n = 700$ они рассчитаны по результатам измерений действительной и мнимой составляющих диэлектрической проницаемости ϵ' и ϵ'' , выполненных Полдером [20]. Высокие значения диэлектрической проницаемости Mn-Zn-ферритов, на порядок превышающие диэлектрическую проницаемость Ni-Zn-ферритов, объясняются формированием микроструктуры, где зерна феррита, обладающие электропроводностью из-за высокого содержания ионов Fe^{2+} , ограничены диэлектрическими зернограничными прослойками. Такая структура значительно повышает электроемкость феррита [19].

Значения диэлектрической проницаемостей и $\rho_{\text{эфф}}$ ферритов на различных частотах [13]

Феррит	f , МГц	ϵ'	$\rho_{\text{эфф}}$, Ом·м
Mg-Zn $\mu_n = 700$	0.1	1800	1350
	1	1800	1350
	10	1600	1300
	80	950	1150
Ni-Zn $\mu_n = 2000$	0.01	2100	950
	0.1	2050	950
	1	1100	910
	10	100	830
Mn-Zn $\mu_n = 10000$	0.1	75000	0.58
	1	57000	0.41
	10	35000	0.09
	80	20000	0.01

Здесь μ_n – начальная магнитная проницаемость; $\rho_{\text{эфф}}$ – эффективное удельное сопротивление в переменных полях (Ом·м); ϵ' – действительная часть диэлектрической проницаемости; f – частота.

Исследования К. Окадзаки, Н.Н. Шольца, К.А. Пискарева [13, 15] показали, что диэлектрическая проницаемость керамических материалов, в том числе и ферритов, в значительной степени определяется параметрами микроструктуры, соотношением элек-

тропроводностей зерен и границ зерен, а также легирующими микродобавками, формирующими на границах зерен прослойки с высокой диэлектрической проницаемостью. Поэтому большинство исследований направлены на разработку легирующих добавок и модификации технологических режимов получения ферритовых материалов с высокой диэлектрической проницаемостью в мегагерцовом диапазоне. Это позволяет разработать тонкие покрытия на основе ферритов для защиты от излучения в диапазоне частот от 10 до 50 МГц [14, 16, 19].

3. Факторы, влияющие на радиопоглощающие свойства ферритов

Ферриты, как правило, получают по керамической технологии, из оксидов железа, никеля, марганца, магния, цинка и др. [21–23]. Исходные компоненты перемешивают и измельчают в вибрационных мельницах, атриторах. Смесь оксидов подвергают прокатке с целью протекания синтеза феррита и проводят вторичное измельчение. Из синтезированных порошков со связкой формуют заготовки и проводят спекание в печах с контролируемой газовой средой [21–23]. На свойства феррита, получаемого по керамической технологии, влияют базовый состав и качество исходного сырья, в частности – его агломерированность, а также точное соблюдение необходимых технологических режимов. С целью управления процессами эволюции свойств дисперсных систем от исходных компонентов до готового ферритового материала целесообразно использовать модификаторы – поверхностно-активные вещества (ПАВ) и микродобавки оксидов, вводимые на стадии первого либо второго измельчения. ПАВ позволяют управлять реологическими свойствами дисперсных систем, а легирующие добавки – процессами формирования микроструктуры в процессе спекания [22–24].

Исследования показали актуальность разработок составов легирующих добавок и модифицирование самого технологического процесса получения ферритовых материалов с требуемыми свойствами [21, 22]. Таким образом, модифицирование обеспечивает возможность управления ходом технологического процесса с помощью малых воздействий, что приводит к наиболее оптимальному достижению требуемых свойств [22, 23].

Высокое значение диэлектрической проницаемости Mn-Zn-ферритов можно объяснить вкладом барьерной емкости границ зерен из-за существенной разницы электропроводности зерен и границ зерен [13, 15]. Однако, низкое удельное электросопротивление этих ферритов (0.1–10 Ом·м), обусловленное высоким содержанием оксида железа в базовом составе (51.0–53.0 моль %), приводит к значительному отражению электромагнитных волн. Поэтому современные исследования в направлении повышения качества радиопоглощающих ферритов проводятся по двум направлениям: 1 – повышение удельного сопротивления Mn-Zn-ферритов и 2 – увеличение вклада барьерной емкости в Ni-Zn-ферритах.

Исследования подтвердили, что значения проницаемостей ферритов определяются их плотностью, базовым составом, легирующими добавками и параметрами микроструктуры [25, 26]. Ряд исследований направлен на модификацию составов и применения легирующих добавок, использование новых режимов дезагрегации порошков, разработку связующих веществ с целью устранения межгранульных пор в пресс-заготовках, увеличения плотности и уровня значений диэлектрической проницаемости [27–29].

Известно [21, 22], что для достижения высокой плотности ферритов необходимо исключить крупные поры между агрегированными частицами и межгранульные поры. Установлено заметное влияние режимов измельчения порошков в вибрационной мельнице на процессы дезагрегации и влияние связующих и поверхностно-активных веществ на процессы удаления межгранульных пор при прессовании гранулированных ферритовых порошков и свойства спеченных ферритов [30, 31].

Исследования показывают, что с увеличением продолжительности измельчения растут плотность (рис. 2), магнитная и диэлектрическая проницаемости ферритов (рис. 3), что является следствием разрушения агрегатов, повышения плотности и формирования крупно-зернистой структуры [32].

В работе [32] установлено, что увеличение частоты вращения дебалансного вала вибрационной мельницы с 1 500 до 3 000 об/мин, позволило улучшить радиопоглощающие свойства ферритов и сместить пик поглощения в сторону низких частот (рис. 4). При этом время сухого измельчения сокращается до одного часа, а достигаемая насыпная плотность изменяется с 1 500 до 2 000 кг/м³ (спеченная плотность изменяется с 4 700 до 4 900 кг/м³). Это можно объяснить возрастанием силы удара шаров, пропорциональной квадрату частоты, т.е. происходит более полная дезагрегация.

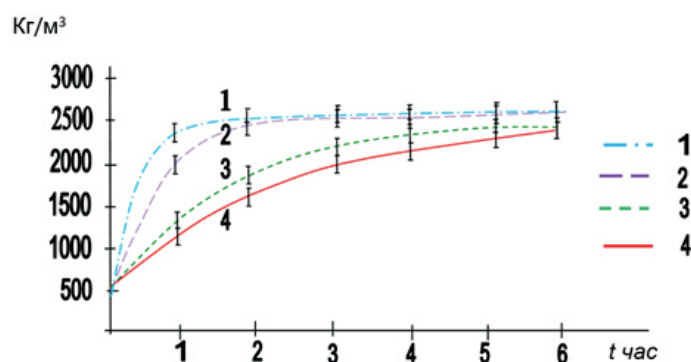


Рис. 2. Влияние типа мельницы и времени измельчения на насыпную плотность шихты феррита $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$: 1 – вибромельница 3000 об/мин; 2 – вибромельница 1500 об/мин; 3 – аттритор; 4 – шаровая мельница.

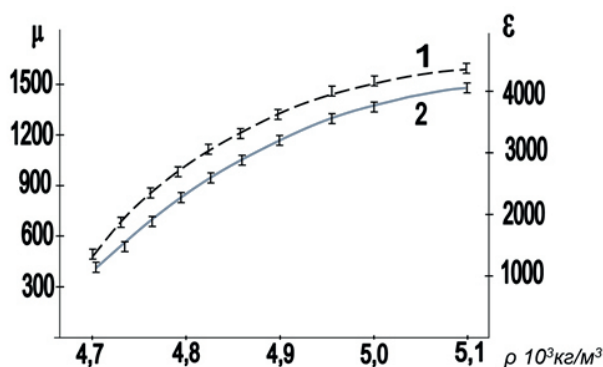


Рис. 3. Зависимости магнитной (1), диэлектрической (2) проницаемостей феррита $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7}\text{Fe}_2\text{O}_4$ от плотности при частоте $f = 1$ МГц.

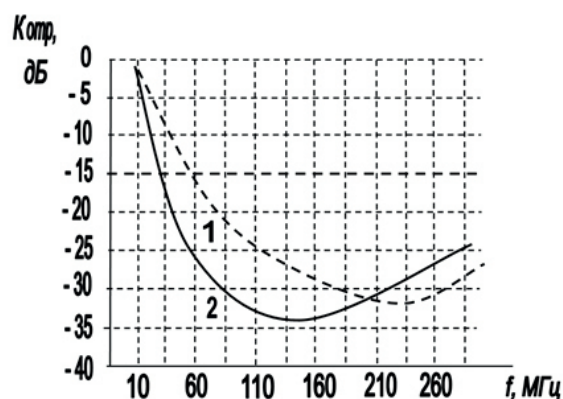


Рис. 4. Влияние частоты вращения дебалансового вала вибромельницы на частотную зависимость $K_{отр}$ феррита $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$: 1 – 1500 об/мин, 2 – 3000 об/мин. Время измельчения 2 часа.

В работах [33, 34] предложены новые модифицирующие составы поверхностно-активных веществ на основе олеата триэтаноламмония для измельчения порошков, а также связующие вещества на основе полиакрилатов и цитратов, обеспечивающие пластификацию гранулированных порошков. Разработанная связка позволяет на 20–30% снизить усилие прессования и повысить плотность пресс-заготовок на 5–7%.

Проведенные исследования показали [31, 34], что использование разработанной связки обеспечивает значительное снижение энергозатрат в производстве пресс-порошков, на операции прессования сырых заготовок, позволяет повысить плотность ферритовых пресс-заготовок и спеченных ферритов на 10–14%, что приводит к увеличению магнитной и диэлектрической проницаемостей и смещает в область низких частот пик уровня поглощения излучения.

С целью увеличения насыпной плотности пресс-порошка используют также предварительное уплотнение массы со связкой перед гранулированием, обеспечивающее повышение плотности гранул [21]. При этом установлено, что полученные по такой технологии пресс-порошки требуют повышенных давлений прессования для удаления межгранульных пор. С целью обеспечения деформации гранул использовали модифицированные связки, содержащие 0.5 масс. % цитрата триэтаноламмония [21, 22]. Разработанные в [31, 35] технологии гранулирования позволяют повысить плотность пресс-заготовок и плотность спеченных ферритов за счет активации спекания. При этом формируется более крупнозернистая структура, обеспечивающая большие значения диэлектрической проницаемости, что дает возможность сместить диапазон поглощения излучения в область низких частот (рис. 5).

Исследования, проведенные в работах [29, 36] на Ni-Zn-ферритах, показали, что с увеличением температуры от комнатной до 95–100 °С диэлектрическая проницаемость ферритов увеличивается и заметно снижается с дальнейшим возрастанием температуры, причем температура, соответствующая пиковым значениям диэлектрической проницаемости, примерно совпадает с температурой Кюри образцов (рис. 6–8) и повторяет ход температурной зависимости магнитной проницаемости. Данные, представленные на рис. 6 и 7, получены на образцах, спеченных и охлажденных в воздушной среде, а данные на рис. 8 – на образцах, полученных охлаждением в среде с пониженным парциальным

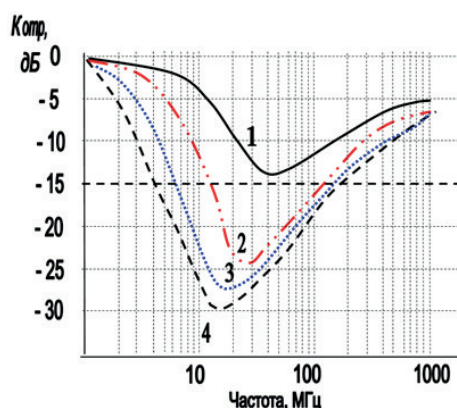


Рис. 5. Влияние давления предварительного прессования массы перед протиркой через сетку на частотную зависимость $K_{отр}$ феррита $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$: 1 – 0 МПа; 2 – 100 МПа; 3 – 400 МПа; 4 – 400 МПа с введением 0.5 масс. % цитрата триэтаноламмония.

давлением кислорода после спекания. Отмеченные закономерности примерно одинаковы как для легированных оксидами кальция и титана образцов, так и для образцов, не содержащих легирующих добавок.

Исследования [28, 37] показали, что легирование оксидами титана образцов, содержащих в базовом составе оксид железа сверх стехиометрии, повышает уровень поглощения электромагнитного излучения при частотах менее 100 МГц (рис. 9). Значительное влияние на диэлектрическую проницаемость ферритов оказывает величина парциального давления кислорода в зоне охлаждения после спекания [37]. Это связано с изменением электропроводности зерен в результате изменения концентрации ионов Fe^{2+} . Повышение уровня поглощения, видимо, связано с уменьшением длины волны излучения в феррите из-за повышения их диэлектрической проницаемости в результате формирования емкостного барьерного механизма Окадзаки в зернограничных прослойках.

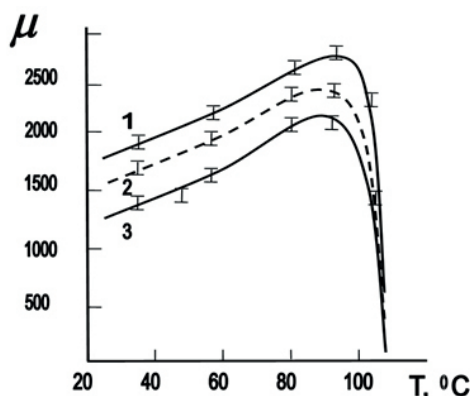


Рис. 6. Температурные зависимости магнитной проницаемости феррита $Ni_{0.32}Zn_{0.68}Fe_2O_4$ при частоте 1 МГц: 1 – без добавок; 2 – с добавкой 0.5 % масс. TiO_2 ; 3 – с добавкой 0.2 % масс. CaO и 0.5 % масс. TiO_2 .

Данные рентгенофазового анализа на установке «Дрон-3» не подтвердили образование сегнетоэлектрических фаз типа титаната кальция $CaTiO_3$ на границах зерен [38]. Поэтому начальный рост диэлектрической проницаемости до магнитной точки Кюри можно объяснить ослаблением магнитного обменного взаимодействия в ферритах, что

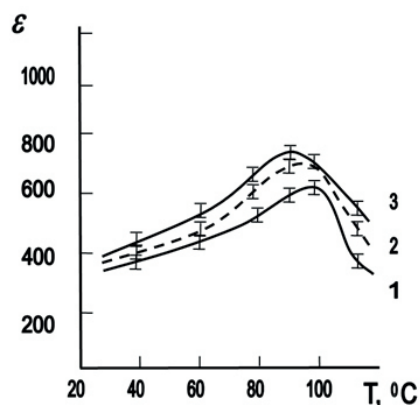


Рис. 7. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости феррита $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при частоте 1 МГц: 1 – без добавок; 2 – с добавкой 0.5 масс. % TiO_2 ; 3 – с добавкой 0.2 масс. % CaO и масс. 0.5 % TiO_2 .

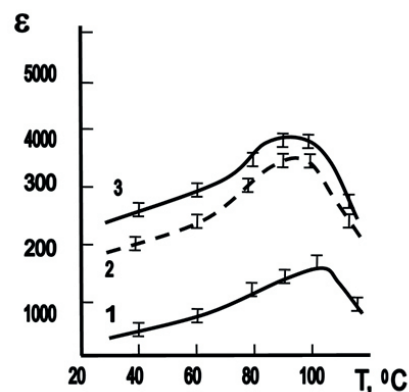


Рис. 8. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости феррита $\text{Ni}_{0.30}\text{Zn}_{0.65}\text{Fe}_{0.05}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при частоте 1 МГц: 1 – без добавок; 2 – с добавкой 0,5 % масс. TiO_2 ; 3 – с добавкой 0.2 % масс. CaO и 0.5 % масс. TiO_2 .

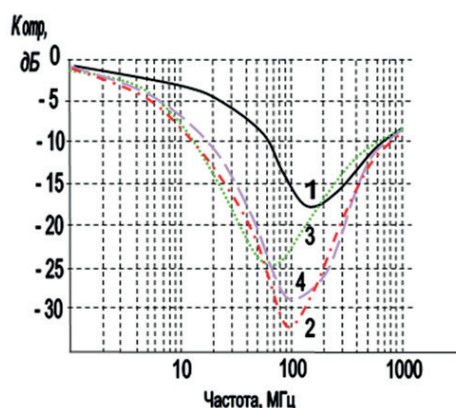


Рис. 9. Влияние частоты на коэффициент ослабления отраженной мощности от ферритовой пластины толщиной 6 мм: 1 – $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$; 2 – $\text{Ni}_{0.30}\text{Zn}_{0.65}\text{Fe}_{0.05}\text{Fe}_2\text{O}_4$ с добавкой 0.2 % масс. CaO и 0.5 % масс. TiO_2 ; 3 – $\text{Ni}_{0.30}\text{Zn}_{0.65}\text{Fe}_{0.05}\text{Fe}_2\text{O}_4$ без добавок; 4 – $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при охлаждении после спекания в среде с пониженным парциальным давлением кислорода.

повышает их электрическую поляризацию в результате облегчения смещения анионов и катионов в поле внешнего электромагнитного излучения.

Рост диэлектрической проницаемости ферритов, наблюдаемый при увеличении температуры спекания, как и рост их магнитной проницаемости, можно объяснить увеличе-

нием среднего размера зерен [39]. Это явление позволяет получить ферритовые материалы с сочетанием высоких значений магнитной и диэлектрической проницаемостей, что обеспечивает смещение частотного интервала поглощения излучения в область низких частот.

Выше температуры Кюри исчезает магнитный порядок в ферритах и процессы поляризации протекают без участия сил обменного взаимодействия [40]. Уменьшение диэлектрической проницаемости с дальнейшим увеличением температуры связано с хаотическим движением ионов под действием энергии теплового движения. Для выяснения более полной картины температурной зависимости диэлектрической проницаемости ферритов требуются дополнительные исследования [29].

Для оценки диэлектрической проницаемости ферритов часто используется модель К. Окадаки (рис. 10) [15]. Согласно этой модели, высокие значения диэлектрической проницаемости Ni-Zn-ферритов, обладающих полупроводниковой электропроводностью, должны сохранять диэлектрические свойства границ зерен. В случае, когда электросопротивление зернограницных прослоек ферритов на несколько порядков превышает электросопротивление зёрен, границы зёрен формируют барьерные емкости (C_i) [25]:

$$C_i = \varepsilon_0 \varepsilon_r D^2 / d, \quad (7)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε_r – проницаемость зернограницной прослойки; D – средний размер зерна; d – толщина зернограницной прослойки.

Для упрощения расчета диэлектрической проницаемости оценивается емкость феррита в форме куба с размером ребра L , расположенного между медными пластинами (рис. 10а). Ёмкость системы [25]:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_\phi L^2 / L = \varepsilon_0 \varepsilon_\phi L, \quad (8)$$

где: ε_ϕ – диэлектрическая проницаемость феррита.

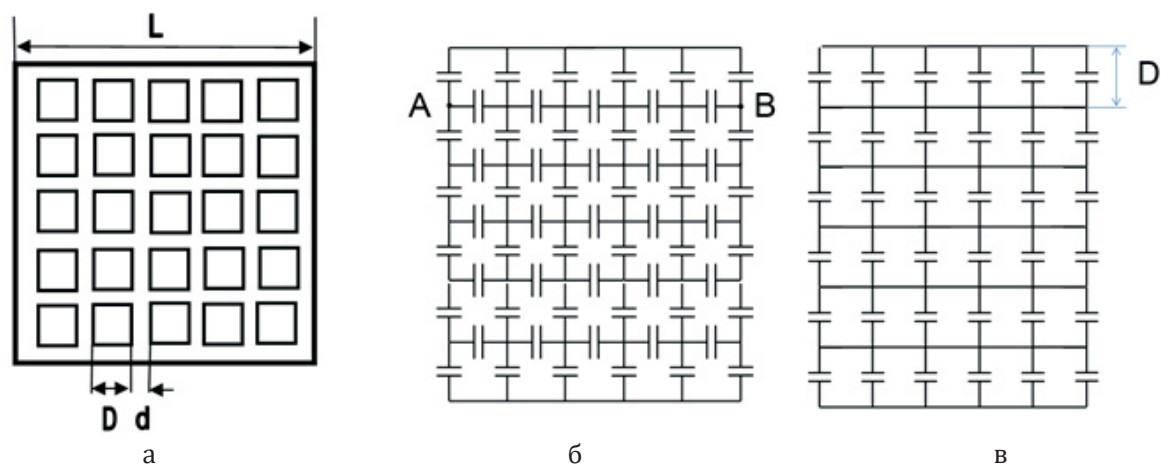


Рис. 10. Модель микроструктуры феррита и соответствующие ей эквивалентные схемы конденсаторов.

Модель структуры на рис. 10а можно заменить эквивалентными схемами конденсаторов (рис. 10б и 10в) [25]. С учетом примерного равенства потенциалов точек А и В можно показать, что диэлектрическая проницаемость ферритов зависит от диэлектрической проницаемости зернограницной фазы и параметров микроструктуры:

$$\varepsilon_{\phi} = \varepsilon_r \cdot D/d. \quad (9)$$

Крупнозернистая структура и высокая диэлектрическая проницаемость зернограничных прослоек определяют высокие значения диэлектрической проницаемости ферритов [38]. Следовательно, для увеличения диэлектрической проницаемости в ферритах необходимо увеличить средний размер зёрен (рис. 11), уменьшить толщину границ зёрен и увеличить диэлектрическую проницаемость зёрнограничной фазы.

В [41] показано, что введение в состав Ni-Zn-ферритового порошка со средним размером частиц 2–5 мкм, 0.5–1% масс. крупных фракций частиц феррита соответствующего состава размером 60–200 мкм, полученных измельчением спеченных изделий, приводит к размытию пика, соответствующего резонансу доменных стенок. Это можно объяснить формированием разнотермической микроструктуры (рис. 12).

Установлено [42], что введение оксида висмута в порошок феррита перед спеканием приводит к образованию легкоплавкой эвтектики выше 800 °С, что активирует процессы массопереноса и формирует крупнозернистую структуру. Это увеличивает диэлектрическую проницаемость феррита.

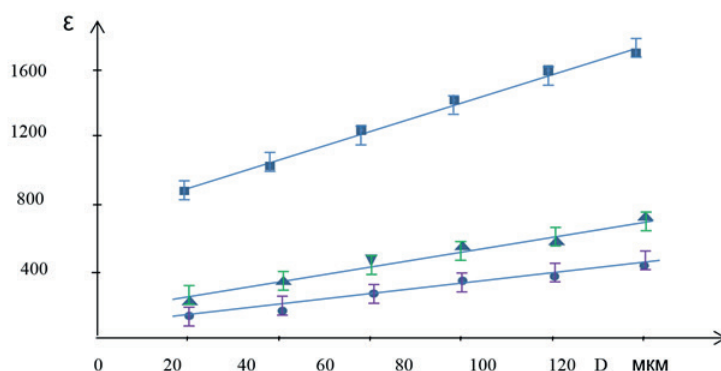


Рис. 11. Зависимость диэлектрической проницаемости феррита $\text{Ni}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Fe}_2\text{O}_4$ от размера зерен при $f = 1$ МГц.

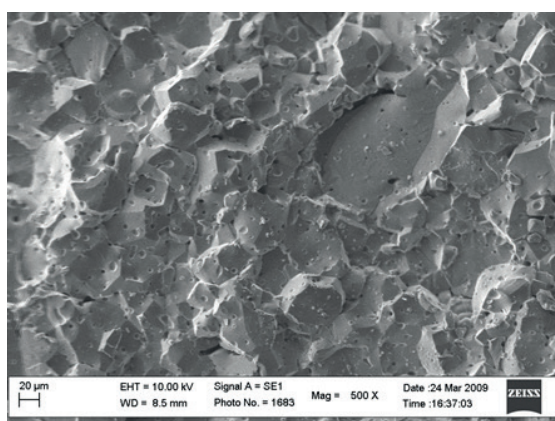


Рис. 12. Микроструктура $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита, полученного предварительным введением в шихту перед спеканием крупных частиц феррита размером 60–200 мкм.

В [42] показано, что количество оксида висмута не должно превышать 1 масс. %. При более высоких количествах происходит снижение уровня параметров.

Возрастание уровня поглощения в Ni-Zn-ферритах, содержащих более 50 моль. % Fe_2O_3 и легированных оксидом висмута [42] (рис. 13), можно объяснить формированием

крупной разнотернистой структуры с определенной электропроводностью зерен и тонкими светлыми прослойками из оксида висмута (рис. 14 и 15), эффективно закрепляющими доменные границы по границам зерен. В этом случае возможен резонанс доменных стенок [38].

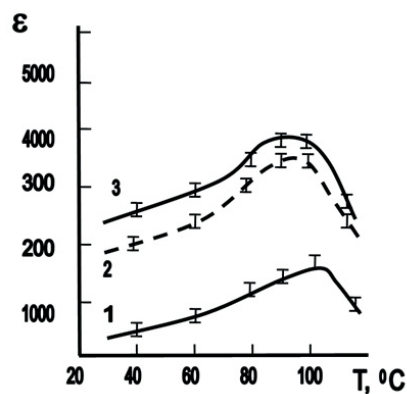


Рис. 13. Частотная зависимость коэффициента ослабления мощности отраженного сигнала от поверхности феррита $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$: 1 – 50 моль. % Fe_2O_3 и без добавок; 2 – с 50 моль. % Fe_2O_3 и 1 % масс. Bi_2O_3 ; 3 – с 52.4 моль. % Fe_2O_3 и 1 % масс. Bi_2O_3 .

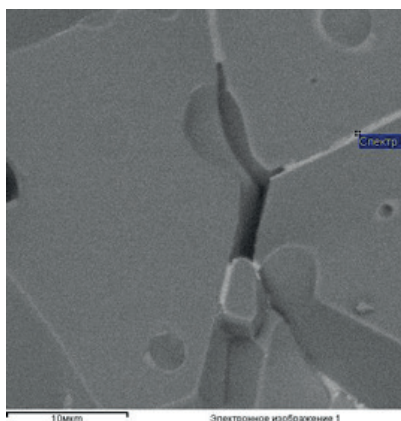


Рис. 14. Микроструктура $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ феррита, легированного 1 % масс. оксидом висмута.

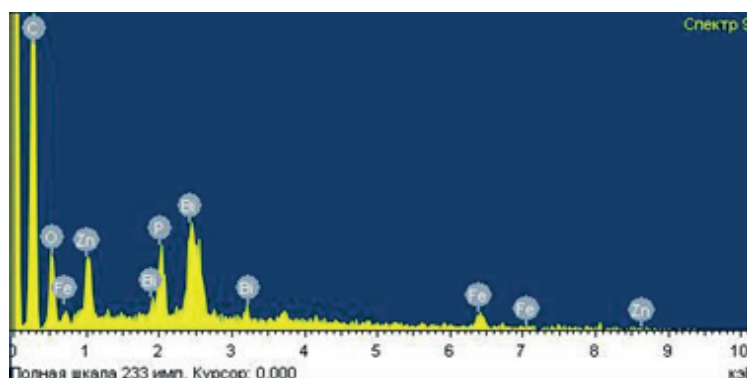


Рис. 15. Рентгеновские спектры зернограницной фазы феррита $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$, легированного 1% масс. оксидом висмута.

Исследования [43] показали, что зависимости магнитной и диэлектрической проницаемостей Ni-Zn-ферритов от частоты поля (рис. 16) обеспечивают минимум отражения от поверхности в широком частотном диапазоне.

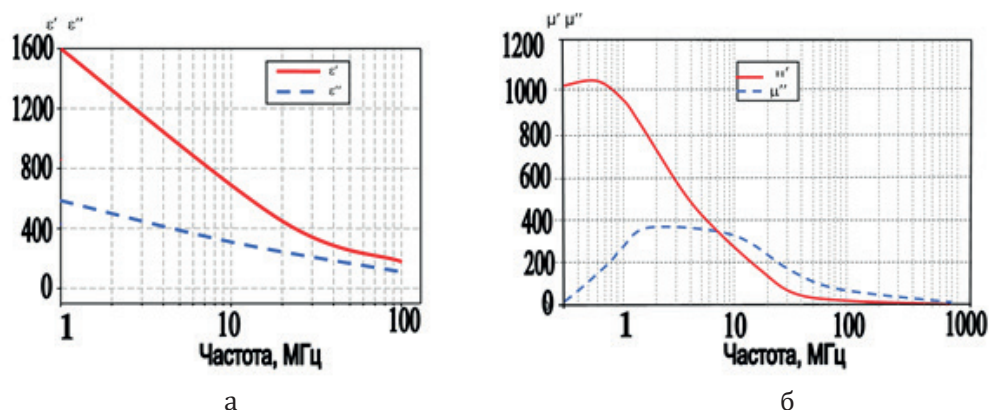


Рис. 16. Спектры ферритов $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$, полученных охлаждением после спекания в среде с пониженным парциальным давлением кислорода: а – комплексной диэлектрической проницаемости; б – комплексной магнитной проницаемости.

Толщина пластин [44], обеспечивающая минимум отражения в интервале 10–100 МГц, слабо зависит от частоты и составляет примерно 12 мм для образцов, спеченных в нормальной атмосфере и 6.5 мм для образцов, спеченных в среде с пониженным парциальным давлением кислорода (рис. 17).

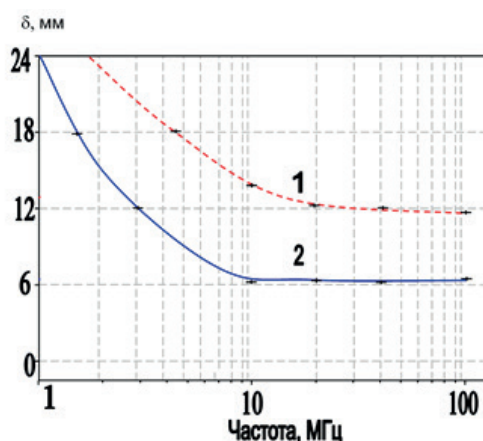


Рис. 17. Зависимости оптимальной толщины пластин феррита $\text{Ni}_{0.32}\text{Zn}_{0.68}\text{Fe}_2\text{O}_4$ от частоты, обеспечивающей условие ослабления отражения излучения более 15 дБ: 1 – спекание и последующее охлаждение в воздушной среде; 2 – спекание в воздушной среде и охлаждение в среде с пониженным парциальным давлением кислорода

В работах [43, 44] были исследованы системы на основе Mn-Zn-ферритов, которые обладают высокими значениями магнитной проницаемости более 2000 и диэлектрической проницаемости более 50 000. Следовательно, показатель преломления Mn-Zn-ферритов $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ будет больше Ni-Zn, а длина волны в ферритовой пластине – меньше.

Возрастание диэлектрической проницаемости Mn-Zn-ферритов до 200 °С, близкой к температуре Кюри, как и в случае Ni-Zn-ферритов можно объяснить ослаблением энергии обменного взаимодействия (рис. 18 и 19) [44].

Однако [43, 44], Mn-Zn-ферриты из-за низкого электросопротивления не могут быть использованы в качестве радиопоглощающего материала. Для повышения электросопротивления до 1–10 кОм·м Mn-Zn-ферриты легировали оксидами висмута и титана [44].

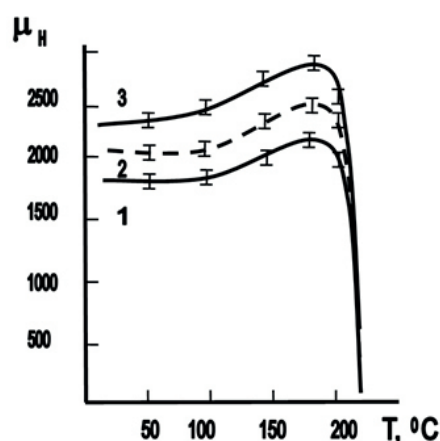


Рис. 18. Температурные зависимости магнитной проницаемости феррита $\text{Mn}_{0.602}\text{Zn}_{0.274}\text{Fe}_{0.124}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при частоте 100 кГц: 1 – 1280; 2 – 1310; 3 – 1340 °С.

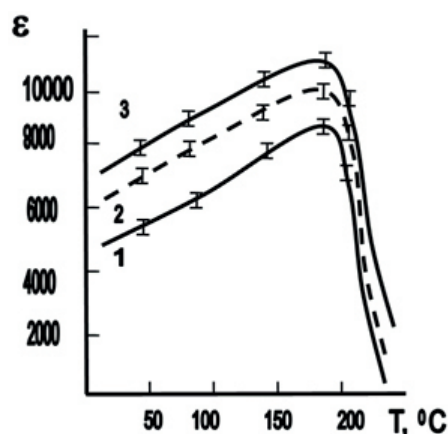


Рис. 19. Влияние температуры спекания на температурную зависимость диэлектрической проницаемости феррита $\text{Mn}_{0.602}\text{Zn}_{0.274}\text{Fe}_{0.124}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при частоте 100 кГц: 1 – 1280; 2 – 1310; 3 – 1340 °С.

Высокие значения магнитной и диэлектрической проницаемостей в Mn-Zn-ферритах, содержащих оксид железа 50.5–51.0 моль. % и легированных оксидом висмута, обладающих повышенным электросопротивлением зерен и крупной разнотелистой структурой с тонкими прослойками из оксида висмута, обеспечивают эффективное поглощение излучения (рис. 20) в интервале частот от 10 МГц до 100 МГц [44, 45].

Установлено, что наиболее эффективными оказались добавки TiO_2 (рис. 20). Добавки 4-х валентного титана, как и в случае ранее исследованных ферритов, приводят к связыванию ионов Fe^{2+} вдоль границ зерен [45]. Граница зерна будет иметь очень высокое значение электросопротивления по сравнению с глубиной зерна. Кроме этого, добавки TiO_2 формируют зернограницные прослойки с высокой диэлектрической проницаемостью.

В случае Mn-Zn-ферритов, как и в случае Ni-Zn-ферритов, структура с электропроводящими зернами и границами зерен с высоким электросопротивлением и диэлектрической проницаемостью способствует получению материала с высокой диэлектрической проницаемостью в целом [45]. Это объясняет возрастание уровня поглощения в интервале частот от 10 МГц до 100 МГц в Mn-Zn-ферритах, имеющих избыток оксида железа сверх стехиометрии и легированных оксидом титана.

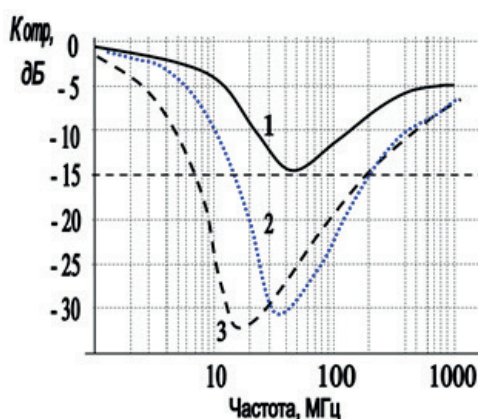


Рис. 20. Зависимость коэффициента ослабления мощности отраженного излучения Mn-Zn-феррита базового состава $\text{Mn}_{0.602}\text{Zn}_{0.274}\text{Fe}_{0.124}\text{Fe}_2\text{O}_4$:
1 – без добавок; 2 – с 1 % масс. оксида висмута; 3 – с 0.5 % масс. оксида титана.

4. Основные выводы

Проведенные исследования показали, что среди радиопоглощающих материалов в мегагерцовом диапазоне частот перспективными являются поликристаллические ферриты с высокими значениями магнитной и диэлектрической проницаемостей, получаемые по керамической технологии. На основе этих ферритов изготавливаются радиопоглощающие покрытия малой толщины (менее 10 мм), эффективные в мегагерцовом диапазоне излучения. Исследования показывают, что ослабление мощности отраженного от поверхности феррита электромагнитного излучения обусловлено как интерференционными процессами, так и процессами диссипации электромагнитной энергии при распространении в феррите. Обратно пропорциональная связь между показателем преломления и частотой электромагнитного излучения в мегагерцовом диапазоне обеспечивает условие интерференционного минимума отраженного излучения при постоянстве толщины ферритовых покрытий. Высокий показатель преломления обеспечивает замедление скорости распространения электромагнитных волн в ферритах, что усиливает процессы диссипации их энергии.

В работе рассмотрены результаты изучения отечественных и зарубежных исследователей, в том числе авторов статьи, влияния базового химического состава ферритов, легирующих добавок, параметров микроструктуры и технологических режимов измельчения порошков, режимов спекания на их магнитную и диэлектрическую проницаемости. Исследования, проведенные Шольц Н.Н., Пискаревым К.А. и Покусиним Д.Н., показали, что высокие значения диэлектрической проницаемости ферритов обеспечиваются сочетанием диэлектрических свойств зернограницных прослоек и полупроводниковых свойств самих зерен, формирующих барьерную емкость границ зерен согласно механизму Окадзаки. Исследования Бибикова С.Б., Костишина В.Г. и Вергазова Р.М. показали, что, контролируя избыток оксида железа сверх стехиометрии и газовую среду в атмосфере печи спекания, можно обеспечить полупроводниковые свойства зерен феррита. Согласно работам Андреева В.Г., Бибикова С.Б., Меньшовой С.Б., легирование ферритов оксидами TiO_2 , Bi_2O_3 , CaO в количестве до 1 масс. % позволяет повысить электросопротивление и диэлектрическую проницаемость зернограницных прослоек, обеспечивая повышение диэлектрической проницаемости феррита в целом. По результатам большинства исследований

установлено, что формирование плотной крупнозернистой структуры обеспечивает повышение как магнитной, так и диэлектрической проницаемостей.

Работа выполнена за счет средств государственного контракта № П953 от 27 мая 2010 г. и соглашения РНФ № 19-19-00694 от 06 мая 2019 г.

Литература:

1. Кривошеин Д.А., Муравей Л.А., Роева Н.Н., Шорина О.С., Эриашвили Н.Д., Юровицкий Ю.Г., Яковлев В.А. Экология и безопасность жизнедеятельности: Учеб. пособие для вузов, под ред. Л.А. Муравья. М.: ЮНИТИ-ДАНА; 2000. 447 с.
2. Буриченко Л.А. Охрана труда в гражданской авиации: Учеб. для вузов. М.: Транспорт; 1993. 288 с.
3. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С.В. Физические основы технологии STEALTH. СПб: ВВМ; 2007. 284 с. ISBN 5-9651-0240-2
4. Foxwell D., Jaxen D. Stealth approach: creating stealth ships. *Jane's IDR (International Defense Review)*. 1988;31:43-45, 47-48.
5. Wang J., Lu L. Microwave Absorbing Features of $\text{Ce}_2(\text{Co}_{0.3}\text{Fe}_{0.7})_{17}$ /Ferrite Coating Material. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*. 2019;29(1):39-44. <https://doi.org/10.18280/rcma.290107>
6. Akinay Y., Hayat F., Colak B. Absorbing properties and structural design of PVB/ Fe_3O_4 nanocomposite. *Mater. Chem. Phys.* 2019;229:460-466. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.03.039>
7. Druv P., Pullar R., Singh C., Carvalho F. Design and development of Ga-substituted Z-type hexaferrites for microwave absorber applications: Mössbauer, static and dynamic properties. *Ceram. Int.* 2020;47(1):1145-1162. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.231>
8. Айзикович Б.В., Алексеев А.Г., Клиодт М.Ф., Старостин А.П. Теоретические основы создания радиопоглощающих покрытий на основе наноструктурированных материалов. *Труды ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова*. 2006;30(314):136-145.
9. Штагер Е.А. Отражение радиоволн от кораблей и других морских объектов. Санкт-Петербург: ВВМ; 2005. 418 с. ISBN 5-9651-0041-8
10. Kumar A., Singh S. Development of Coatings for Radar Absorbing Materials at X-band. *IOP Conf. Series Materials Science and Engineering*. 2018;330:012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012006>
11. Вызулин С.А., Каликинцев Д.А., Мирошниченко Е.Л., Бузько В.Ю., Горячко А.И. Радиопоглощающие свойства никель-цинковых ферритов, синтезированных различными способами. *Изв. РАН. Серия физическая*. 2018;82(8):1045-1047. <https://doi.org/10.1134/S0367676518080434>
12. Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Особенности интерференции при отражении электромагнитных волн от ферритовых пластин на металлической подложке. В: *Актуальные проблемы науки: сб. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф.* Пенза: Типография ИП Соколов А.Ю.; 2014. С. 215-219.
13. Шольд Н.Н., Пискарев К.А. Ферриты для радиочастот. Л.: Энергия, 1966. 324 с.
14. Бибииков С.Б., Титов А.Н., Черепанов А.К. Синтез материала с заданным коэффициентом отражения в широком диапазоне частот и углов падения. Труды XV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж: Изд. НПФ «Саквое»; 2009. С. 1578-1584.
15. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков: пер. с яп. М.: Энергия; 1976. 336 с.
16. Вергазов Р.М. Влияние легирующих добавок на диэлектрическую проницаемость Ni-Zn ферритов. *Актуальные проблемы науки: сб. ст. XIII Междунар. науч.-практ. конф.* Пенза: Изд-во ПГУ; 2018. С. 235-240.
17. Детлаф А.А., Яворский В.М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. М.: Академия; 2008. 719 с. ISBN 978-5-7695-4875-8
18. Garner L., Franchois A., Hugonin J., Pichot C., Joachimowicz N. Microwave imaging-complex permittivity reconstruction by simulated annealing. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1991;39(11):1801-1807. <https://doi.org/10.1109/22.97480>
19. Покусин Д.Н., Чухлебов Э.А., Залесский М.Ю. Комплексная магнитная проницаемость ферритов в области естественного ферромагнитного резонанса. *Радиотехника и электроника*. 1991;36(11):2085-2091.
20. Ранкис Г.Ж. Динамика намагничивания поликристаллических ферритов. Рига: Зинатне; 1981. 186 с.
21. Летюк Л.М., Журавлев Г.И. Химия и технология ферритов. Л.: Химия; 1983. 256 с.
22. Анциферов В.Н., Летюк Л.М., Андреев В.Г., Гончар А.В., Дубров А.Н., Костишин В.Г., Майоров В.Р., Сатин А.И. Проблемы порошкового материаловедения. Часть 5. Технология производства порошковых ферритовых материалов. Екатеринбург: УрО РАН; 2005. 408 с.
23. Анциферов В.Н., Гончар А.В., Андреев В.Г., Летюк Л.М. Водорастворимые связующие вещества в технологии порошковых ферритовых материалов. Пермь: Респ. инженер.-техн. центр порошковой металлургии: Перм. гос. техн. ун-т; 1996 (1997). 188 с. ISBN 5-88151-112-3

24. Анциферов В.Н., Андреев В.Г., Гончар А.В. и др. Реология дисперсных систем в технологии функциональной магнитной керамики. Екатеринбург: УРО РАН; 2003. 208 с.
25. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Бибииков С.Б., Подгорная С.В., Морченко А.Т. Влияние микроструктуры на свойства радиопоглощающих Ni-Zn-ферритов. *Известия вузов. Материалы электронной техники*. 2010;4:18-21.
26. Меньшова С.Б., Лапшин Э.В., Бибииков С.Б., Прокофьев М.В., Вергазов Р.М. Влияние параметров микроструктуры на радиофизические характеристики Ni-Zn ферритовых материалов. *Известия вузов. Поволжский регион. (Технические науки)*. 2010;3(15):123-134.
27. Вергазов Р.М., Костишин В.Г., Андреев В.Г., Морченко А.Т., Комлев А.С., Николаев А.Н. Влияние легирующих добавок на свойства радиопоглощающих Mg-Zn-ферритов, полученных методом радиационно-термического спекания. *Инженерный вестник Дона: электрон. науч. журн.* 2013;3(26):118.
28. Вергазов Р.М. Влияние добавок TiO₂ на радиопоглощающие свойства Mn-Zn ферритов. В: Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Пенза; 2016. Т. 2. С. 103-104.
29. Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Влияние легирующих добавок на температурную зависимость диэлектрической проницаемости Ni-Zn ферритов. Актуальные проблемы науки: сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Изд-во ПГУ; 2019. С. 161-166.
30. Макаров Б.В., Гильденблат Ш.Н. Влияние некоторых технологических факторов на плотность изделий из Mn-Zn ферритов. *Электронная техника. Серия 7*. 1971;2:37-44.
31. Макаров Б.В., Андреев В.Г., Летюк Л.М. Деформация гранул при сухом прессовании ферритовых прес-поршков. *Порошковая металлургия*. 1985;5:6-9.
32. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Бибииков С.Б., Морченко А.Т., Канева И.И., Майоров В.Р. Влияние технологических факторов на диэлектрическую проницаемость и радиопоглощающие характеристики никель-цинковых ферритов. *Известия вузов. Материалы электронной техники*. 2011;2:33-37.
33. Андреев В.Г., Меньшова С. Б. Влияние степени агрегированности порошков на процессы структурообразования и свойства высокопроницаемых Mn-Zn-ферритов. *Известия вузов. Поволжский регион. (Технические науки)*. 2007;3:143-149.
34. Летюк Л.М., Костишин В.Г., Гончар А.В. Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники. М.: МИСиС; 2005. 352 с. ISBN 5-87623-133-9
35. Andreev V.G., Menshova S.B., Klimov A.N., Vergazov R.M., Bibikov S.B., Prokofiev M.V. Influence of microstructure on properties of Ni-Zn ferrite radio-absorbing materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;394(1):1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.007>
36. Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Исследование температурной зависимости диэлектрической проницаемости радиопоглощающих Ni-Zn ферритов. *Актуальные проблемы науки: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф.* Кузнецк: Кузнецкий институт информационных и управленческих технологий; 2017. С. 152-154.
37. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Бибииков С.Б. Влияние легирующих добавок и газового режима атмосферы печи при спекании на поглощение электромагнитных волн Ni-Zn ферритами. *Труды VIII международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов»*. 9-10 июня 2011 г. Алматы. С. 521-530.
38. Andreev V.G., Menshova S.B., Klimov A.N., Vergazov R.M. The Influence of Basic Composition and Microstructures on the Properties of Ni-Zn Ferrite Radio-Absorbing Materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;393(1):569-573. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.030>
39. Kostishyn V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B., Morchenko A.T., Kaneva I.I., Maiorov V.R. Influence of Technological Factors on Dielectric Permeability and Radio-Wave Absorbing Characteristics of Nickel-Zinc Ferrites. *Russian Microelectronics*. 2012;41(8):469-473. <https://doi.org/10.1134/S1063739712080094>
40. Druv P., Meena S., Pullar R., Carvalho F. Investigation of structural, magnetic and dielectric properties of gallium substituted Z-type Sr₃Co_{2-x}Ga_xFe₂₄O₄₁ hexaferrites for microwave absorbers. *J. Alloy. Compd.* 2020;822:153470. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153470>
41. Меньшова С.Б., Бибииков С.Б., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Куликовский Э.И. Способ получения радиопоглощающего никель-цинкового феррита: Пат. 2486645. Россия. Заявка № 2011141352/07. заявл. 13.10.2011; опубл. 27.06.2013. Бюл. № 18.
42. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Подгорная С.В. Способ получения радиопоглощающего магний-цинкового феррита: Пат. 2454747 Россия. Заявка № 2011115700/07. заявл. 21.04.2011; опубл. 27.06.2012. Бюл. №18.
43. Костишин В.Г., Вергазов Р.М., Андреев В.Г., Бибииков С.Б. Исследование поглощения электромагнитных волн в композиционных материалах на основе порошков Mn-Zn-ферритов. *Труды IX Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов»*. Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет»; 2012. С. 619-627.
44. Вергазов Р.М., Андреев В.Г. Исследование радиопоглощающих свойств Mn-Zn ферритов. *Актуальные проблемы науки: материалы X Междунар. науч.-практ. конф.* Кузнецк: Кузнецкий институт информационных и управленческих технологий; 2015. С. 165-168.

References:

1. Krivoshein D.A., Muravei L.A., Roeva N.N., Shorina O.S., Eriashvili N.D., Yurovitskii Yu.G., Yakovlev V.A. *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti: Ucheb. posobie dlya vuzov* (Ecology and life safety: textbook for universities, (Ed.) L.A. Muravei. Moscow: YUNITI-DANA; 2000. 447 p. (in Russ.).
2. Burichenko L.A. *Okhrana truda v grazhdanskoi aviatsii: Ucheb. dlya vuzov* (Labor protection in civil aviation: Textbook for universities). Moscow: Transport; 1993. 288 p. (in Russ.).
3. Alekseev A.G., Shtager E.A., Kozyrev S.V. *Fizicheskie osnovy tekhnologii STEALTH* (Physical foundation of stealth technology). Sankt Peterburg: VVM.com Ltd Publishing; 2007; 284 p. (in Russ.). ISBN 5-9651-0240-2
4. Foxwell D., Jaxen D. Stealth approach: creating stealth ships. *Jane's IDR (International Defense Review)*. 1988;31 43-45, 47-48.
5. Wang J., Lu L. Microwave Absorbing Features of $\text{Ce}_2(\text{Co}_{0.3}\text{Fe}_{0.7})_{17}$ /Ferrite Coating Material. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*. 2019;29(1):39-44.
<https://doi.org/10.18280/rcma.290107>
6. Akinay Y., Hayat F., Colak B. Absorbing properties and structural design of PVB/ Fe_3O_4 nanocomposite. *Mater. Chem. Phys.* 2019;229:460-466.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.03.039>
7. Druv P., Pullar R., Singh C., Carvalho F. Design and development of Ga-substituted Z-type hexaferrites for microwave absorber applications: Mössbauer, static and dynamic properties. *Ceram. Int.* 2020;47(1):1145-1162.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.231>
8. Aizikov B.V., Alekseev A.G., Kliodt M.F., Starostin A.P. Theoretical foundations of the creation of radio-absorbing coatings based on nanostructured materials. *Trudy TsNII im. Akademika A.N. Krylova = Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2006;30(134):136-145 (in Russ.).
9. Shtager E.A. *Otazhenie radiovoln ot korablei i drugikh morskikh ob"ektov* (Reflection of radio waves from ships and other marine objects). St. Petersburg: VVM; 2005. 418 p. (in Russ.). ISBN 5-9651-0041-8
10. Kumar A., Singh S. Development of Coatings for Radar Absorbing Materials at X-band. *IOP Conf. Series Materials Science and Engineering*. 2018;330:012006.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012006>
11. Vyzulin S.A., Kalikintseva D.A., Miroshnichenko E.L., Buz'ko V.Yu., Goryachko A.I. Microwave absorption properties of nickel-zinc ferrites synthesized by different means. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018;82(8):943-945.
<https://doi.org/10.3103/S1062873818080439>
12. Vergazov R.M., Andreev V.G. Features of interference when electromagnetic waves reflected from ferrite plates on a metal substrate. In: Proceedings IX Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nye problemy nauki* (Actual problems of science). Penza: Sokolov A.Yu. Publishing House; 2014. P. 215-219 (in Russ.).
13. Shol'ts N.N., Piskarev K.A. *Ferrity dlya radiochastot* (Ferrites for radio frequencies). Leningrad: Energiya; 1966. 324 p. (in Russ.).
14. Bibikov S.B., Titov A.N., Cherepanov A.K. Synthesis of material with a given reflection coefficient in a wide range of frequencies and angles of incidence. In: *Trudy XV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'»*. (Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference «Radar, Navigation, Communication»). Voronezh: «Sakvoee» Publishing House; 2009. P. 1578-1584 (in Russ.).
15. Okadzaki K. *Tekhnologiya keramicheskikh dielektrikov: perevod s yaponskogo* (Technology of ceramic dielectrics). Moscow: Energiya; 1976. 336 p. (in Russ.).
[Orazaki K. Ceramic engineering for dielectrics. Tokyo; 1969.]
16. Vergazov R.M. Influence of alloying additions on the dielectric constant of Ni-Zn ferrites. In: Proceedings XIII Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nye problemy nauki = Actual problems of science*. Penza: PGU Publishing House; 2018. P. 235-240 (in Russ.).
17. Detlaf A.A., Yavorskii V.M. *Kurs fiziki: Ucheb. posobie dlya vtuzov* (Physics course: Textbook. Manual for technical colleges). Moscow: Akademiya; 2008. 719 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7695-4875-8
18. Garner L., Franchois A., Hugonin J., Pichot C., Joachimowicz N. Microwave imaging-complex permittivity reconstruction by simulated annealing. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 1991;39(11):1801-1807.
<https://doi.org/10.1109/22.97480>
19. Pokusin D.N., Chukhlevov E.A., Zalesskii M.Yu. Complex permeability ferrite in the natural ferromagnetic resonance. *Radiotekhnika i elektronika = Technology and Electronics*. 1991;36(11):2085-2091 (in Russ.).
20. Rankis G.Zh. *Dinamika namagnichivaniya polikristallicheskih ferritov* (Dynamics of magnetization of polycrystalline ferrites). Riga: Zinatne; 1981. 186 p. (in Russ.).
21. Letyuk L.M., Zhuravlev G.I. *Khimiya i tekhnologiya ferritov* (Ferrite chemistry and technology). Leningrad: Khimiya; 1983. 256 p. (in Russ.).
22. Antsiferov V.N., Letyuk L.M., Andreev V.G., Gonchar A.V., Dubrov A.N., Kostishin V.G., Maiorov V.R., Satin A.I. *Problemy poroshkovogo materialovedeniya. Chast' 5. Tekhnologiya proizvodstva poroshkovykh ferritovykh materialov* (Problems of powder materials science. Part 5. Technology of production of ferrite powder materials). Ekaterinburg: URO RAN Publ.; 2005. 408 p. (in Russ.).

23. Antsiferov V.N., Gonchar A.V., Andreev V.G., Letyuk L.M. *Vodorastvorimye svyazuyushchie veshchestva v tekhnologii poroshkovykh ferritovykh materialov* (Water-soluble binders in the technology of ferrite powder materials). Perm': Resp. inzhener.-tekh. tsentr poroshkovoy metallurgii: Perm National Research Polytechnic University Publishing House; 1996 (1997). 188 p. (in Russ.). ISBN 5-88151-112-3
24. Antsiferov V.N., Andreev V.G., Gonchar A.V. et al. *Reologiya dispersnykh sistem v tekhnologii funktsional'noi magnitnoi keramiki* (Rheology of dispersed systems in the technology of functional magnetic ceramics). Ekaterinburg: URO RAN Publ.; 2003. 208 p. (in Russ.).
25. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B., Podgornaya S.V., Morchenko A.T. Effect of microstructure on properties of radio-absorbing nickel-zinc ferrites. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2010;4:18-21 (in Russ.).
26. Men'shova S.B., Lapshin E.V., Bibikov S.B., Prokofev M.V., Vergazov R.M. Influence of microstructure parameters on the radiophysical characteristics of Ni-Zn ferrite materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Povolzhskii region. (Tekhnicheskie nauki) = University Proceedings. Volga region. (Technical sciences)*. 2010;3(15):123-134 (in Russ.).
27. Vergazov R.M., Kostishin V.G., Andreev V.G., Morchenko A.T., Komlev A.S., Nikolaev A.N. Influence of alloying additives on the properties of radio-absorbing Mg-Zn-ferrites obtained by the method of radiation-thermal sintering. *Inzhenernyi vestnik Dona: elektron. nauch. zhurn. = Engineering J. of Don: electronic scientific journal*. 2013;3(26):118 (in Russ.).
28. Vergazov R.M. Influence of TiO₂ additives on the radio-absorbing properties of Mn-Zn ferrites. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. Penza; 2016. V. 2. P. 103-104 (in Russ.).
29. Vergazov R.M., Andreev V.G. The influence of alloying additives on the temperature dependence of the dielectric constant of Ni-Zn ferrites. In: Proceedings XV Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nyye problemy nauki = Actual problems of science*. Penza: PGU Publishing House; 2019. P. 161-166 (in Russ.).
30. Makarov B.V., Gil'denblat Sh.N. Influence of some technological factors on the density of products from Mn-Zn ferrites. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 7 = Electronic Engineering. Series 7*. 1971;2:37-44 (in Russ.).
31. Makarov B.V., Andreev V.G., Letyuk L.M. Deformation of granules during dry pressing of ferrite press-powders. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy*. 1985;5:6-9 (in Russ.).
32. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B., Morchenko A.T., Kaneva I.I., Maiorov V.R. The influence of technology factors on the dielectric permeability and radio absorbing characteristics of nickel-zinc ferrites. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2011;2:33-37 (in Russ.).
33. Andreev V.G., Menshova S.B. Influence of the degree of aggregation of powders on the processes of structure formation and properties of highly permeable Mn – Zn ferrites. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Povolzhskii region. (Tekhnicheskie nauki) = University Proceedings. Volga region. (Technical sciences)*. 2007;3:143-149 (in Russ.).
34. Letyuk L.M., Kostishin V.G., Gonchar A.V. *Tekhnologiya ferritovykh materialov magnitoelektronik* (Ferrite materials technology for magnetoelectronics). Moscow: MISiS Publishing House; 2005. 352 p. (in Russ.). ISBN 5-87623-133-9
35. Andreev V.G., Menshova S.B., Klimov A.N., Vergazov R.M., Bibikov S.B., Prokofiev M.V. Influence of microstructure on properties of Ni-Zn ferrite radio-absorbing materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;394(1):1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.007>
36. Vergazov R.M., Andreev V.G. Investigation of the temperature dependence of the dielectric constant of radio-absorbing Ni-Zn ferrites. In: Proceedings XII Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nyye problemy nauki = Actual problems of science*. Kuznetsk: KIIUT Publishing House; 2017. P. 152-154 (in Russ.).
37. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B. Influence of alloying additives and the gas regime of the furnace atmosphere during sintering on the absorption of electromagnetic waves by Ni-Zn ferrites. In: Proceedings of the VIII international conference «Perspektivnyye tekhnologii, oborudovaniye i analiticheskiye sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov» = «Advanced Technologies, Equipment and Analytical Systems for Materials Science and Nanomaterials». June 9-10, 2011. Almaty. P. 521-530 (in Russ.).
38. Andreev V.G., Menshova S.B., Klimov A.N., Vergazov R.M. The Influence of Basic Composition and Microstructures on the Properties of Ni-Zn Ferrite Radio-Absorbing Materials. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;393(1):569-573. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.06.030>
39. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B., Morchenko A.T., Kaneva I.I., Maiorov V.R. Influence of Technological Factors on Dielectric Permeability and Radio-Wave Absorbing Characteristics of Nickel-Zinc Ferrites. *Russian Microelectronics*. 2012;41(8):469-473. <https://doi.org/10.1134/S1063739712080094>
40. Druv P., Meena S., Pullar R., Carvalho F. Investigation of structural, magnetic and dielectric properties of gallium substituted Z-type Sr₃Co_{2-x}Ga_xFe₂₄O₄₁ hexaferrites for microwave absorbers. *J. Alloy. Compd.* 2020;822:153470. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153470>
41. Men'shova S.B., Bibikov S.B., Vergazov R.M., Andreev V.G., Kulikovskii E.I. Method of producing radio-absorbing nickel-zinc ferrite: Pat. 2486645 Russia. Publ. 27.06.2013. Bul. № 18 (in Russ.).

42. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Podgornaya S.V. Method for producing radio-absorbing magnesium-zinc ferrite: Pat. 2454747 Russia. Publ. 27.06.2012. Bul. № 18 (in Russ.).

43. Kostishin V.G., Vergazov R.M., Andreev V.G., Bibikov S.B. Investigation of the absorption of electromagnetic waves in composite materials based on Mn-Zn-ferrite powders. In: Proceedings of the IX international conference «*Perspektivnyye tekhnologii, oborudovaniye i analiticheskiye sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov*» = «*Advanced Technologies, Equipment and Analytical Systems for Materials Science and Nanomaterials*». Astrakhan: Astrakhan University Publishing House; 2012. P. 619-627 (in Russ.).

44. Vergazov R.M., Andreev V.G. Investigation of the radio-absorbing properties of Mn-Zn ferrites. In: Proceedings X Int. Sci.-Pract. Conf. *Aktual'nyye problemy nauki = Actual problems of science*. Kuznetsk: KIIUT Publishing House; 2015. P. 165-168 (in Russ.).

Об авторах:

Костишин Владимир Григорьевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент Академии Инженерных Наук Российской Федерации, профессор, заведующий кафедрой технологии материалов электроники Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов» (119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4).

Вергазов Рашид Мунирович, преподаватель, ГАПОУ Пензенской области «Кузнецкий колледж электронных технологий» (442530, Россия, Пензенская обл., г. Кузнецк, ул. Комсомольская, д. 34а).

Меньшова Светлана Борисовна, кандидат технических наук, учитель математики и физики ГБОУ школа № 962 (127562, Россия, Москва, Алтуфьевское шоссе, д. 30А).

Исаев Игорь Магомедович, кандидат технических наук, доцент, проректор по безопасности и общим вопросам Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов» (119049, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 4).

About the authors:

Vladimir G. Kostishin, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Corresponding Member of the Academy of Engineering Sciences of the Russian Federation, Professor, Head of the Department of Technology of Electronics Materials, National Research Technological University "Moscow Institute of Steel and Alloys" (4, Leninsky Pr., Moscow, 119049, Russia).

Rashit M. Vergazov, teacher, GAPOU of the Penza region «Kuznetsk College of Electronic Technologies» (34a, Komsomolskaya ul., Penza Region, Kuznetsk, 442530, Russia).

Svetlana B. Menshova, Cand. Sci. (Engineering), teacher of mathematics and physics, GBOU school №962 (30A, Altufevskoe shosse, Moscow, 127562, Russia).

Igor M. Isaev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Vice-Rector for Security and General Affairs of the National Research Technological University "Moscow Institute of Steel and Alloys" (4, Leninsky Pr., Moscow, 119049, Russia).

Поступила: 25.09.2020; получена после доработки: 15.10.2020; принята к опубликованию: 30.10.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-109-120>



УДК 004.94

Моделирование наноантенн для их дальнейшего применения в качестве устройств приема-передачи данных на 3D-интегральных схемах

**Д.А. Серов[@],
Х.В. Першина,
И.В. Бурдина**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия
[@]Автор для переписки, e-mail: d.serov589@gmail.com

В статье описано применение оптических наноконструкций для использования в компьютерных и информационных системах. На основе анализа выявлено, что усовершенствование существующих наноконструкций позволит реализовать их полный потенциал. Это касается и наноантенн, которые могут найти применение в области создания линий связи на платах устройств в качестве приборов приема-передачи данных. Наноантенны являются перспективными устройствами, которые успешно применяются в современных устройствах микроскопии. Однако с недавних пор оптические антенны начали внедрять в приборы, используемые и в других сферах жизни человека. В результате применение данной технологии может привести к увеличению скорости и объема передачи данных между компонентами интегральной схемы, что, в свою очередь, повысит качество и скорость проведения расчетов при сложных вычислениях. Предложена технология моделирования, а также проведены расчеты необходимых геометрических параметров, которые будут подходить под заданные данной работой цели. На основе предложенной технологии разработаны четыре модели наноантенн, отвечающие необходимым требованиям. Две из них реализованы на основе ранее предложенных аналогов антенн – «галстук-бабочка» и С-антенна, две другие являются оригинальными разработками. Проведены расчеты созданных трехмерных моделей наноантенн. Рассмотрена модификация одной из оптических антенн для изучения влияния из-

менения общих геометрических размеров на ее передаточные характеристики. В результате исследования выявлена модель, имеющая наиболее сбалансированные параметры, подходящие для ее дальнейшего применения в качестве основного устройства приема-передачи данных в трехмерных интегральных схемах.

Ключевые слова: оптические наноконпоненты, наноантенны, приборы приема-передачи данных, передача сигнала, разработка моделей, диаграмма направленности антенны.

Для цитирования: Серов Д.А., Першина Х.В., Бурдина И.В. Моделирование наноантенн для их дальнейшего применения в качестве устройств приема-передачи данных на 3D-интегральных схемах. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):109-120. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-109-120>

Nanoantenna modelling for their further use as data transmitter-receiver devices on 3-d integral circuits

Dmitry A. Serov[@],
Khristina V. Pershina,
Irina V. Burdina

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
^{@Corresponding author, e-mail: d.serov589@gmail.com}

This article describes the application of optical nanocomponents for their further use in computer and information systems. It was found on the basis of the analysis that the improvement of existing nanocomponents will allow to realize their full potential, as well as to find the use of nanoantennas in the field of creating communication lines on device boards as devices for receiving and transmitting data. Nanoantennas are promising devices that are already successfully used in modern microscopy devices. However, recently, optical antennas have begun to be applied in devices used in other areas of human life. As a result, the use of this technology can lead to an increase in the speed and volume of data transfer between the components of the integrated circuit. This, in turn, will increase the quality and speed of calculations in complex equations. A modeling technology has been proposed, and calculations of the necessary geometric parameters have been made, which will be suitable for the goals set by this work. On the basis of the proposed technology, four models that meet the required parameters have been developed. Calculations of the created three-dimensional models of nanoantennas have been performed. As a result of the study, a model has been identified that has the most balanced parameters suitable for its further use as the main device for receiving and transmitting data on three-dimensional integrated circuits.

Keywords: optical nanocomponents, nanoantennas, devices for receiving and transmitting data, signal transmission, model development, antenna directivity pattern.

For citation: Serov D.A., Pershina K.V., Burdina I.V. Nanoantenna modelling for their further use as data transmitter-receiver devices on 3-d integral circuits. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):109-120 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-109-120>

Введение

Одной из современных и главных задач нанопотоники является применение оптических наноконструкций в интегральных схемах и компьютерных и информационных системах. Однако до сих пор отсутствуют источники света, подходящие под размеры чипа, и оптические усилители с большим диапазоном длин волн и высокой энергетической эффективностью, а также комплекты, позволяющие осуществлять высокоскоростную модуляцию света [1]. Основным устройством, способным помочь создать подобные структуры, являются нанопотонные антенны.

Нанопотонные антенны являются перспективным устройством для дальнейшего развития современных технологий. Они применяются в различных сферах жизни человека [2–5], особенно в медицине [6], например, в качестве сенсоров молекул вируса [7]. Однако, несмотря на все это, до сих пор не реализован полный потенциал данных нанопотонных устройств. Дальнейшим путем их развития может стать создание линий связи на платах вычислительных устройств с нанопотонными антеннами в качестве приборов приема-передачи данных. Это станет существенным улучшением уже применяемых классических технологий [8].

Чтобы получить полностью рабочее устройство и готовую структуру, которую возможно применять в различных приборах, требуется создать целый массив оптических антенн с заданными параметрами. Такие массивы можно применять для передачи данных в интегральных схемах, что приведет к улучшению их базовых характеристик, таких как скорость и объем передачи данных. Однако до сих пор нет разработанной топологии, которую можно было бы использовать для передачи сигнала. В связи с этим разработка подобных массивов является актуальной задачей, требующей детального рассмотрения [9–11].

Моделирование нанопотонных антенн

Для наиболее эффективной передачи сигнала в массиве нанопотонных антенн нужно выбрать их дизайн – подходящую геометрию структуры. Он зависит от основных характеристик, влияющих на качество приема и передачи данных. К их числу относятся направленность, эффективность и коэффициент пропускания.

Хорошая направленность излучения требуется для более точной передачи сигнала в массиве. В связи с этим качественная диаграмма направленности играет большую роль при моделировании и создании нанопотонных антенн. Степень концентрации излучения в некотором направлении диаграммы характеризуется коэффициентом направленности. Стандартное определение вычисляется по формуле:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi p(\theta, \varphi)}{P_{rad}},$$

где P_{rad} – полная мощность, излучаемая системой в дальнюю зону, $p(\theta, \varphi)$ – угловое распределение излучаемой мощности.

Большая эффективность требуется для нивелирования диссипативных потерь в материале элементов антенны. Эта величина определяется отношением мощности, излученной системой в дальнюю зону, к полной подведенной мощности:

$$\varepsilon_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}}.$$

Важным параметром также является S-параметр антенны. Он показывает общую степень рассеяния излучения в структуре антенны. Его минимальное значение на определенной частоте показывает, что на ней возникает резонанс, и, следовательно, происходит максимальное усиление сигнала.

Для расчета полного поля используется волновое уравнение:

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu_r(x, y)} \nabla \cdot \bar{E}_{(x, y, z)} \right) - k_0^2 \epsilon_r(x, y) \cdot \bar{E}_{(x, y, z)} = 0.$$

При моделировании определяется электромагнитное поле на поверхностях излучения с помощью **3D-Solver**, а затем вычисляется электрическое поле в дальней зоне, используя следующее уравнение:

$$E(x, y, z) = \oint ((i\omega\mu_0 H_{tan})G + (E_{tan} \nabla G) + (E_{norm} \nabla G))dK,$$

где K – поверхность излучения; G – функция Грина свободного пространства, равная:

$$G = \frac{e^{-Z_0|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|},$$

где $\vec{r}$ и $\vec{r}'$ – радиус-векторы, определяющие точку «наблюдения» (r) и точку на поверхности излучения (r'), соответственно.

Обобщенная S-матрица связывает амплитуды волн, падающих на входы многополюсника, которым в данном случае является структура наноантенны, с амплитудами отраженных волн. Под падающими волнами понимаются волны, бегущие к многополюснику, а под отраженными – бегущие от него. Например, одномодовая S-матрица для трехпортовой структуры имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix},$$

где S_{ij} – комплексные элементы матрицы рассеяния, a_i – амплитуда волны, падающей на вход с номером i , а b_i – амплитуда волны, отраженной от входа с номером i .

Определение S-матрицы, приведенное выше, не использует понятий характеристического сопротивления линии передачи или сопротивления порта, которое обычно совпадает с вышеуказанным сопротивлением линии, формирующей порт (вообще говоря, последнее условие необязательно, так как часто под портом понимают некоторую нагрузку, которая может иметь комплексное сопротивление, например, входное сопротивление усилителя). В то же время эти понятия оказываются полезными при моделировании элементов с сосредоточенными параметрами (диоды, транзисторы и т. д.), описание которых идет в терминах эквивалентных схем, токов и напряжений [12].

Расчетная часть

Расчет созданных трехмерных моделей наноантенн проводился с помощью программы, в основе которой лежит метод конечных разностей. Частота падающего излучения

варьировалась от 520 до 550 ТГц. Был выбран именно этот диапазон, соответствующий зеленому цвету видимого спектра, так как источник излучения сигнала на данных частотах требует гораздо меньше мощности для его генерации. Измерения проводились с шагом 0.1 ТГц. В качестве материала антенн рассматривалось золото (Au). Толщина кремниевых подложек составляла 500 нм. Были получены данные по 4 моделям антенн, трехмерные изображения которых приведены на рис. 1.

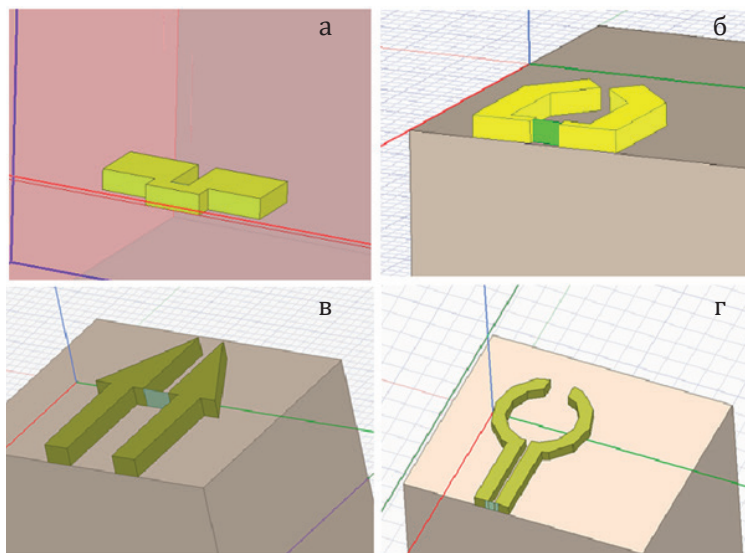


Рис. 1. Трехмерные модели nanoантенн, использующиеся при расчетах:
а – комплексная nanoантенна; б – модифицированная антенна типа «галстук-бабочка»;
в – антенна-стрелка; г – С-антенна.

Рассмотрим модель, представленную на рис. 1а. Она обладает следующими параметрами (рис. 2):

- Длина блоков – 39 нм;
- Ширина блоков – 30 нм;
- Высота блоков – 11 нм;
- Длина соединительной секции – 28 нм;
- Ширина соединительной секции – 10 нм;
- Высота соединительной секции – 11 нм.

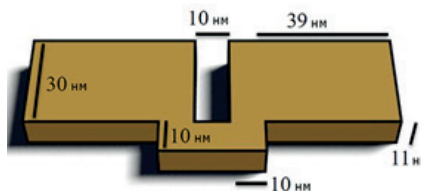


Рис. 2. Геометрические параметры nanoантенны 1а.

В итоге проведенного моделирования были получены результаты, представленные на рис. 3.

Можно видеть, что значение параметра S_{11} (параметр рассеивания излучения) достигает своего минимума при частоте излучения 524 ТГц и оно равно -1.20. Это означает, что при данной частоте возникает резонанс и происходит максимальное усиление сигнала. Коэффициент усиления принимает значение 5.8. По сравнению со стандартными антеннами, а также с патч-антеннами, где требуется усиление сигнала в десятки раз, получен-

ное значение данной модели весьма мало, однако поскольку передача сигнала требуется на расстояния, измеряемые в микрометрах, оно вполне приемлемо. При этом на диаграмме, показанной на рис. 3а, явно видна направленность излучения сигнала в определенном направлении, что говорит о хорошей геометрии выбранной модели антенны.

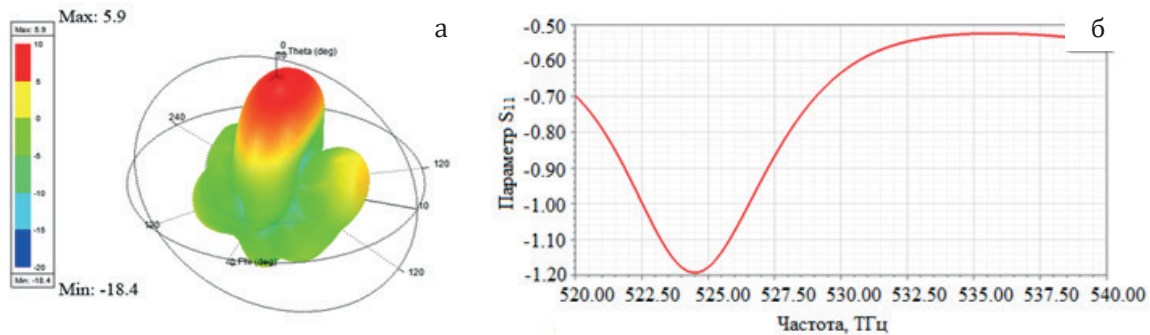


Рис. 3. Результаты моделирования антенны 1а:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты излучения.

Далее был проведен расчет антенны, представленной на рис. 1б (модификация антенны «галстук-бабочка»). Она обладает следующими геометрическими параметрами (рис. 4):

- Ширина блоков – 35 нм;
- Высота блоков – 25 нм;
- Длина основных блоков – 100 нм;
- Ширина нижней секции – 15 нм;
- Длина нижней секции – 30 нм;
- Расстояние между нижними секциями – 30 нм;
- Расстояние между верхними секциями – 10 нм.

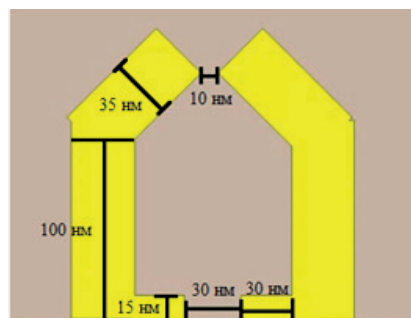


Рис. 4. Геометрические параметры антенны типа «галстук-бабочка».

Стандартная модель антенны была модифицирована посредством дополнительно проложенных направляющих областей, проходя через которые, сигнал должен получить хорошую направленность. Полученные в результате моделирования данные представлены на рис. 5.

Сравнивая полученные результаты для антенн 1а и 1б, можно увидеть существенные различия. Коэффициент усиления второй модели выше, чем у антенны 1а, и составляет 6.7. Однако диаграмма направленности показывает отсутствие конкретных направлений распространения излучения. Также различаются и резонансные частоты, что можно заметить по расположению точки минимума параметра S_{11} . Для второй антенны она соответствует значению 542.7 ТГц.

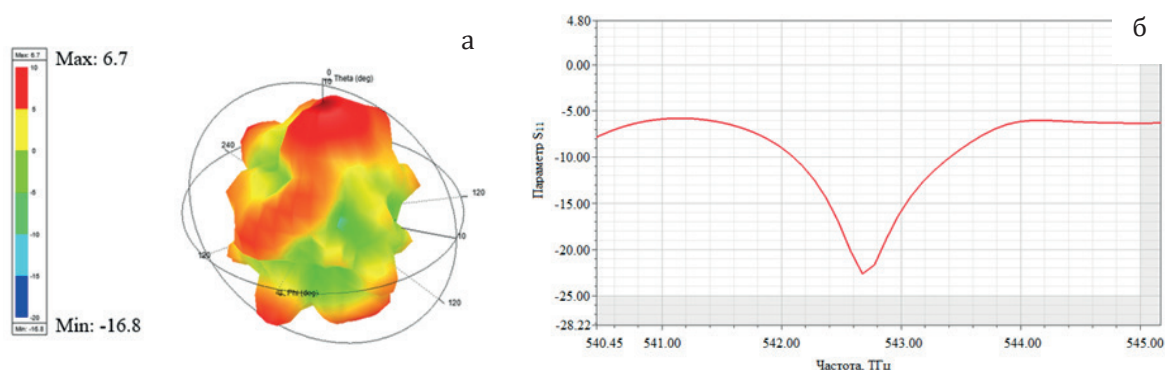


Рис. 5. Результаты моделирования антенны 1б:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты.

Далее была исследована антенна 1в. Она имеет следующие параметры:

- Длина направляющего блока – 80 нм;
- Ширина направляющего блока – 35 нм;
- Высота направляющего блока – 25 нм;
- Длина горизонтального катета верхнего треугольника – 60 нм;
- Длина вертикального катета верхнего треугольника – 80 нм;
- Расстояние между треугольниками – 20 нм;
- Расстояние между направляющими блоками – 60 нм.

Результаты моделирования представлены на рис. 6.

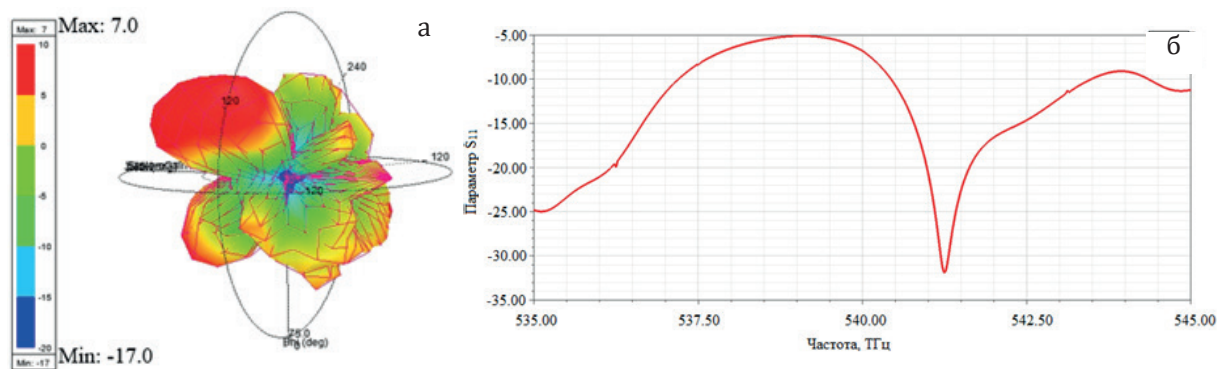


Рис. 6. Результаты моделирования антенны 1в:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты.

Можно отметить положительную динамику в формировании диаграммы направленности по сравнению с данными, полученными для антенны 1б. Имеется явно выраженное направление распространения излучения. При этом коэффициент усиления наноантенны с текущими геометрическими параметрами выше коэффициента усиления антенны 1а и равен 7.0.

Произошло также смещение пика параметра S_{11} . Коэффициент усиления сигнала принимает свое максимальное значение при частоте падающего излучения 541.3 ГГц.

Далее было проведено исследование антенны 1г. Она является модификацией антенны, ранее рассмотренной учеными из UPV (Политехнический университет Валенсии) [12].

В процессе изучения влияния формы выходной грани щелевого волновода на направленность антенны ученые отказались от традиционной V-образной конструкции излучателя. Эвристическим путем удалось определить, что С-образная форма излучателей антенны (длина каждого – 0.5 мкм) является оптимальной, при этом лучшее значение направленности достигается когда величина угла изгиба каждого излучателя равна 20° (рис. 7).

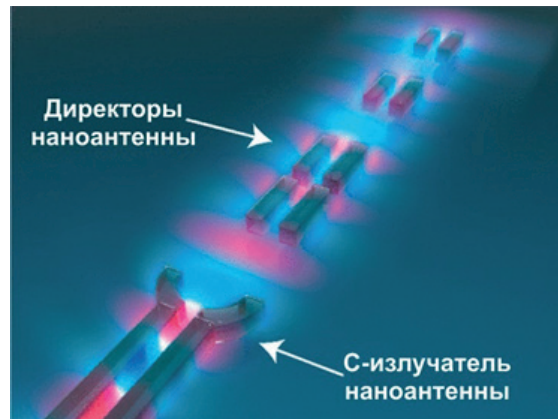


Рис. 7. Схематическое изображение плазмонно-кремниевой наноантенны [13].

Кроме того, авторы работы изучили влияние кремниевых щелевых плоских элементов, размещаемых перед С-антенной, которые имитировали стандартные директоры, известные из классической теории антенн. Классическая антенна такого типа, например, телевизионная, состоит из активного вибратора, отражающего рефлектора и направляющего директора (или нескольких). Все вместе они создают узконаправленную диаграмму и повышают коэффициент усиления антенны [12].

В отличие от модели антенны ученых из UPV, модификация, представленная на рис. 1г, обладает следующими параметрами:

- Длина направляющих блоков – 250 нм;
- Ширина направляющих блоков – 35 нм;
- Высота антенны – 25 нм;
- Расстояние между блоками – 25 нм;
- Радиус цилиндрической области – 150 нм;
- Толщина стенок цилиндра – 35 нм;
- Ширина разрыва в цилиндре – 40 нм.

После проведения расчетов были получены результаты, представленные на рис. 8.

Представленные данные показывают, что данная модификация наноантенны не позволила достигнуть желаемого результата в виде узкой диаграммы направленности. Как можно заметить, явно выраженного направления распространения излучения нет. Коэффициент усиления имеет немного большую величину, чем у модели антенны 1а, однако увеличение его значения на две десятых не является значительным.

После внесения изменений в геометрические параметры антенны 1г (рис. 9) были проведены дополнительные расчеты. Длины направляющих блоков были уменьшены до 100 нм, радиус цилиндрической области уменьшен до 70 нм, расстояние между направляющими блоками составило 15 нм, цилиндр имеет более открытое пространство.

В результате были получены результаты, выгодно отличающиеся от предыдущих (рис. 10).

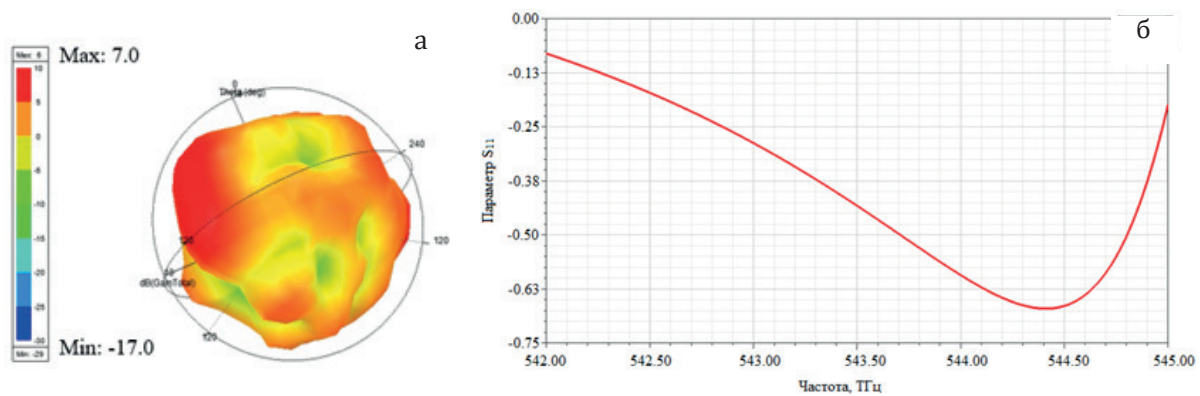


Рис. 8. Результаты моделирования антенны 1г:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты.

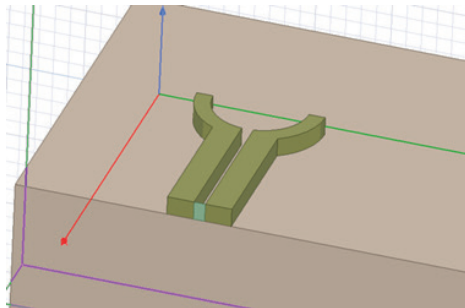


Рис. 9. Модифицированная С-антенна.

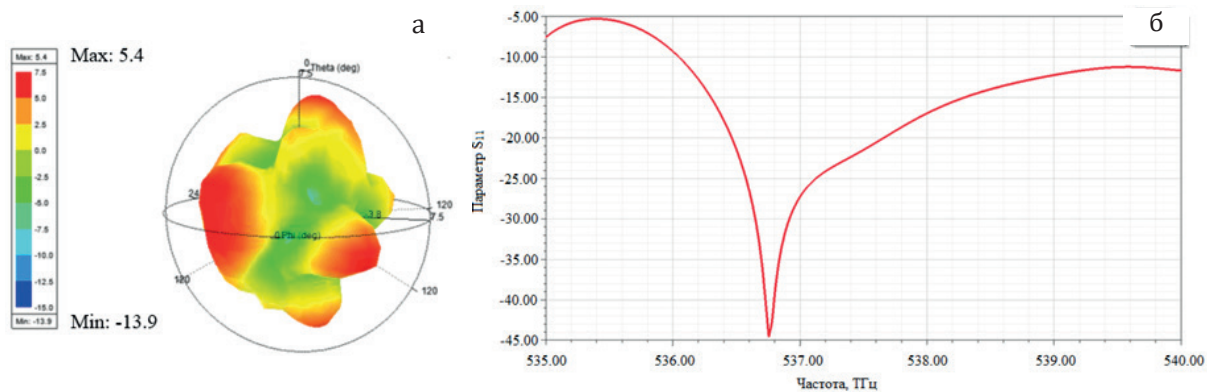


Рис. 10. Результаты моделирования антенны, представленной на рис. 9:
а – диаграмма направленности и коэффициент усиления сигнала;
б – кривая зависимости параметра S_{11} от частоты.

Видно, что произошли изменения в форме диаграммы направленности. Теперь, в отличие от предыдущей модели, она имеет заданный вектор распространения сигнала, но в результате пострадал коэффициент усиления сигнала. При повторном расчете его величина составила 5.4, в то время как предыдущая версия антенны имеет коэффициент равный 6. Также изменилась и резонансная частота антенны. Ранее максимальное усиление сигнала наблюдалось на частоте 541.5 ТГц. После изменения геометрии наномантенны пик сместился до значения 536.7 ТГц. В результате уменьшения общего размера структуры также уменьшилась и ее резонансная частота.

Заключение

В работе были рассмотрены и рассчитаны 4 модели наноантенн, изготовленных из золота. Все они имеют разные геометрические параметры, влияющие на их передаточные характеристики. Полученные данные представлены в таблице.

Характеристики исследованных наноантенн

Тип антенны	Антенна 1а	Антенна 1б	Антенна 1в	Антенна 1г
Резонансная частота, ТГц	524.0	542.7	541.3	536.7
Коэффициент усиления	5.8	6.7	7.0	5.4
Сформированная направленность излучения	да	нет	да	нет

Установлено, что наилучшими результатами обладает антенна, показанная на рис. 1в. Она имеет наиболее сбалансированные параметры, подходящие для ее дальнейшего применения в качестве основного устройства приема-передачи данных в трехмерных интегральных схемах. Однако возможно и применение другой модификации (1а), которая практически ничем не уступает модификации 1в и является неплохой альтернативной заменой. При общем уменьшении геометрических размеров структуры наноантенны происходит сдвиг пика резонансной частоты в сторону ее уменьшения.

В дальнейшем планируется проведение дополнительного моделирования наноантенн с другими параметрами, разработка топологии системы приема-передачи данных в интегральной схеме с использованием выбранной модели и, наконец, создание полноценно работающего массива наноантенн, способного на высоких скоростях передавать обширный пакет данных.

Работа выполнялась в рамках проведения конкурса «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий».

Литература:

1. Petronijevic E., Centini M., Cesca T., Mattei G., Bovino F.A., Sibilia C. Control of Au nano-antenna emission enhancement of magnetic dipolar emitters by means of VO₂ phase change layers. *Opt. Express*. 2019;27(17):2460-24273. <https://doi.org/10.1364/OE.27.024260>
2. Chen P.Y., Argyropoulos C., D'Aguzzo G., Alù A. Enhanced second-harmonic generation by metasurface nanomixer and nanocavity. *ACS Photonics*. 2015;2(8):1000-1006. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.5b00205>
3. Sikdar D., Rukhlenko I.D., Cheng W., Premaratne M. Optimized gold nanoshell ensembles for biomedical applications. *Nanoscale Res. Lett.* 2013;8(1):142. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-142>
4. Ni X.J., Emani N.K., Kildishev A.V., Boltasseva A., Shalaev V.M. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas. *Science*. 2012;335(6067):427. <https://doi.org/10.1126/science.1214686>
5. Curto A.G., Volpe G., Taminiu T.H., Kreuzer M.P., Quidant R., Van Hulst N.F. Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna. *Science*. 2010;329(5994):930-933. <https://doi.org/10.1126/science.1191922>
6. Sugumaran S., Jamlos M.F., Ahmad M.N., Bellan C.S., Sivaraj M., Krishnan P. Nanoantenna Based Wireless Communication for Cancer Tumour Detection- An Overview. In: Proc. IEEE 3rd International conference on electronics and communication systems (ICECS 2016). P. 1111-1114.
7. Zang F., Su Z., Zhou L., Konduru K., Kaplan G., Chou S.Y. Ultra-sensitive Ebola virus antigen sensing via 3D nanoantenna arrays. *Advanced Materials*. 2019;31(30):1902331. <https://doi.org/10.1002/adma.201902331>
8. Писаренко А.В., Витряк Е.А., Павлючин Т.А. Организация скоростной передачи данных в современных программируемых логических интегральных схемах. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2013;1(60):54-57.

9. Bazgir M., Zarrabi F.B. A switchable split ring resonator nanoantenna design with organic material composite as a refractive index sensor. *Opt. Commun.* 2020;475:126211.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126211>
10. Campbell S.D., Whiting E.B., Werner P.L., Werner D.H., Zhu D.Z. Three-dimensional Nanoantenna Inverse-design. In: *Proceedings 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. 2019.
<https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889257>
11. Shirzadian M., Rashed-Mohassel J., Naser-Moghaddasi M., Khatir M. Design of a wideband microstrip nanoantenna array. *Opt. Quant. Electron.* 2019;51(5):132.
<https://doi.org/10.1007/s11082-019-1852-6>
12. <https://mcs.mail.ru/blog/nanoantenny-dlya-sverhbystryh>
13. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация СВЧ-структур с помощью HFSS. Серия «Системы проектирования». М.: Солон-Пресс; 2012. С. 29-31.

References:

1. Petronijevic E., Centini M., Cesca T., Mattei G., Bovino F.A., Sibilia C. Control of Au nano-antenna emission enhancement of magnetic dipolar emitters by means of VO₂ phase change layers. *Opt. Express*. 2019;27(17):2460-24273.
<https://doi.org/10.1364/OE.27.024260>
2. Chen P.Y., Argyropoulos C., D'Aguanno G., Alù A. Enhanced second-harmonic generation by metasurface nanomixer and nanocavity. *ACS Photonics*. 2015;2(8):1000-1006.
<https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5b00205>
3. Sikdar D., Rukhlenko I.D., Cheng W., Premaratne M. Optimized gold nanoshell ensembles for biomedical applications. *Nanoscale Res. Lett.* 2013;8(1):142.
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-142>
4. Ni X.J., Emani N.K., Kildishev A.V., Boltasseva A., Shalaev V.M. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas. *Science*. 2012;335(6067):427.
<https://doi.org/10.1126/science.1214686>
5. Curto A.G., Volpe G., Taminiau T.H., Kreuzer M.P., Quidant R., Van Hulst N.F. Unidirectional emission of a quantum dot coupled to a nanoantenna. *Science*. 2010;329(5994):930-933.
<https://doi.org/10.1126/science.1191922>
6. Sugumaran S., Jamlos M.F., Ahmad M.N., Bellan C.S., Sivaraj M., Krishnan P. Nanoantenna Based Wireless Communication for Cancer Tumour Detection- An Overview. In: *Proc. IEEE 3rd International conference on electronics and communication systems (ICECS 2016)*. P. 1111-1114.
7. Zang F., Su Z., Zhou L., Konduru K., Kaplan G., Chou S.Y. Ultra-sensitive Ebola virus antigen sensing via 3D nanoantenna arrays. *Advanced Materials*. 2019;31(30):1902331.
<https://doi.org/10.1002/adma.201902331>
8. Pisarenko A.V., Vitriak E.A., Pavliuchyn T.O. Organization of high-speed data transfer in modern field-programmable gate arrays. *Radio electronic and computer systems*. 2013;1(60):54-57 (in Russ.).
9. Bazgir M., Zarrabi F.B. A switchable split ring resonator nanoantenna design with organic material composite as a refractive index sensor. *Opt. Commun.* 2020;475:126211.
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126211>
10. Campbell S.D., Whiting E.B., Werner P.L., Werner D.H., Zhu D.Z. Three-dimensional Nanoantenna Inverse-design. In: *Proceedings 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. 2019.
<https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889257>
11. Shirzadian M., Rashed-Mohassel J., Naser-Moghaddasi M., Khatir M. Design of a wideband microstrip nanoantenna array. *Opt. Quant. Electron.* 2019;51(5):132.
<https://doi.org/10.1007/s11082-019-1852-6>
12. <https://mcs.mail.ru/blog/nanoantenny-dlya-sverhbystryh>
13. Bankov S.E., Kurushin A.A., Razevig V.D. *Analiz i optimizatsiya SVCh-struktur s pomoshch'yu HFSS. Seriya «Sistemy proektirovaniya»* (Analysis and optimization of microwave structures using HFSS. Series «Design systems»). Moscow: Solon-Press; 2012. P. 29-31 (in Russ.).

Об авторах:

Серов Дмитрий Алексеевич, инженер Инжинирингового центра мобильных решений ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).
<http://orcid.org/0000-0002-9248-0130>

Першина Христина Валерьевна, лаборант Инжинирингового центра мобильных решений ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).
<http://orcid.org/0000-0003-2688-0897>

Бурдина Ирина Владимировна, лаборант Инжинирингового центра мобильных решений ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0002-8668-0929>

About the authors:

Dmitry A. Serov, Engineer, Engineering Center for Mobile Solutions, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-9248-0130>

Khristina V. Pershina, Laboratory Assistant, Engineering Center for Mobile Solutions, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0003-2688-0897>

Irina V. Burdina, Laboratory Assistant, Engineering Center for Mobile Solutions, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-8668-0929>

Поступила: 01.08.2020; получена после доработки: 13.10.2020; принята к опубликованию: 30.10.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-121-129>



УДК 538.913, 538.958, 538.975

Генерация терагерцевого излучения с поверхности объемного слоистого и монослойного диселенида вольфрама

Д.И. Хусяинов[@],
А.В. Горбатова,
А.М. Буряков

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: d.khusyainov@gmail.com

Исследование сверхбыстрого лазерного взаимодействия с графеноподобными материалами на основе дихалькогенидов переходных металлов привлекает большое количество научных коллективов. В первую очередь это связано с потенциальным использованием этих материалов в гибких оптоэлектронных устройствах видимого и терагерцевого диапазона (ТГц-диапазона). В работе проанализированы параметры генерации терагерцевого поля с поверхности объемного слоистого кристалла и монослойной пленки диселенида вольфрама. Генерация терагерцевого излучения с поверхности экспериментальных образцов была исследована методом терагерцевой спектроскопии временного разрешения в геометрии на отражение. Объемный слоистый кристалл диселенида вольфрама был выращен методом газотранспортных реакций. Монослойные кристаллиты диселенида вольфрама были получены методом химического осаждения из газовой фазы. Ширина спектра генерируемого терагерцевого излучения с поверхности объемного слоистого кристалла диселенида вольфрама составила ~ 3.5 ТГц. Для монослойной пленки диселенида вольфрама этот показатель составил ~ 2.5 ТГц. Пиковое значение амплитуды генерируемого терагерцевого поля для обоих образцов соответствовало частоте ~ 1 ТГц. Изучено влияние угла поворота плоскости поляризации оптической фемтосекундной накачки на величину размаха колебания импульса терагерцевого поля, генерируемого с поверхности объемного слоистого кристалла и монослойной пленки диселенида вольфрама. Симметричный анализ азимутальной зависимости ТГц-излучения позволил разделить механизмы этого излучения и

оценить их вклад. На основе результатов анализа было подтверждено, что единственно возможным вкладом в генерацию терагерцевого излучения в монослойном кристалле диселенида вольфрама выступает нелинейно-оптический эффект второго порядка – оптическое выпрямление. В объемном слоистом кристалле диселенида вольфрама одним из вкладов в генерацию терагерцевого излучения является нелинейно-оптический эффект третьего порядка – поверхностное оптическое выпрямление.

Ключевые слова: двумерные полупроводники, дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), диселенид вольфрама (WSe_2), ТГц-спектроскопия временного разрешения.

Для цитирования: Хусяинов Д.И., Горбатова А.В., Буряков А.М. Генерация терагерцевого излучения с поверхности объемного слоистого и монослойного диселенида вольфрама. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):121-129. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-121-129>

Terahertz generation from surface of the bulk and monolayer tungsten diselenide

Dinar I. Khusyainov[@],
Anastasiya V. Gorbatoва,
Arseniy M. Buryakov

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: d.khusyainov@gmail.com

The study of ultrafast laser interaction with graphene-like materials based on transition metal dichalcogenides attracts most scientific groups. It is connected with potential use of these materials in flexible optoelectronic devices of visible and THz range. In this paper the parameters of generation of terahertz field from the surface of bulk layered crystal and monolayer film of tungsten diselenide are analyzed. Generation of terahertz radiation from the surface of experimental samples was studied by the terahertz time-domain spectroscopy in reflection geometry. Bulk layered crystals of tungsten diselenide were grown by gas transport reactions. Monolayers of tungsten diselenide crystals were grown by chemical vapor deposition on a silicon substrate. The bandwidth of the generated terahertz radiation from the surface of the bulk layered tungsten diselenide crystal was ~ 3.5 THz. For tungsten diselenide monolayer the spectrum bandwidth of the generated THz radiation was ~ 2.5 THz. The peak amplitude of the generated terahertz field for both samples was at a frequency of ~ 1 THz. Research of the influence of the angle of rotation of a polarization plane of optical femtosecond pump on peak-to-peak amplitude of the generated terahertz field from the surface of investigated samples was carried out. Symmetry analysis of the azimuthal dependence of THz radiation made it possible to separate the mechanisms of THz radiation and evaluate their contribution. The analysis results confirm that the only possible contribution to the generation of terahertz radiation in a tungsten diselenide monolayer crystal is the second order nonlinear optical effect – optical rectification. One of the contributions to the generation of tungsten diselenide is a nonlinear-optical effect of the third order – surface optical rectification.

Keywords: two dimensional semiconductors, transition metal dichalcogenides, tungsten diselenide, THz time-domain spectroscopy.

For citation: Khusyainov D.I., Gorbatova A.V., Buryakov A.M. Terahertz generation from surface of the bulk and monolayer tungsten diselenide. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):121-129 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-121-129>

Введение

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) – MX_2 (MoS_2 , WSe_2 , WS_2 , MoSe_2 и т.д.) – это новый класс слоистых графеноподобных материалов. В отличие от графена, ДПМ обладают запрещенной зоной, которая позволяет использовать этот материал в качестве полупроводника. Ключевая особенность ДПМ заключается в зависимости их оптических и электрических свойств от количества слоев [1]. Монослои ДПМ являются прямозонными полупроводниками и характеризуются шириной запрещенной зоны, соответствующей энергии фотонов электромагнитного излучения в видимой области спектра, и высокой подвижностью носителей заряда [2]. Таким образом, ДПМ можно рассматривать как класс атомарно-тонких полупроводниковых материалов для нового поколения оптоэлектронных устройств. В ряде работ была рассмотрена альтернатива использования полупроводниковых ДПМ для генерации и детектирования терагерцевого (ТГц) излучения [3–5]. В связи с этим актуальным является исследование свойств ДПМ в ТГц-диапазоне. Диселенид вольфрама (WSe_2) – один из наиболее перспективных ДПМ, он обладает большей подвижностью носителей заряда и относительно небольшой запрещенной зоной по сравнению с другими материалами этого класса [6], что делает его перспективным материалом для ТГц-технологии. Нелинейно-оптические свойства этого материала для оптико-терагерцевого преобразования представляют интерес, поэтому в данной работе исследовалось влияние угла поворота плоскости поляризации падающего фемтосекундного излучения на характеристики генерируемого ТГц-излучения в объемном кристалле и двумерной пленке WSe_2 .

Описание образцов и экспериментальные методики

Слоистый кристалл диселенида вольфрама WSe_2 был получен методом газотранспортных реакций научной группой под руководством Л. Кулюка в Академии наук Молдовы. Латеральные размеры выращенного слоистого кристалла WSe_2 составляют $\sim 1 \times 1$ см, толщина ~ 30 мкм (толщина одного монослоя ~ 1 нм). Запрещенная зона объемных кристаллов WSe_2 лежит в интервале $\sim 1.2 - 1.3$ эВ [6]. Монослойная пленка WSe_2 была получена методом химического осаждения из газовой фазы на подложке SiO_2/Si . Характеристики исследуемой двумерной пленки WSe_2 представлены в работе [3]: латеральные размеры кристаллитов ~ 10 мкм; толщина пленки ~ 1 нм; запрещенная зона монослойного $\text{WSe}_2 \sim 1.62$ эВ.

Слоистые ДПМ характеризуются наличием нескольких структурных модификаций (политипов), отличающихся типом элементарной ячейки (расположением атомов металла), количеством моноатомных слоев и порядком их укладки. При этом для объемного WSe_2 существует только одна политипная модификация – 2H-политип, характеризующая-

ся пространственной группой D_{6h}^4 ($P6_3/mmc$). Если рассматривать объемный слоистый WSe_2 , то в зависимости от четности и нечетности слоев пространственная группа может иметь вид D_{3d}^1 и D_{3h}^1 , соответственно [7]. Таким образом, монослойный WSe_2 имеет пространственную группу D_{3h}^1 ($P6m2$). Характеризация кристаллической структуры слоистого WSe_2 проводилась методом рентгеноструктурного анализа. Дифрактограмма, полученная на дифрактометре общего назначения ДРОН-3, представлена на рис. 1. Положения углов дифракционных рефлексов для соответствующих индексов Миллера с высокой точностью совпадают с эталонными значениями для объемного $2H-WSe_2$, представленными в кристаллографической базе данных ICDD JCPDS. Точное совпадение свидетельствует о высоком качестве и чистоте выращенного объемного кристалла. Таким образом, исследуемый объемный кристалл WSe_2 относится к пространственной группе $P6_3/mmc$ (центросимметричный $2H$ -политип). Пространственная группа симметрии монокристалла имеет важное значение при описании механизмов генерации ТГц-излучения.

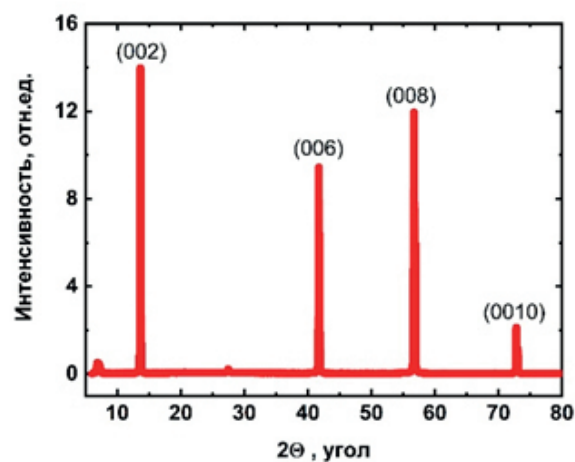


Рис. 1. Дифрактограмма слоистого монокристалла WSe_2 .

Генерация терагерцового излучения, возникающая путем воздействия на материал лазерным фемтосекундным импульсом, в основном возможна при наличии механизмов встроенного поля, фотоэлектрического эффекта Дембера или нелинейного оптического выпрямления. Встроенное поле возникает вблизи поверхности полупроводника за счет разницы уровней Ферми в объеме и на поверхности. Эффект Дембера, приводящий к пространственному разделению электронов и дырок в полупроводнике, возникает вследствие большой разницы между их подвижностями. Нелинейно-оптические эффекты, например, оптическое выпрямление, проявляются за счет возникновения нелинейной поляризации, повторяющей форму огибающей оптического импульса. В зависимости от материала, ТГц-излучение может возникать в результате всех вышеперечисленных механизмов. При этом разделить вклады механизмов в ТГц-генерацию позволяет кристаллографический анализ. В нецентросимметричных кристаллах механизм возникновения ТГц-генерации в основном обусловлен вкладом, связанным с возникновением компоненты нелинейной поляризации второго порядка (оптическое выпрямление [3]). В случае центросимметричного кристалла возможен вклад в генерацию ТГц-излучения за счет поверхностного оптического выпрямления – нелинейного эффекта третьего порядка

[8]. Диаграмма направленности генерируемого ТГц-излучения, которое возникает за счет эффекта нелинейно-оптического выпрямления, может быть схожа с диаграммой направленности ТГц-излучения, генерируемого в нелинейно-оптических кристаллах ZnTe [9]. ТГц-излучение при этом распространяется преимущественно вдоль направления, падающего и отраженного оптического луча накачки.

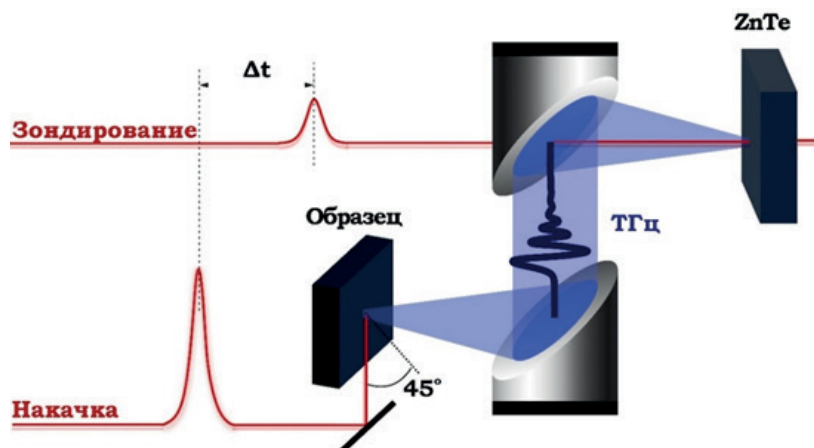


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной методики терагерцевой спектроскопии временного разрешения.

Исследование влияния угла поворота плоскости поляризации падающего излучения возбуждения на генерацию ТГц-излучения с поверхности объемного кристалла WSe₂ и монослойной пленки WSe₂ проводилось методом ТГц-спектроскопии временного разрешения в геометрии «на отражение» (рис. 2). В качестве источника фемтосекундного лазерного излучения использовался лазер Mai-Tai Spectra-Physics с длительностью импульсов 100 фс и частотой следования импульсов 82 МГц при длине волны 800 нм. Угол падения излучения возбуждения на поверхность образца был равен 45 градусам. Луч накачки фокусировался на поверхность образцов линзой с фокусным расстоянием 10 см в пятно размером 5×10^{-4} см². При этом плотность энергии составляла ~ 62 мкДж/см². Для регистрации сигнала использовалась методика электрооптического стробирования, где в качестве детектора использовался нелинейно-оптический кристалл ZnTe. Для исследования поляризационных зависимостей в эксперименте была предусмотрена возможность поворота плоскости поляризации возбуждающего излучения путем вращения пластинки $\lambda/2$. Для анализа поляризационных зависимостей была использована величина, которая называется «размах ТГц-поля», которая обозначает максимальный размах колебания одиночного импульса ТГц-поля длительностью ~ 2 пс, генерируемого при взаимодействии оптического импульса накачки с образцом.

Результаты и обсуждения

В результате исследования методом ТГц-спектроскопии временного разрешения были получены временные зависимости амплитуды ТГц-сигнала для объемного и монослойного образцов WSe₂ (рис. 3а). На рис. 3а представлено колебание генерируемых ТГц-импульсов и обозначен размах максимальной амплитуды колебания одиночного импульса ТГц-поля. Методом Фурье-преобразования временной формы ТГц-импульсов были получены их частотные спектры, представленные на рис. 3б. Объемный WSe₂ гене-

рирует излучение с частотой до 3.5 ТГц, в то время как ширина спектра у монослойного WSe_2 меньше и составляет ~ 2.5 ТГц. Пик амплитуды ТГц-сигнала для обоих образцов наблюдается на частоте 1 ТГц. На основании этого можно сделать вывод, что амплитуда генерируемого ТГц-излучения в объемном кристалле WSe_2 в ~ 19 раз больше, чем в монослойном WSe_2 . Это связано с тем, что в объемном кристалле эффективная глубина поглощения оптического излучения при длине волны в 800 нм составляет ~ 362 нм в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера, а в монослойном $\text{WSe}_2 \sim 2$ нм. Оптические константы (коэффициенты экстинкции) для оценки эффективной глубины поглощения в объемном и монослойном WSe_2 были взяты из [10]. Ширина запрещенной зоны для монослойного WSe_2 составляет 1.62 эВ, в то время как для объемного $\text{WSe}_2 - 1.2$ эВ. Энергия излучения накачки с длиной волны 800 нм составляет 1.55 эВ. Очевидно, что энергии лазерного излучения достаточно для возбуждения электронов из валентной зоны в зону проводимости в случае объемного кристалла и недостаточно в случае двумерной пленки.

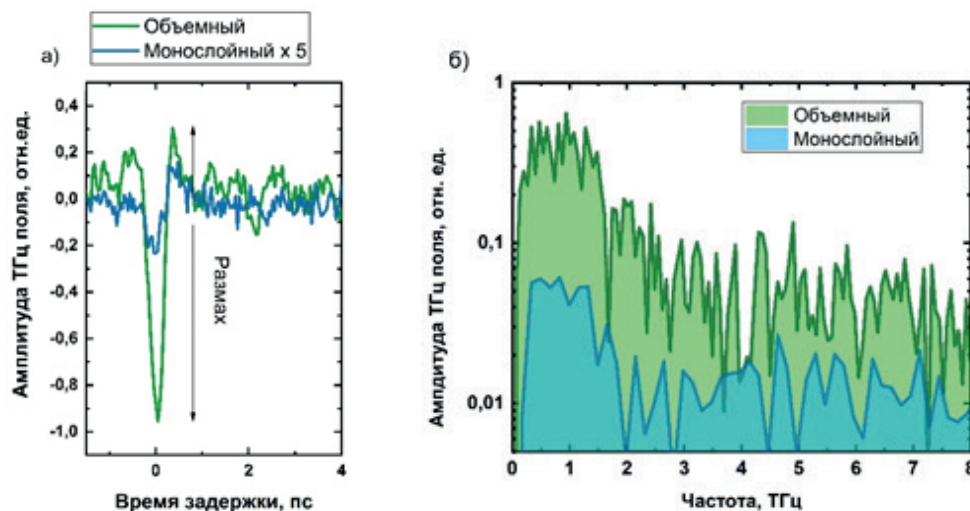


Рис. 3. Зависимость амплитуды генерируемых ТГц-импульсов от времени задержки (а) и от частоты (б) в объемном (салатовый цвет) и монослойном WSe_2 (голубой цвет).

Результаты исследования поляризационных зависимостей размаха ТГц-сигнала для двумерной пленки WSe_2 и объемного кристалла представлены на рис. 4а и 4б, соответственно. В соответствии с работой [3] для нецентросимметричного монослоя WSe_2 с пространственной группой D_{3h}^1 (P6m2) вклад в ТГц-генерацию обусловлен эффектом оптического выпрямления второго порядка. В этом случае индуцируемая нелинейная поляризация второго порядка $P^{(2)}(0)$ будет связана с полем световой волны $E(\omega)$ соотношением

$$P^{(2)}(0) = \varepsilon_0 \chi^{(2)}(0, \omega, -\omega) E(\omega) E(\omega), \quad (1)$$

где $\chi^{(2)}$ – тензор нелинейной восприимчивости второго порядка. Анализ поляризационной зависимости, полученной для двумерной пленки WSe_2 с пространственной группой D_{3h}^1 (P6m2), проводился в соответствии с исходным выражением (1). Рассматривалась кристаллографическая плоскость монослоя (001). Рассчитанная зависимость размаха ко-

лебания, генерируемого пленкой ТГц-поля от угла поворота плоскости поляризации падающего фемто-секундного импульса, в случае р-поляризованного анализатора имеет вид:

$$E_{THz}^{OR} = \frac{1}{32}(\chi_2 + 5\chi_3 - \chi_1 + (\chi_2 + 3\chi_1 + \chi_3)\cos(2\varphi/57))^2, \quad (2)$$

где φ – угол плоскости поляризации излучения фемтосекундной накачки относительно плоскости пропускания анализатора, расположенной в плоскости падения излучения накачки. Ненулевые компоненты тензора нелинейной восприимчивости $\chi^{(2)}$, используемые для описания поляризационной зависимости размаха колебания ТГц-сигнала, для двумерной пленки WSe_2 определяются как: $\chi_1 = \chi_{xxx} = -\chi_{xyy} = -\chi_{yyx} = -\chi_{yxx}$; $\chi_2 = \chi_{zzz}$; $\chi_3 = \chi_{xxz} = \chi_{xzx} = \chi_{yyz} = \chi_{zyz} = \chi_{zxx} = \chi_{zzx}$. Результаты аппроксимации исследуемой зависимости с помощью выражения (2) представлены на рис. 4а (Fitting D_{3h}^I).

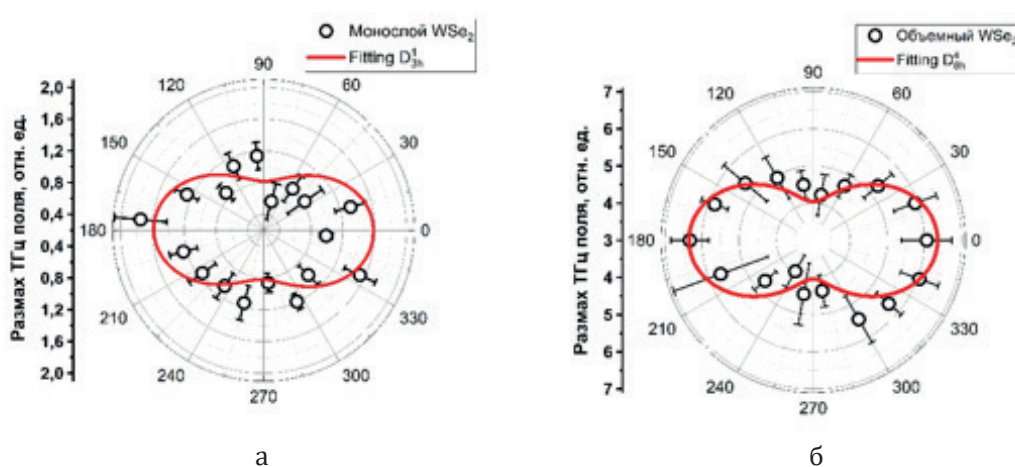


Рис. 4. Зависимости размаха колебания ТГц-сигнала от угла поворота плоскости поляризации импульса накачки для монослойного WSe_2 (а) и для объемного кристаллов (б) (маркерами отмечены результаты эксперимента, красная линия – аппроксимация).

В объемном кристалле WSe_2 возможен также вклад в генерацию ТГц-излучения за счет фотовозбужденных носителей заряда. Что касается нелинейно-оптических механизмов генерации, то в объемном центросимметричном $2H-WSe_2$ с пространственной группой D_{6h}^4 маловероятна генерация за счет эффекта оптического выпрямления. В центросимметричных средах нелинейные эффекты второго порядка не проявляются, однако возможен вклад в генерацию ТГц излучения, связанный с возникновением нелинейной поляризации третьего порядка – процесс поверхностного оптического выпрямления [8]:

$$E_{THz}^{SOR} = \varepsilon_0 \chi^{(3)}(\omega_{THz}, -\omega, \omega, 0) E(-\omega) E(\omega) E_{surf}(0), \quad (3)$$

где $\chi^{(3)}$ – тензор нелинейной восприимчивости третьего порядка. В соответствии с выражением (3) зависимость размаха колебания генерируемого ТГц-сигнала от поляризации излучения накачки в объемном кристалле WSe_2 , в случае р-поляризованного анализатора имеет вид:

$$E_{THz}^{SOR} = \frac{1}{64}(5\chi_1 + 3(\chi_2 + \chi_3) + \chi_4 + (\chi_1 + 3(\chi_2 + \chi_3) + \chi_4)\cos(2\varphi/57))^2. \quad (4)$$

Ненулевые компоненты тензора нелинейной восприимчивости третьего порядка для 2H-WSe_2 имеют вид: $\chi_1 = 3\chi_{xxxx} = 3\chi_{yyyy} = \chi_{xxyy} = \chi_{yyxx} = \chi_{xyxx} = \chi_{yyxx}$; $\chi_2 = \chi_{yyzz} = \chi_{xzzx} = \chi_{zzxx} = \chi_{yzzy} = \chi_{zyzy}$; $\chi_3 = \chi_{xxzz} = \chi_{zzxx} = \chi_{zzxx}$; $\chi_4 = \chi_{zzzz}$. Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости с помощью выражения (4) представлены на рис. 4б (Fitting D_{6h}^4).

Экспериментальные данные хорошо согласуются с предложенной нелинейно-оптической моделью, что подтверждает вклад нелинейно оптических процессов в генерацию ТГц-излучения в объемном и монослойном WSe_2 . При этом основным вкладом в генерацию ТГц-излучения в монослойном WSe_2 возможно выступает оптическое выпрямление, а в объемном слоистом WSe_2 поверхностное оптическое выпрямление возможно является сопоставимым с эффектом встроенного приповерхностного поля.

Заключение

Таким образом, было показано, что генерация ТГц-излучения с поверхности объемных и монослойных кристаллов WSe_2 проявляет зависимость от угла плоскости поляризации фемтосекундной накачки. Это свидетельствует о том, что вклад эффекта приповерхностного встроенного поля в генерацию ТГц-излучения в объемном кристалле WSe_2 сопоставим с вкладом поверхностного оптического выпрямления. В монослойном WSe_2 основным вкладом в генерацию ТГц-излучения является оптическое выпрямление, так как энергия фотонов оптической накачки ниже ширины запрещенной зоны, что обуславливает отсутствие других механизмов генерации ТГц-излучения. Симметричный анализ хорошо согласуется с экспериментальными зависимостями и подтверждает предложенную гипотезу о нелинейно-оптических механизмах генерации ТГц-излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00886 и РТУ МИРЭА в рамках научного проекта НИЧ-46.

Литература / References:

1. Kumar A., Ahluwalia P.K. Electronic structure of transition metal dichalcogenides monolayers 1H-MX_2 ($\text{M} = \text{Mo}, \text{W}; \text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) from ab-initio theory: new direct band gap semiconductors. *Eur. Phys. J. B.* 2012;85(6):186-193. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2012-30070-x>
2. De Fazio D., Goykhman I., Yoon D., Bruna M., Eiden A., Milana S., Sassi U., Barbone M., Dumcenco D., Marinov K., Kis A., Ferrari A.C. High Responsivity, Large-Area Graphene/ MoS_2 Flexible Photodetectors. *ACS Nano*. 2016;10(9):8252-8262. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05109>
3. Gorbato A.V., Khusyainov D.I., Buryakov A.M. Terahertz Emission from a Monolayer Tungsten Diselenide Surface. *Tech. Phys. Lett.* 2019;45(12):1262-1265. <https://doi.org/10.1134/S1063785019120204>
4. Zhang L., Huang Y., Zhao Q., Zhu L., Yao Z., Du W., Xu X. Terahertz surface emission of d-band electrons from a layered tungsten disulfide crystal by the surface field. *Phys. Rev. B.* 2017;96(15):155202-1-155202-8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.155202>
5. Huang Y., Zhu L., Zhao Q., Guo Y., Ren Z., Bai J., Xu X. Surface Optical Rectification from Layered MoS_2 Crystal by THz Time-Domain Surface Emission Spectroscopy. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017;9(5):4956-4965. <https://doi.org/10.1021/acsaami.6b13961>
6. Sahin H., Tongay S., Horzsun S., Fan W., Zhou J., Wu J., Peeters F.M. Anomalous Raman spectra and thickness-dependent electronic properties of WSe_2 . *Phys. Rev. B.* 2013;87(16):165409-1-165409-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.165409>
7. Ribeiro-Soares J., Almeida R.M., Barros E.B., Araujo P.T., Dresselhaus M.S., Cancado L.S., Jorio A. Group theory analysis of phonons in two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Phys. Rev. B.* 2014;90(11):115438-1-115438-10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.115438>

8. Si K., Huang Y., Zhao Q., Zhu L., Zhang L., Yao Z., Xu X. Terahertz surface emission from layered semiconductor WSe₂. *Appl. Surf. Sci.* 2018;448:416-423.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.117>
9. Gaivoronskii V.Y., Nazarov M.M., Sapozhnikov D.A., Shepelyavii Y.V., Shkel'nyuk S.A., Shkurinov A.P., Shuvaev A.V. Competition between linear and nonlinear processes during generation of pulsed terahertz radiation in a ZnTe crystal. *Quantum Elec.* 2005;35(5):407-414.
<https://doi.org/10.1070/QE2005v035n05ABEH002805>
10. Beal A.R., Liang W.Y., Hughes H.P. Kramers-Kronig analysis of the reflectivity spectra of 3R-WS₂ and 2H-WSe₂. *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1976;9(12):2449-2457.
<https://doi.org/10.1088/0022-3719/9/12/027>

Об авторах:

Хусяинов Динар Ильгамович, аспирант, младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: O-7241-2017, Scopus Author ID: 57194467463, <http://orcid.org/0000-0003-1332-4146>

Горбатова Анастасия Владимировна, магистр учебно-научной лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Буряков Арсений Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории фемтосекундной оптики для нанотехнологий Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: E-8283-2017, Scopus Author ID: 55454206600, <http://orcid.org/0000-0002-3347-9076>

About the authors:

Dinar I. Khusyainov, Postgraduate Student of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID: O-7241-2017, Scopus Author ID: 57194467463, <http://orcid.org/0000-0003-1332-4146>

Anastasiya V. Gorbatova, Master of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Arseniy M. Buryakov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Specialized Educational and Research Laboratory of Femtosecond Optics for Nanotechnologies, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID E-8283-2017, Scopus Author ID: 55454206600, <http://orcid.org/0000-0002-3347-9076>

Поступила: 11.03.2020; получена после доработки: 28.05.2020; принята к опубликованию: 25.09.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-130-142>



УДК 621.3.051.024

Учёт магнитного поля системы электроснабжения энергоёмкого технического объекта

**А.Т. Тарланов[@],
З.М. Курбанисмаилов**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: lev.brave@gmail.com

В работе показан подход и результат учета взаимного влияния бортовых подсистем сложного технического объекта по цепям питания постоянным током. Под техническим объектом в данном случае понимается мобильное энергоёмкое средство такое, как летательный аппарат, надводное или подводное судно, или железнодорожный локомотив с сильными магнитными полями. Целью работы является создание простого и наглядного инструмента математического моделирования вектора магнитного поля в произвольно заданной точке наблюдения. Это решение позволит добиться повышения точности магнитных измерений на борту, в частности, в задачах навигации. Отмечены недостатки коммерческих программ аналогичного назначения. Описана привязка объектов рассмотрения к общей системе координат, показан и детально описан аналитический алгоритм вычисления вектора магнитного поля, создаваемого бортовой кабельной сетью, имеющей выраженную 3D-траекторию. Приведены примеры визуализации результатов моделирования. Для решения задачи использован алгоритм вычисления вектора индукции на основе закона Био – Савара. Рассмотрен конкретный силовой кабель бортовой сети, заданный набором прямолинейных проводников с током. Намечены пути совершенствования созданного алгоритма с переходом от одной точки наблюдения к карте поля в заданной трехмерной зоне произвольного положения, объема и ориентации. Полученный результат рассматривается как элемент процедуры достижения электромагнитной совместимости энергоёмких и высокочувствительных подсистем современного сложного технического объекта.

Ключевые слова: индукция, магнитное поле, бортовая кабельная сеть, технический объект, прямолинейный проводник.

Для цитирования: Тарланов А.Т., Курбанисмаилов З.М. Учёт магнитного поля системы электро-снабжения энергоёмкого технического объекта. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):130-142. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-130-142>

Accounting of the magnetic field of the power supply system of a power-capacitive technical object

A.T. Tarlanov@,
Z.M. Kurbanismaiлов

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

@Corresponding author, e-mail: lev.brave@gmail.com

The paper shows the approach and the result of taking into account the mutual influence of on-board subsystems of a complex technical object along the DC power supply circuits. Technical objects are understood as a mobile, energy-intensive vehicle, such as an aircraft, a surface or submarine vessel, or a railway locomotive with strong magnetic fields. The aim of the work is to create a simple and intuitive tool for mathematical modeling of the magnetic field vector at an arbitrarily specified observation point. The task is being solved in order to improve the accuracy of magnetic measurements on board, in particular, in navigation problems. On-board DC networks are considered, to which the approach of mathematical modeling is applied. The disadvantages of commercial programs of a similar purpose are noted. The binding of the objects under consideration to the general coordinate system is described. An analytical algorithm for calculating the magnetic field vector from the on-board cable network with a pronounced 3D trajectory is shown. Examples of visualization of the simulation results are given. An algorithm for calculating the induction vector based on the Biot-Savard law is considered. The algorithm for the analytical solution of the problem is described in detail. A specific power cable of the on-board network is considered. The cable is given by a set of straight conductors with current. The ways of future improvement of the created product with the transition from one observation point to the field map in a given three-dimensional zone of arbitrary position, volume and orientation are outlined. The obtained result is considered as an element of the procedure for achieving electromagnetic compatibility of energy-intensive and highly sensitive subsystems of a modern complex technical object.

Keywords: induction, magnetic field, on-board cable network, technical object, straight conductor.

For citation: Tarlanov A.T., Kurbanismaiлов Z.M. Accounting of the magnetic field of the power supply system of a power-capacitive technical object. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(6):130-142 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-130-142>

Введение

Научно-технический прогресс позволяет создавать все более сложные технические системы, содержащие большое число различных подсистем, влияющих друг на друга [1–6]. Совершенство одной из таких обособленных подсистем вовсе не дает ей права на благополучное функционирование в окружении других, не менее совершенных, из-за их взаимного влияния, в общем случае непрогнозируемого. Взаимное влияние различных устройств на борту технического объекта (ТО) составляет одну из актуальных проблем современного приборо- и машиностроения [1, 10]. Решение этой проблемы видится, в том числе, и в создании арсенала средств для контроля и моделирования указанного влияния, которые позволяли бы в реальном времени верифицировать различные версии компоновки технического объекта на разных этапах его создания, начиная с разработки.

Целью настоящей работы является создание простого, интуитивно понятного и действующего в реальном времени инструмента для оценки влияния стационарного магнитного поля, создаваемого бортовыми кабельными сетями (БКС) на подсистемы объекта, расположенные в произвольной точке заданной системы координат. Это решение имеет прямое отношение к известной проблеме электромагнитной совместимости (ЭМС) бортовых систем, которая решается, в частности, средствами измерения и моделирования создаваемых полей.

Предложенный в данной работе программный продукт будет использоваться в общем потоке решений ЭМС, особенно на начальном этапе проработки концептуальных решений, в частности, по проектированию кабельных силовых соединений различных подсистем объекта как друг с другом, так и с централизованной системой энергообеспечения. Решаемыми задачами являются: математическое описание силового кабеля, нахождение алгоритма суммирования полей в точке наблюдения от разных элементов БКС, визуализация результатов вычислений.

В результате работы создан перспективный программный продукт, позволяющий качественно оценивать взаимное влияние различных подсистем ТО по цепям питания, который может найти применение в практике проектирования современных технических систем в таких областях, как авиаприборостроение, космическая техника, судостроение и другие.

Подход к получению карты поля на борту

Под техническим объектом будем понимать мобильное средство, снабженное как силовыми установками, приводящими его в движение, так и устройствами управления такими установками, подверженными влиянию внешних электромагнитных полей. К таким объектам без сомнения можно отнести летательные аппараты различного назначения, включая и космическую технику, надводные и подводные суда с мощными тяговыми электродвигателями и аккумуляторными батареями, а также железнодорожные локомотивы, где, как известно, сильны магнитные поля от силовых установок.

Наличие на борту такого ТО даже простого магнитного компаса уже требует контроля магнитных полей, создаваемых бортовыми системами, а при наличии многочисленных бортовых измерительных систем проблема ЭМС приобретает еще большую актуальность. В некоторых системах [17] прямо стоит задача знания точного распределения магнитного поля в заданной 3D-зоне, и количество таких проектов возрастает.

Бортовые кабельные сети принято делить на сети переменного и постоянного тока. В данной работе рассматриваются постоянные магнитные поля, но результаты можно распространить и на сети переменного тока, которые, как правило, имеют большую протяженность, при меньшей величине тока.

Методы получения карты любого физического поля в заданных точках или в пределах зоны наблюдения принято делить на математические и физические. Картографирование поля, как этап физического моделирования, реализует аппаратное решение проблемы ЭМС, и применяется, как правило, на завершающих этапах создания технических объектов.

На этапе проектирования более актуальны математические методы моделирования, которым и посвящена настоящая работа. Кроме того, математическое моделирование обходится несравнимо дешевле физического, что особенно привлекательно на начальных этапах создания ТО. Математическое моделирование требует знания источников поля, а также привязки к системе координат объекта.

Известны коммерческие программные продукты математического моделирования магнитных полей, например, пакет ELCUT (<https://elcut.ru/>). Однако, данный продукт и аналогичные продукты не позволяют проводить 3D-моделирование при произвольной траектории БКС. Будем искать простой аналитический метод математического моделирования стационарного магнитного поля в произвольной точке наблюдения, создаваемого произвольной 3D-траекторией бортовой кабельной сети постоянного тока.

Методология учёта магнитного поля кабельных сетей на борту ТО

Зададим декартову систему координат для моделирования магнитного поля на борту ТО, как показано на рис. 1.

Источниками магнитного поля являются кабели бортовой сети. Для описания прокладки кабелей на борту в рассматриваемой системе координат каждый из них представляется набором прямолинейных проводников с заданными координатами концов [3]. Величину индукции магнитного поля, создаваемой каждым кабелем в произвольно выбранной точке наблюдения, можно получить с помощью векторной суперпозиции индукций [4, 5] от элементарных прямолинейных отрезков кабелей.

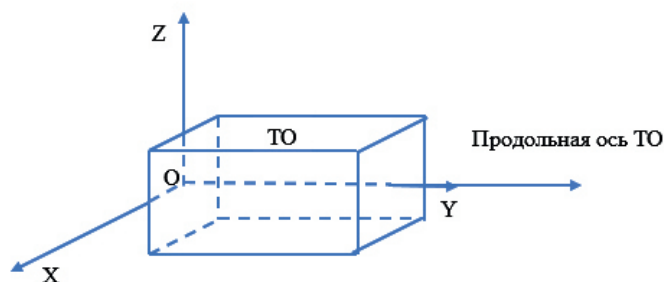


Рис. 1. Система координат для моделирования магнитного поля на борту ТО.

Индукция, создаваемая прямолинейным конечным проводником в удаленной точке наблюдения, определяется на основе закона Био – Савара – Лапласа [6], который в векторной форме имеет следующий вид:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^2}, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн·м) – магнитная постоянная; I – сила тока в проводнике (А); $d\vec{l}$ – элемент проводника; $\vec{r}$ – радиус-вектор направления из центра проводника на удалённую точку наблюдения; r – модуль радиус-вектора (м).

Модуль вектора индукции [7, 8] определяется формулой:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dl \sin \alpha}{r^2}, \quad (2)$$

где α – угол между элементом проводника и радиус-вектором.

Схема взаимного расположения точки наблюдения и прямолинейного проводника с током показана на рис. 2. Так как проводник имеет конечную длину, то угол α изменяется от значения α_1 в точке A – начале рассматриваемого проводника – до значения α_2 в точке B – конце рассматриваемого проводника, что задает пределы интегрирования формулы (2) для поиска общего значения модуля индукции, создаваемой всем проводником в точке наблюдения C [9].

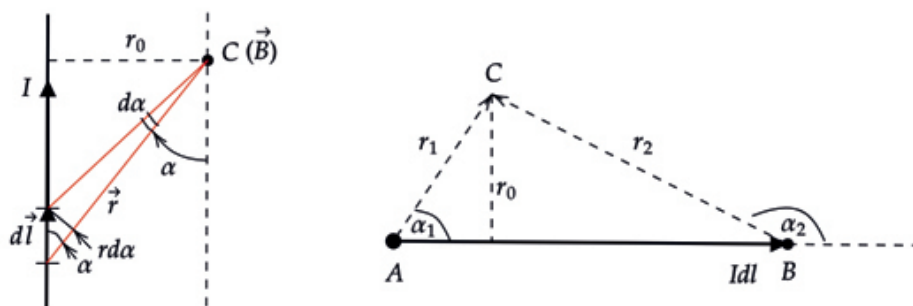


Рис. 2. Расположение точки наблюдения C относительно конечного прямолинейного проводника AB .

Из рис. 2 видно, что

$$r = \frac{r_0}{\sin \alpha}, \quad (3)$$

где r_0 – расстояние от наблюдаемой точки C до прямой, содержащей отрезок AB .

Получаем:

$$dl = r \frac{d\alpha}{\sin \alpha} = r_0 \frac{d\alpha}{\sin^2 \alpha}. \quad (4)$$

Далее подставляем (4) в формулу (2) и получаем:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{l}{r_0} \sin \alpha d\alpha. \quad (5)$$

Интегрируя выражение (5) по углу α в пределах от α_1 до α_2 , получаем расчётную формулу:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{l}{r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (6)$$

Далее переходим к заданию целого кабеля в виде набора прямолинейных проводников (ПП). Для каждого ПП задаются два набора координат XYZ – для начала (А) и конца (В). Начало и конец каждого ПП выбираются в соответствии с действующей конструкцией кабельных соединений на борту ТО. Задание координат ПП целесообразно представить в виде таблицы.

Здание координат ПП

Номер ПП	Начало (A)			Конец (B)		
	X_1	Y_1	Z_1	X_2	Y_2	Z_2
1	1.00	1.50	2.00	1.00	2.00	0.50
2	1.00	2.00	0.50	-0.50	3.00	-0.70
3	-0.50	3.00	-0.70	-0.50	3.50	-0.70
4	-0.50	3.50	-0.70	1.00	4.00	0.00
5	1.00	4.00	0.00	0.00	4.50	1.00
6	0.00	4.50	1.00	0.00	4.70	1.50
7	0.00	4.70	1.50	1.00	4.70	1.50
8	1.00	4.70	1.50	0.00	4.90	2.00

Из данных таблицы можно определить геометрию единого кабеля, состоящего из 8 отдельных ПП. Как видно, конец предыдущего ПП совпадает с началом следующего.

Таким же образом задаются координаты скользящей точки наблюдения C , например $X_3 = -2$, $Y_3 = 0$, $Z_3 = -2$ (м) в принятой системе координат.

Далее, пользуясь построениями на рис. 2, можно для каждого заданного ПП вычислить характеристики треугольника ACB , длины сторон которого определяются по формуле Пифагора:

$$AB = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2}. \quad (7)$$

Аналогично вычисляются и длины других сторон.

Следующий шаг – вычисление косинусов необходимых для определения углов треугольника. Например, для угла CAB (он же α_1 , вычисляем косинус угла между векторами AB и AC):

$$\cos \alpha_1 = \frac{(X_3 - X_1)(X_2 - X_1) + (Y_3 - Y_1)(Y_2 - Y_1) + (Z_3 - Z_1)(Z_2 - Z_1)}{AB \cdot AC}. \quad (8)$$

Вычитание координат точки A в числителе согласовывает параллельный перенос векторов в начало координат [10, 11]. Аналогично вычисляется косинус угла ABC (он же $180^\circ - \alpha_2$) и далее преобразованием:

$$\cos(180^\circ - \arccos(ABC)),$$

получаем искомый $\cos \alpha_2$.

Затем, задавая значение тока I в кабеле, найдем величину магнитной индукции B (6), создаваемой каждым ПП рассматриваемого кабеля [12]. Для получения суммарной индукции в точке C необходимо выполнить векторное сложение индукций от каждого ПП в этой точке [13].

Магнитное поле, создаваемое каждым ПП в точке наблюдения C , имеет направление, перпендикулярное к плоскости, в которой лежат ПП и точка C , по правилу «правого винта», с учетом направления тока в ПП [14].

Для вычисления направления полного вектора необходимо найти векторное произведение векторов $\overrightarrow{AB}$ и $\overrightarrow{AC}$. Для этого рассчитывается определитель трёхмерной матрицы:

$$\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AC} = \vec{V} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & Z_2 - Z_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & Z_3 - Z_1 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Для расчёта определителя и получения координат вектора $\vec{V}$, определенного формулой (9), используются следующие формулы:

$$\begin{aligned} X_V &= (Y_2 - Y_1)(Z_3 - Z_1) - (Z_2 - Z_1)(Y_3 - Y_1); \\ Y_V &= (Z_2 - Z_1)(X_3 - X_1) - (X_2 - X_1)(Z_3 - Z_1); \\ Z_V &= (X_2 - X_1)(Y_3 - Y_1) - (Y_2 - Y_1)(X_3 - X_1). \end{aligned} \quad (10)$$

Длина вектора $\vec{V}$, определяется формулой Пифагора:

$$|V| = \sqrt{X_V^2 + Y_V^2 + Z_V^2}. \quad (11)$$

Если нормировать каждую координату вектора $\vec{V}(X_V, Y_V, Z_V)$ на его длину $|V|$, то получатся направляющие косинусы, которые достаточно умножить на скалярную величину магнитной индукции B [15], чтобы получить координаты вектора магнитной индукции, создаваемого каждым конкретным ПП:

$$\begin{aligned} X_{B\Pi\Pi} &= \frac{X_V}{|V|} B; \\ Y_{B\Pi\Pi} &= \frac{Y_V}{|V|} B; \\ Z_{B\Pi\Pi} &= \frac{Z_V}{|V|} B. \end{aligned} \quad (12)$$

Арифметическая сумма всех соответствующих координат для каждого ПП даёт координату вектора B :

$$\begin{aligned} X_B &= \sum X_{B\Pi\Pi}; \\ Y_B &= \sum Y_{B\Pi\Pi}; \\ Z_B &= \sum Z_{B\Pi\Pi}. \end{aligned} \quad (13)$$

Соответственно, длина этого суммарного вектора магнитной индукции B , отображающая абсолютное значение общей магнитной индукции от всего кабеля в точке C , определяется формулой:

$$B = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2 + Z_B^2}. \quad (14)$$

При наличии других кабелей, заданных аналогичным образом, для нахождения суммарной индукции в точке C такие же вычисления проводятся для каждого кабеля, а их суммарная индукция определяется сложением векторов B (арифметическая сумма соответствующих координат [16] с нахождением модуля результирующего вектора по формуле Пифагора.

Точка C названа скользящей в том смысле, что работа программы сводится к последовательному изменению координат точки наблюдения в заданных пределах перемещения, по заданной траектории и с заданным шагом. Результатом расчетов является карта индукции магнитного поля в заданной зоне наблюдения.

Результаты и их обсуждение

Попробуем реализовать на практике методологию учета магнитного поля для отдельного кабеля и составим карту индукции магнитного поля.

На рис. 3 показана геометрическая модель кабеля, построенная по данным таблицы, приведенной выше. Разместим произвольно на модели точку наблюдения C , например, с координатами: $X=0, Y=3, Z=0.5$ (м).

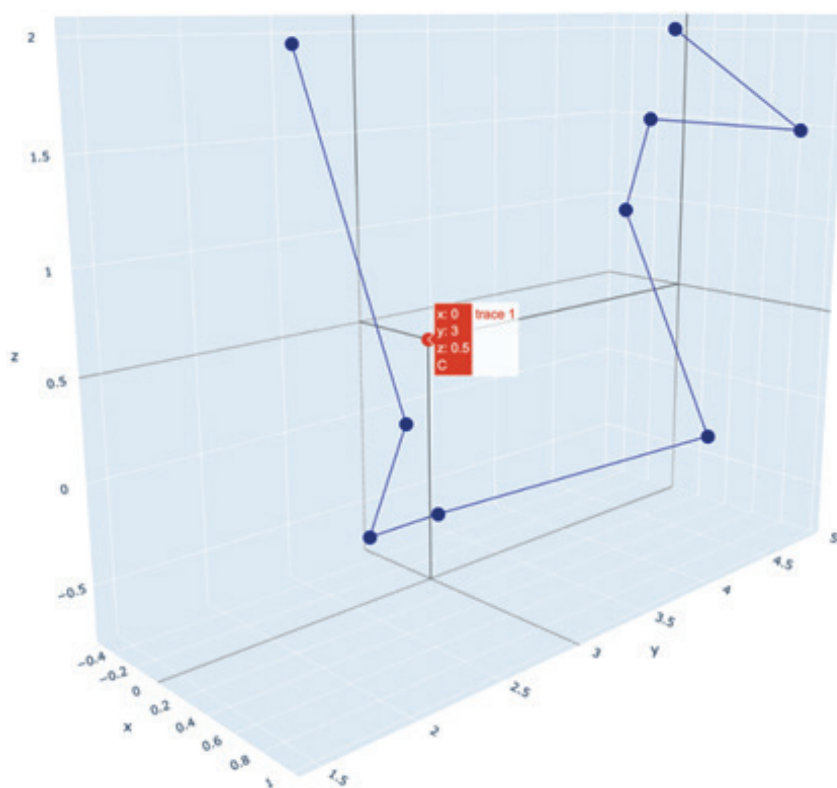


Рис. 3. Геометрическая модель рассматриваемого кабеля бортовой электропроводки ТО с обозначенной точкой наблюдения C .

Рассчитаем по описанной выше методике индукцию магнитного поля, создаваемого описанным кабелем в точке C для величины тока $I = 2$ А во всех последовательно включенных элементах ПП.

Влияние элементов конструкции ТО на распределение магнитного поля на данном этапе не учитываем. Результат расчета дает величину модуля общего вектора магнитной индукции в заданной точке наблюдения C , созданного всеми элементами силового кабеля

$$B = 6.22 \times 10^{-7} \text{ Тл.}$$

Представленная выше математическая модель позволяет анализировать величину модуля индукции магнитного поля в произвольно заданной точке наблюдения при произвольно заданном числе элементов тока вдоль силового кабеля.

Для наблюдения за динамикой изменения силы магнитного поля в пространстве вокруг ТО необходимо произвести расчёт по большему количеству точек. Поэтому предложено формировать область, размеры которой строятся относительно максимальных и минимальных значений размеров ТО по осям. После этого данная область делится на равные части по каждой из трех осей XYZ , образуя расчетную сетку из точек в пространстве с фиксированным шагом. Для примера создадим расчетную сетку из 1000 точек, по 10 точек на ось (рис. 4).

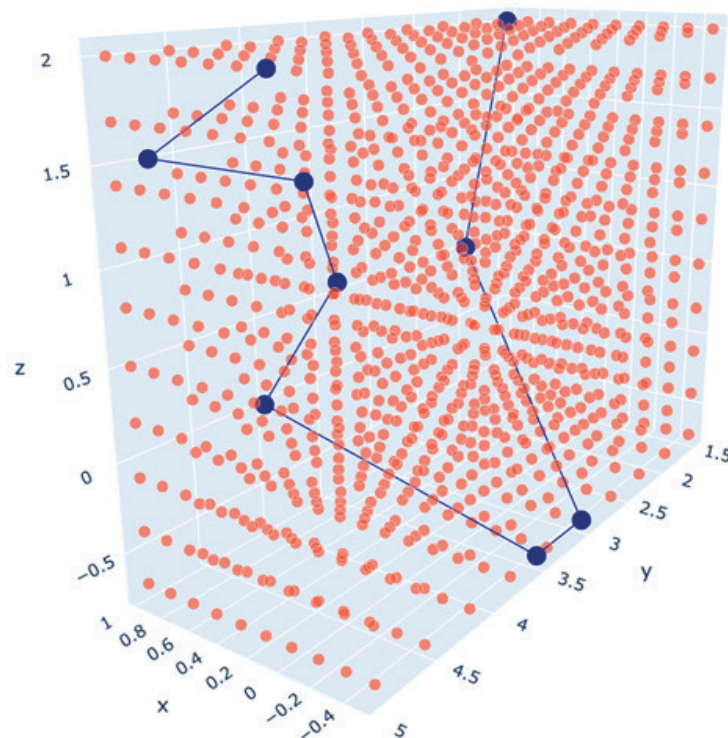


Рис. 4. Геометрическая модель рассматриваемого кабеля бортовой электропроводки ТО с расчетной сеткой из 1000 точек.

Расчет по предложенной математической модели производится для каждой отдельной точки из расчетной сетки (рис. 5).

На рис. 5 изображена так называемая точечная визуализация магнитного поля с использованием цвета как показателя величины модуля индукции магнитного поля (чем выше значение, тем цвет «теплее»). Для данного примера характерна одна «красная» точка с наивысшим значением индукции магнитного поля

Точечная визуализация имеет также и недостаток – при высоком разрешении расчетной сетки визуализируемый участок становится перенасыщен точками, которые имеют крайне малые значения. Это приводит к тому, что наблюдателю затруднительно определить необходимый участок расчётной сетки. Исходя из вышесказанного, целесообразно не отображать точки, значение модуля индукции которых стремится к нулю. Более того, на основе оставшихся точек можно визуализировать формируемое ими значимое поле, которое, по сути, формирует геометрическую форму, где вершины совпадают в пространстве с вычисленными значимыми точками и соединены между собой ребрами. Три значимые точки формируют плоскость. Промежуточные значения, которые лежат на ребрах или плоскостях, вычисляются с помощью линейной интерполяции между со-

седними точками, значение модуля индукции в которых уже рассчитано. Таким образом вокруг рассчитанных значимых точек формируется «аура напряженности», вписанная в вычисляемый объем, что упрощает исследование и анализ результата.

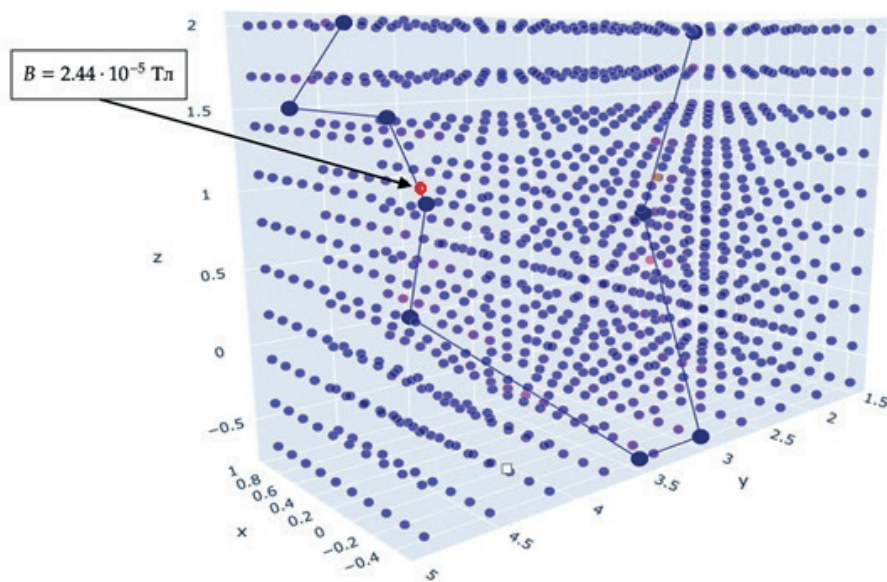


Рис. 5. Визуальное отображение магнитного поля по расчетной сетке из 1000 точек.

На рис. 6 приведена визуализация аналогичных результатов расчета модуля индукции для 1000 точек, как и на рис. 5, но с использованием линейной интерполяции.

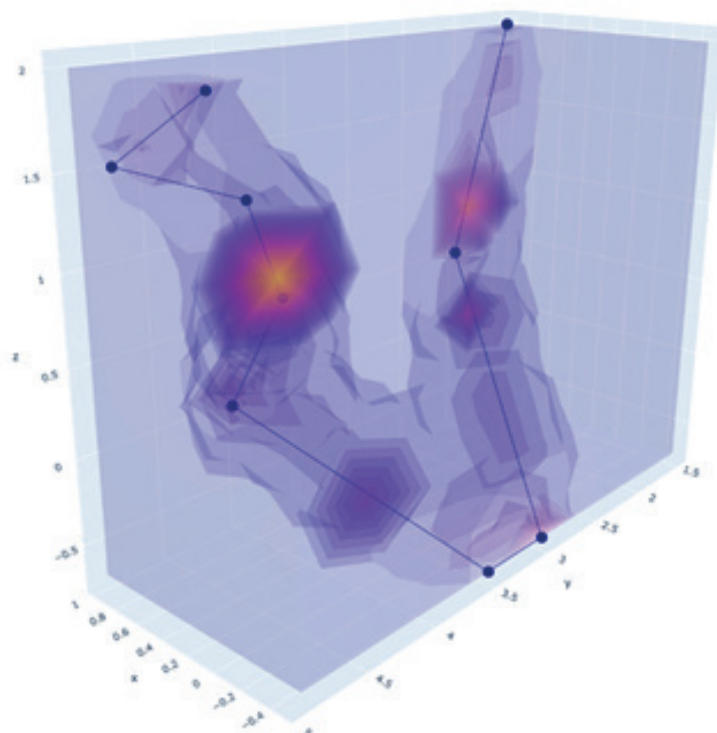


Рис. 6. Визуальное отображение магнитного поля по сетке из 1000 точек с использованием линейной интерполяции

Выводы

Создан простой и наглядный алгоритм, позволяющий в реальном времени, оценивая результаты измерений, моделировать магнитное поле силовых цепей технического объекта в заданной точке трехмерного пространства зоны наблюдения. Алгоритм позволяет эффективно оценивать взаимное влияние друг на друга энергоёмких и высокочувствительных подсистем современного технического объекта. Авторам неизвестны алгоритмы с аналогичными свойствами. Наиболее эффективным видится применение предложенной математической модели на этапе проектирования, а также при проведении замены и модернизации оборудования бортовых систем.

В последующих работах будет также учтён эффект обратных проводов в БКС, которые, как правило, выполняются бифилярными для уменьшения полей рассеяния, что потребует повышения чувствительности измерений и моделирования.

Созданный алгоритм и программный продукт на его базе могут найти применение при разработке сложных бортовых систем современных подвижных платформ, содержащих энергоёмкие системы движения, которые создают энергичные поля рассеяния, требующие учета в ходе проектирования, например, при разработке бортовой системы обеспечения современного авиационного лайнера типа SS-100.

Источники финансирования

Научно-исследовательская работа, результаты которой изложены в статье, выполнена за счет средств Централизованного фонда по теме «Система расчета электромагнитной совместимости бортовой кабельной сети на техническом объекте» на основании протокола заседания экспертной комиссии по подведению итогов Всероссийского конкурса «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий» от 29 мая 2020 г., шифр – НИЧ ИЦМР 19/2020.

Литература:

1. Кузнецов А.В. Элементарная электротехника. М.: ДМК-Пресс; 2018. 700 с. ISBN 978-5-97060-577-6
2. Попов Н.А. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Прометей; 2015. 48 с. ISBN 978-5-99058-869-1
3. Коршунова Л.Н. Магнитные явления. Магнитная индукция. Сила Ампера. Сила Лоренца. Электромагнитная индукция. М.: Контур-М; 2005. 95 с. ISBN 5-98642-013-6
4. Каку М. Физика будущего. М.: Альпина нон-фикшн; 2012. 582 с. ISBN: 978-5-91671-164-6
5. Распространение радиоволн, под ред. О.И. Яковлева. М.: URSS: ЛЕНАНД; 2009. 491 с. ISBN 978-5-9710-0183-6
6. Планк М. Введение в теоретическую физику. Часть 3. Теория электричества и магнетизма. М.-Л.: ГТТИ, 1933.
7. Henry W. Electromagnetic Compatibility Engineering. Wiley; 2009. 880 p. ISBN 978-0470189306
8. Алешкевич В.А. Электромагнетизм. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2014. 404 с. ISBN 978-5-9221-1555-1
9. Weston D.A. Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits, and Measurement, Third Edition. CRC Press; 2016. 1184 p. ISBN 978-1482299502
10. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Милковская Л.Б. Курс физики. Т. 2. Электричество и магнетизм (4-е издание). М.: Высшая школа; 1977. 375 с.
11. Джексон Дж. Классическая электродинамика. М.: Мир; 1965. 702 с.
12. Железняков В.В. Электромагнитные волны в космической плазме. Генерация и распространение. М.: Наука; 1977. 432 с.
13. Паршаков А.Н. Электромагнетизм в ключевых задачах. М.: Интеллект; 2019. 288 с. ISSN 978-5-91559-269-7
14. Попов А.Г. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Прометей; 2015. 46 с. ISBN 978-5-9905886-9-1

15. Бондарев Б.В., Калашников Н.П., Спирин Г.Г. Курс общей физики: в 3 кн. Книга 2. Электромагнетизм. Волновая оптика. Квантовая физика. М.: Изд-во Юрайт; 2019. 441 с. ISBN 978-5-9916-1754-3
16. Williams T. EMC for Product Designers. Newnes, 2016. 552 p. ISBN 978-0081010167
17. Blood E.B. Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields: Pat. 4945305 US. Appl. № US07/336,342. Publ. 31.07.1990.

References:

1. Kuznetsov A.V. *Elementarnaya elektrotehnika* (Elementary electrical engineering). Moscow: DMK-Press; 2018. 700 p. (in Russ.). ISBN 978-5-97060-577-6
2. Popov N.A. *Dvizhenie zaryazhennykh chastits v elektricheskikh i magnitnykh polyakh* (The movement of charged particles in electric and magnetic fields). Moscow: Prometei; 2015. 48 p. (in Russ.). ISBN 978-5-99058-869-1
3. Korshunova L.N. *Magnitnye yavleniya. Magnitnaya induktsiya. Sila Ampera. Sila Lorentsa. Elektromagnitnaya induktsiya* (Magnetic phenomena. Magnetic induction. Ampere Force. Lorentz Force. Electromagnetic induction). Moscow: Kontur-M; 2005. 95 p. (in Russ.). ISBN 5-98642-013-6
4. Kaku M. *Fizika budushchego* (Physics of the future). Moscow: Al'pina non-fikshn; 2012. 582 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-91671-164-6
- [Kaku M. Physics of the future. New York: Doubleday; 2011. ISBN: 978-0-385-53080-4]
5. *Rasprostranenie radiovoln* (Propagation of radio waves); (Ed.) O.I. Yakovlev. Moscow: URSS: LENAND; 2009. 491 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9710-0183-6
6. Plank M. *Vvedenie v teoreticheskuyu fiziku. Chast' 3. Teoriya elektrichestva i magnetizma* (Introduction to Theoretical Physics. Part 3. The theory of electricity and magnetism). Moscow- Leningrad: GTTI; 1933. 184 p. (in Russ.).
7. Henry W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley; 2009. 880 p. ISBN 978-0470189306
8. Aleshkevich V.A. *Jelektromagnetizm* (Electromagnetism). Moscow: FIZMATLIT; 2014. 404 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9221-1555-1
9. Weston D.A. *Electromagnetic Compatibility: Methods, Analysis, Circuits, and Measurement*, Third Edition. CRC Press; 2016. 1184 p. ISBN 978-1482299502
10. Detlaf A.A., Yavorskii B.M., Milkovskaya L.B. *Kurs fiziki. T. 2. Elektrichestvo i magnetizm* (4-e izdanie). (Physics course. V. 2. Electricity and magnetism (4th edition)). Moscow: Vysshaya shkola; 1977. 375 p. (in Russ.).
11. Jackson J. *Klassicheskaya elektrodinamika*. (Classical electrodynamics). Moscow: Mir; 1965. 702 p. (in Russ.).
12. Zheleznyakov V.V. *Elektromagnitnye volny v kosmicheskoi plazme. Generatsiya i rasprostranenie* (Electromagnetic waves in cosmic plasma. Generation and distribution). Moscow: Nauka; 1977. 432 p. (in Russ.).
13. Parshakov A.N. *Elektromagnetizm v klyuchevykh zadachakh* (Electromagnetism in key tasks). Moscow: Intellekt; 2019. 288 p. (in Russ.). ISSN 978-5-91559-269-7
14. Popov A.G. *Dvizhenie zaryazhennykh chastits v elektricheskikh i magnitnykh polyakh* (The movement of charged particles in electric and magnetic fields). Moscow: Prometei; 46 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9905886-9-1
15. Bondarev B.V., Kalashnikov N.P., Spirin G.G. *Kurs obshchei fiziki: v 3 kn. Kniga 2. Elektromagnetizm. Volnovaya optika. Kvantovaya fizika* (Electromagnetism. Wave optics. The quantum physics). Moscow: Izdatel'stvo Yurait; 2019. 441 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9916-1754-3
16. Williams T. *EMC for Product Designers*. Newnes, 2016. 552 p. ISBN 978-0081010167
17. Blood E.B. Device for quantitatively measuring the relative position and orientation of two bodies in the presence of metals utilizing direct current magnetic fields: Pat. 4945305 US. Appl. № US07/336,342. Publ. 31.07.1990.

Об авторах:

Тарланов Арслан Тарланович, преподаватель кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0002-7508-9682>

Курбанисмаилов Заур Магомедович, преподаватель кафедры КБ-4 «Интеллектуальные системы информационной безопасности» Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <http://orcid.org/0000-0002-5388-049X>

About the authors:

Arslan T. Tarlanov, Lecturer, Department of "Intelligent Information Security Systems" of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-7508-9682>

Zaur M. Kurbanismailov, Lecturer, Department of "Intelligent Information Security Systems" of the Institute for Integrated Security and Special Instrument Engineering MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <http://orcid.org/0000-0002-5388-049X>

Поступила: 25.05.2020; получена после доработки: 16.09.2020; принята к опубликованию: 30.09.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-143-156>



УДК 681.515.8

Настройка адаптивных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя

**К.Э. Чертилин,
В.Д. Ивченко[@]**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: professor55@rambler.ru

Для нестационарных объектов, параметры которых в процессе работы могут существенно меняться, применение обычных управляющих устройств в виде пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов может не обеспечить требуемое качество работы системы. Поэтому желательно создать адаптивную систему автоматического регулирования, в которой целенаправленно изменяется структура и параметры управляющего регулятора для обеспечения приспособляемости (настройки) системы к изменяющимся условиям работы на основе информации о свойствах объекта регулирования и внешним воздействиям. Проблема построения адаптивных систем является одной из наиболее важных в теории управления и смежных областях. Это обусловлено двумя обстоятельствами: сложностью решения проблемы в целом и наличием большого числа технически разнообразных ситуаций, нуждающихся в адаптации и оптимизации. В статье рассматривается адаптивная система автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя, включающая в себя магнитный усилитель, двигатель постоянного тока с редуктором, клапан подачи топлива и тахогенератор. Для реализации адаптивного управления были предложены три пропорционально-интегрально-дифференциальных регулятора: «классический», нечеткий и нейрон-нечеткий. Параметры «классического» регулятора оптимизированы при помо-

щи методов линейного программирования. Для нечеткого регулятора предложены функции принадлежности и база правил. Для нейро-нечеткого регулятора выбран алгоритм адаптации. При компьютерном моделировании системы применены три регулятора для трех режимов работы двигателя: малого газа, крейсерский и максимальный. На основе полученных переходных характеристик проведен сравнительный анализ качества работы трех регуляторов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем автоматического регулирования газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, адаптивная система, газотурбинный двигатель, цифровое ПИД-регулирование, нечёткое и нейро-нечёткое ПИД-регулирование, переходный процесс.

Для цитирования: Чертилин К.Э., Ивченко В.Д. Настройка адаптивных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):143-156. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-143-156>

Configuring adaptive PID-controllers of the automatic speed control system of the GTE

**Kirill E. Chertilin,
Valeriy D. Ivchenko[@]**

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: professor55@rambler.ru

For non-stationary objects with parameters, which could be changed significantly during operation, using conventional controllers in the form of proportional-integral-differential regulators may not provide the required quality of the system. Therefore, it is desirable to create an adaptive automatic control system with the structure and parameters of the control regulator that are purposefully changed to ensure the system adaptation, that is based on information about the properties of the object of regulation and external influences, to the changing operating conditions. The problem of designing adaptive systems is one of the most important in control theory and related fields. This is conditioned by two factors: the complexity of solving the problem as a whole and the presence of a large number of technically diverse situations that need to be adapted and optimized. In the paper, an adaptive system for the automatic control of the speed of a gas turbine engine, which includes a magnetic amplifier, a DC motor with a gearbox, a fuel supply valve and a tachogenerator, is developed. For adaptive control execution, three proportional-integral-differential controllers were proposed: "classic", fuzzy and neuro-fuzzy. The parameters of the "classic" controller were optimized using linear programming methods. The membership functions and the rule base were proposed for the fuzzy controller. An adaptation algorithm was selected for the neuro-fuzzy controller. Three controllers were used for three engine-operating modes: low-gas, cruiser and maximum during the computer simulation of the system. A comparative analysis of the quality of the

three regulators was performed and it is based on the obtained transient characteristics. The derived results can be used in the development of automatic control systems for gas turbine engines.

Keywords: automatic control system, adaptive system, gas turbine engine, digital PID-control, fuzzy and neuro-fuzzy PID-control, transient process.

For citation: Chertilin K.E., Ivchenko V.D. Configuring adaptive PID-controllers of the automatic speed control system of the GTE. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):143-156 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-143-156>

Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) широко применяются в авиастроении и оснащены различными системами автоматического регулирования (САР). В статье рассмотрено управление ГТД по одному из каналов – частоте вращения. В САР ГТД широкое применение находят корректирующие устройства – пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы [1], причем параметры регулятора настраиваются на один из типовых режимов работы двигателя, например, крейсерский. Переход на другой режим работы двигателя требует перестройки параметров самого регулятора и вызывает изменение параметров двигателя. Если нам известен этот режим и известны параметры двигателя, то «оптимальные» параметры ПИД-регулятора могут быть найдены [2]. Однако для других режимов работы двигателя параметры ПИД не являются «оптимальными».

Газотурбинный двигатель самолета, как объект регулирования, является нестационарной системой [3]. В зависимости от условий (высоты и скорости полета и др.) изменяются его структура и параметры, причем параметры ГТД такого рода, как коэффициенты усиления и постоянные времени, могут изменяться в разы. Поэтому возникает необходимость создания адаптивной системы автоматического регулирования, которая бы компенсировала нестационарность ГТД.

Целью работы является выбор метода настройки ПИД-регулятора, обеспечивающего наилучший переходный процесс. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- синтез «классического» и адаптивных ПИД-регуляторов;
- моделирование системы при различных режимах работы двигателя;
- анализ показателей качества переходных процессов САР.

Для создания адаптивной САР в данной статье предлагается использовать мягкие вычисления, такие как нечеткая логика и искусственные нейронные сети [2]. В работе предложена структурная схема и проведен сравнительный анализ действия адаптивной системы автоматического регулирования ГТД при различных настройках ПИД-регуляторов. Рассматриваются три метода настройки. Первый метод – «классический». Вторым и третьим методами реализуют соответственно нечеткий и нейро-нечеткий регуляторы. Выводы о работоспособности регуляторов сделаны на основе анализа показателей качества:

- времени переходного процесса,
- колебательности,
- перерегулирования,
- величины установившейся ошибки.

1. ПИД-регулирование

Дискретная передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид [4]:

$$W_p = k_{\Pi} + k_{\text{И}} \frac{Tz}{z-1} + k_{\text{Д}} \frac{z-1}{Tz} = \frac{\frac{k_{\text{Д}}}{T} + (-\frac{k_{\Pi}}{T} - 2\frac{k_{\text{Д}}}{T})z + (\frac{k_{\Pi}}{T} + k_{\text{И}}T + \frac{k_{\text{Д}}}{T})z^2}{z^2 - z}, \quad (1)$$

где k_{Π} , $k_{\text{И}}$, $k_{\text{Д}}$ – настраиваемые параметры регулятора, T – период дискретизации.

Основным отличием нечётких и нейро-нечётких ПИД-регуляторов от «классических» является их способность адаптироваться к изменениям параметров объекта (ГТД) и к внешним воздействиям. Эту задачу также можно решить, меняя коэффициенты классического регулятора в зависимости от различных обстоятельств работы двигателя (высота полёта, скорость полёта и т.д.). Однако это трудоемкая задача, которая внесет дополнительные погрешности в систему [5]. Нечёткий регулятор, получая на вход значения ошибки системы и её производной, фазифицирует эти данные и рассчитывает входные лингвистические переменные. Затем на основе базы правил регулятор должен подобрать соответствующие выходные лингвистические переменные. Затем ему необходимо дефазифицировать эти переменные в коэффициенты ПИД-регулятора. Отличием нейро-нечёткого регулятора от нечёткого является наличие у первого нейросетевой части. Её задача заключается в корректировке функций принадлежности на основе обучающего алгоритма для минимизации ошибки [6].

2. Принципы построения адаптивных систем

В теории автоматического управления существуют задачи, в которых САР объекта управления не соответствует эталонной. Это вызвано различными неопределённостями системы (изменение математической модели в результате внешних воздействий, шумы и др.). Для решения таких задач применяют робастное или адаптивное управление. В робастных системах производится настройка управляющего устройства в условиях неопределённостей с целью оптимизации процесса управления. Однако при робастном управлении коэффициенты регулятора настраиваются один раз и не меняются при выявлении новых неопределённостей [2].

Адаптивными системами управления называются системы, способные изменять параметры или структуру управляющего устройства в зависимости от изменения параметров объекта управления или внешних воздействий. Таким образом, система управления автоматически обеспечивает переходной процесс близкий к оптимальному [7]. В отличие от робастных систем, адаптивные системы реагируют на неопределённости в реальном времени. Поэтому при адаптивном управлении часто применяют мягкие вычисления (нечеткая логика, нейронные сети). На рис. 1 приведена функциональная схема адаптивной системы. Входное воздействие поступает на регулятор с рассчитанными параметрами. Управляющее воздействие $U_{\text{выход}}$ поступает на объект управления, на выходе которого формируется выходной сигнал $U_{\text{выход}}$. Этот сигнал обрабатывается блоком адаптации, формирующим новые параметры управляющего устройства.

В ходе адаптивного управления решаются две задачи. Первой задачей является поддержание экстремума управляемой величины. Для этой цели на объект подаются проб-

ные воздействия со стороны управления, анализируется знак изменения управляемой величины и производится управляющее воздействие, приближающее режим к точке экстремума. Второй задачей адаптации является поддержание оптимальной работы системы регулирования по условию максимального ее быстродействия. В этом случае показателем экстремума является время, в течение которого система приходит в соответствие с изменением задающего воздействия. Для решения этих задач в систему добавляется блок самонастройки [8].

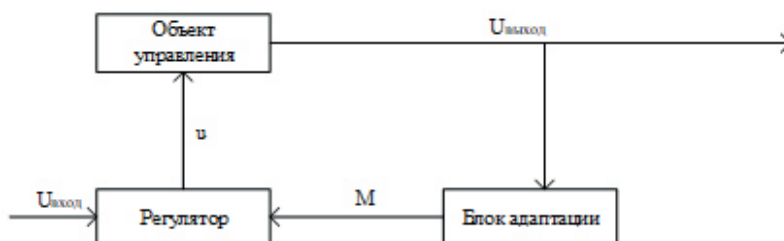


Рис. 1. Функциональная схема адаптивной системы управления.

Для реализации этого блока целесообразно использовать нейронные сети (НС). Во-первых, использование НС позволяет очень быстро и одновременно решать обе задачи за счет массивной параллельной структуры. Во-вторых, НС способны самообучаться и корректировать базу знаний для параметров регулятора на основе опыта применения тех или иных параметров при определенных условиях.

3. Система автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя

Структурная схема системы автоматического регулирования частоты вращения ГТД представлена на рис. 2:

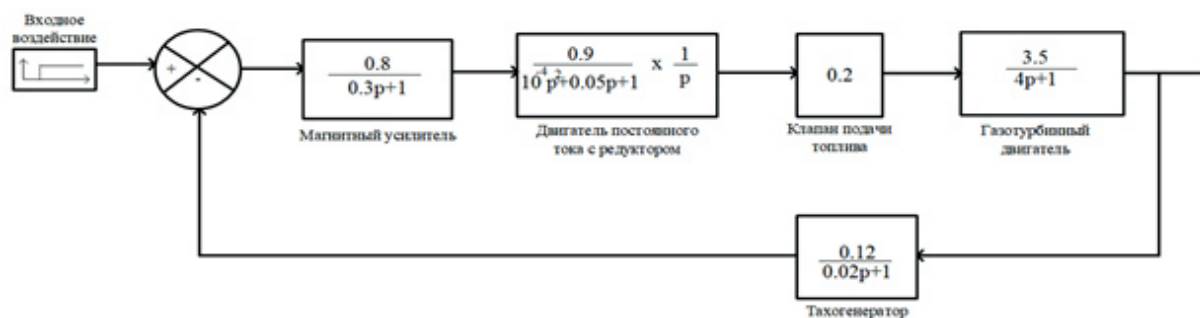


Рис. 2. Структурная схема САР частоты вращения ГТД.

Передающая функция газотурбинного двигателя (объекта регулирования) представлена в виде апериодического звена [3]:

$$W_{ГТД} = \frac{3.5}{4p+1}. \quad (2)$$

Запишем передаточную функцию замкнутой САР следующим образом:

$$W_{общ} = \frac{0.01p + 0.504}{0.000002p^6 + 0.001p^5 + 0.088p^4 + 1.502p^3 + 4.37p^2 + p + 0.006}. \quad (3)$$

4. Синтез ПИД-регуляторов

Зная передаточную функцию замкнутой САР, можно создать классический ПИД-регулятор [4]. Оптимизация коэффициентов осуществлялась симплекс-методом (линейное программирование) в инструментальной системе: $k_{II} = 3.03$, $k_{II} = 0.022$, $k_D = 1.605$. Применение симплекс-метода подробно описано в [9]. Тогда дискретная передаточная ПИД-регулятора функция равна:

$$W_p(z) = \frac{92.81z^2 - 92.8z + 32.1}{z^2 - z}. \quad (4)$$

Входными сигналами для контроллера, основанного на нечёткой логике, являются ошибка E и её скорость изменения dE . Выходным сигналом ПИД-регулятора является сигнал W_p с настраиваемыми коэффициентами k_P , k_{II} , k_D . Применительно к контроллеру входные сигналы и настраиваемые коэффициенты являются лингвистическими переменными.

Для реализации процедур фаззификации и дефаззификации задаются функции принадлежности для каждой входной и выходной переменных [10]. Существует несколько основных типов функций принадлежности (Λ -функции, Π -функции, Z -образные, S -образные) [5]. На основании экспериментов были выбраны треугольные Λ -функции принадлежности, представленные на рис. 3 (E), 4 (dE), 5 (k_P), 6 (k_{II}), 7 (k_D).

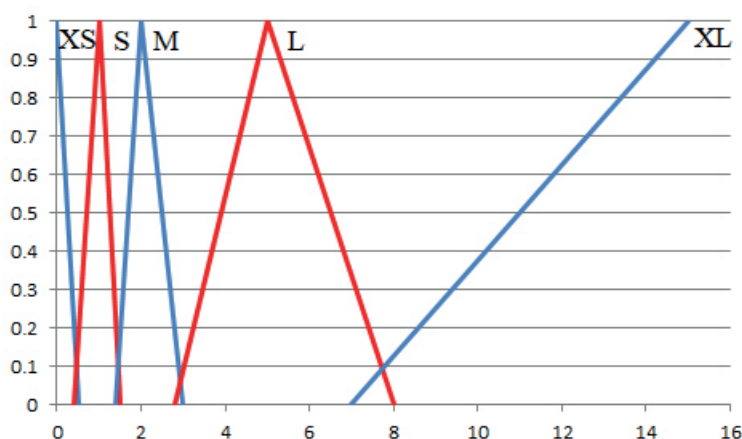


Рис. 3. Функции принадлежности входной лингвистической переменной E .

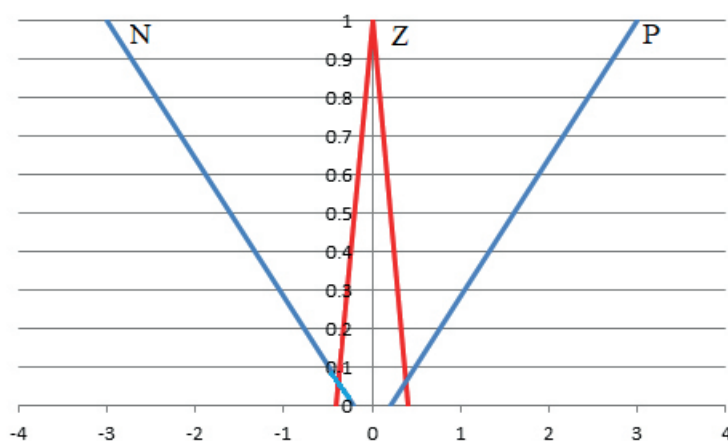


Рис. 4. Функции принадлежности входной лингвистической переменной dE .

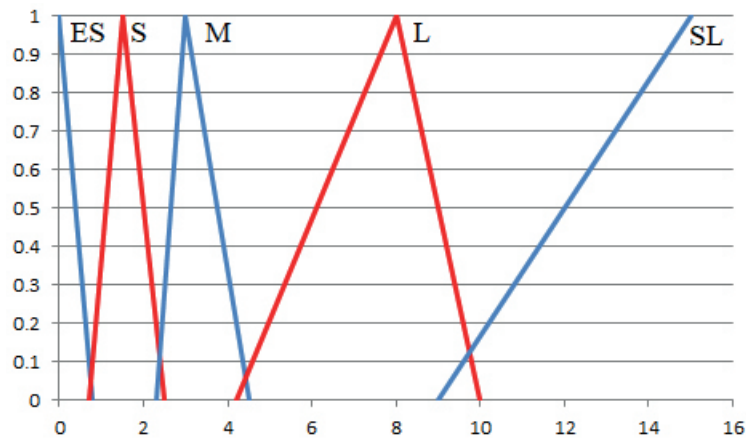


Рис. 5. Функции принадлежности выходной лингвистической переменной k_{II}

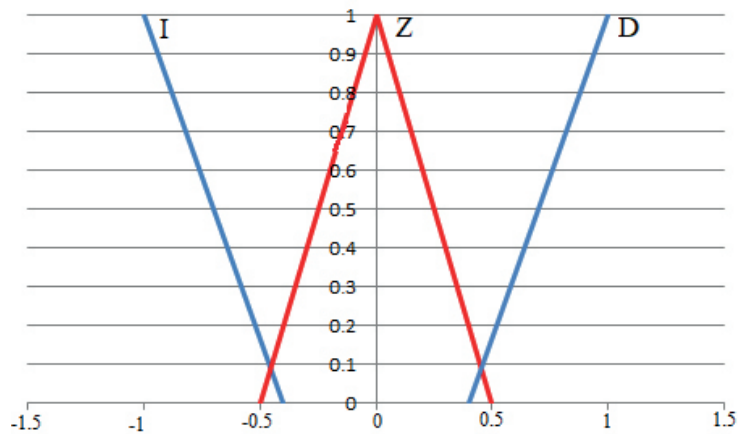


Рис. 6. Функции принадлежности выходной лингвистической переменной k_{II}

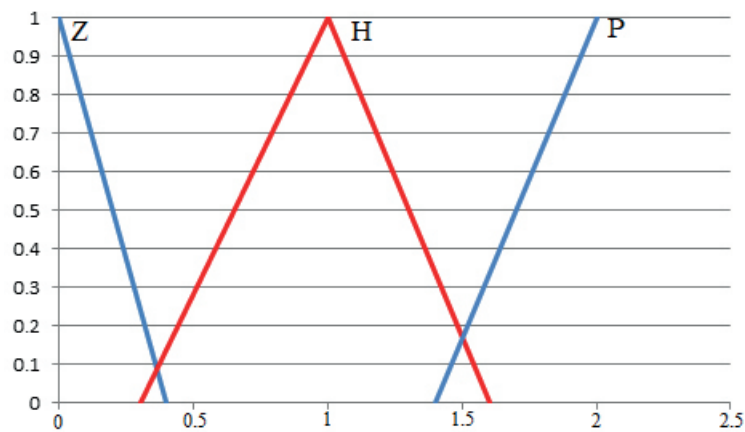


Рис. 7. Функции принадлежности выходной лингвистической переменной k_d

Далее формируется база правил. Под нечеткой базой знаний подразумевается совокупность правил «если – то», определяющих взаимосвязь между входными и выходными лингвистическими переменными контроллера.

База правил нечеткого ПИД-регулятора выглядит следующим образом:

1. Если $E = XS$ и $dE = N$, то $k_{II} = ES$, $k_{II} = I$, $k_d = Z$;
2. Если $E = S$ и $dE = N$, то $k_{II} = S$, $k_{II} = Z$, $k_d = H$;

3. Если $E = M$ и $dE = N$, то $k_{\Pi} = M, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
4. Если $E = L$ и $dE = N$, то $k_{\Pi} = L, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
5. Если $E = XL$ и $dE = N$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = N, k_{\Delta} = Z$;
6. Если $E = XS$ и $dE = Z$, то $k_{\Pi} = ES, k_{\Pi} = I, k_{\Delta} = P$;
7. Если $E = S$ и $dE = Z$, то $k_{\Pi} = S, k_{\Pi} = I, k_{\Delta} = H$;
8. Если $E = M$ и $dE = Z$, то $k_{\Pi} = M, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
9. Если $E = L$ и $dE = Z$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
10. Если $E = XL$ и $dE = Z$ то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
11. Если $E = XS$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = ES, k_{\Pi} = I, k_{\Delta} = P$;
12. Если $E = S$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = S, k_{\Pi} = Z, k_{\Delta} = H$;
13. Если $E = M$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
14. Если $E = L$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$;
15. Если $E = XL$ и $dE = P$, то $k_{\Pi} = SL, k_{\Pi} = D, k_{\Delta} = Z$.

Затем выбирается функция активизации. Оптимальной является min-функция активизации $\mu_j(Y) = \min(\beta_j, \mu_j(Y))$. При дефаззификации используется метод центра тяжести.

Проектирование нейро-нечёткого ПИД-регулятора частоты вращения газотурбинного двигателя осуществляется на основе полученных результатов при проектировании нечёткого ПИД-регулятора [10].

Вектор входных переменных нейро-нечеткого регулятора частоты вращения имеет вид:

$$\overline{X}_i = (\overline{x_{1i}}, \overline{x_{2i}})^T,$$

где $\overline{x_{1i}}$ – мгновенное значение ошибки, $\overline{x_{2i}}$ – мгновенное значение скорости изменения ошибки.

Сигналы ошибки и её производной (E и dE) сначала поступают на фаззификатор. Затем нейросеть корректирует базу правил дефаззикации. После этого выходной слой нейронов формирует выходной сигнал (настраивая коэффициенты ПИД-регулятора).

Нейронная сеть, приведенная на рис. 8, состоит из входного, скрытого и выходного слоев (здесь F_1, F_2 – активационные функции гиперболического тангенса адаптивных нейронов скрытого слоя; F_3 – линейная активационная функция нейрона выходного слоя НС; x_{cm}, v_{10}, v_{20} – «нейронные смещения»; v_{1i}, v_{2i} – степени принадлежности соответственно терм-множеств фаззификатора по отклонению частоты вращения и производной отклонения частоты вращения; ϕ, θ – настраиваемые коэффициенты нейронов скрытого слоя соответственно по отклонению частоты вращения и по производной отклонения частоты вращения). Входной (распределительный) слой НС представлен двумя векторами степеней принадлежности термов фаззификатора по отклонению частоты вращения и производной отклонения частоты вращения. Скрытый (промежуточный) слой НС состоит из двух нейронов. Каждый нейрон скрытого слоя дополнен обратной связью. Элемент сравнения в цепи обратной связи сопоставляет фактический сигнал с выхода сумматора нейрона с желаемым сигналом d (это может быть ошибка регулирования в САР или производная ошибки регулирования). Алгоритм адаптации (алгоритм Уидроу – Хоффа) подстраивает коэффициенты входной матрицы так, чтобы свести к нулю ошибку ε . Эта процедура заключается в сведении к минимуму квадрата ошибки с помощью итерационной

процедуры с переменным шагом. Сигнал с выхода сумматора нейрона через нелинейную активационную функцию типа гиперболического тангенса подается на вход нейрона выходного слоя.

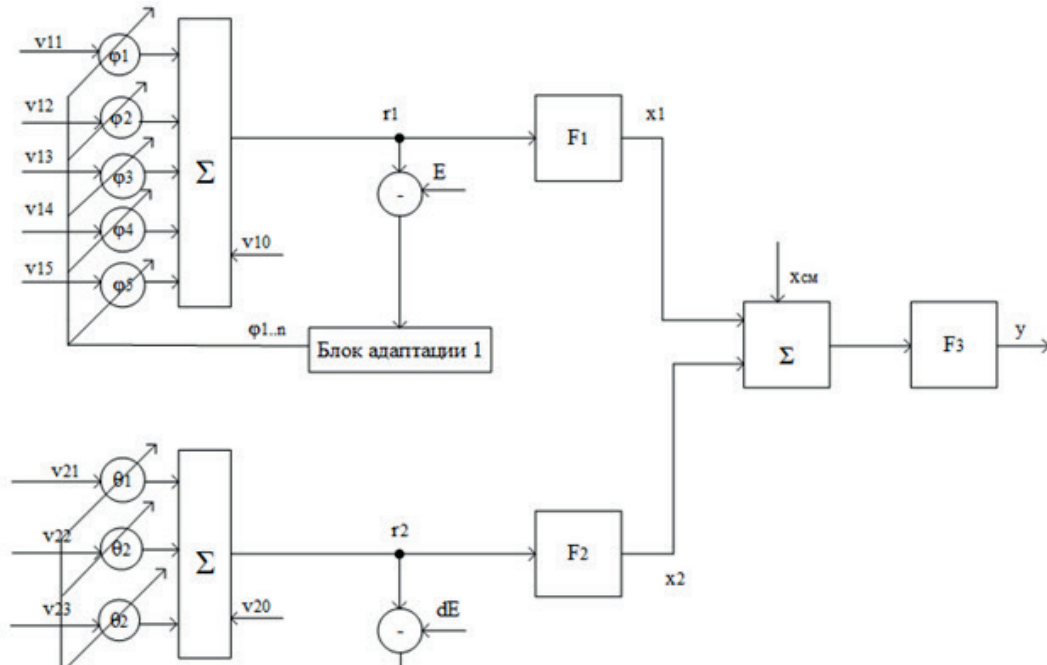


Рис. 8. Функциональная схема нейро-нечеткого ПИД-регулятора.

Выходной слой НС с линейной активационной функцией формирует управляющее воздействие y на регулируемый объект (ГТД), которое ограничено по модулю $|y| \leq y_{\max}$. НС описывается формулой:

$$y = F_3(x_{cm} + F_1(\sum_{i=1}^n v_{1i} \phi_i) + F_2(\sum_{i=1}^m v_{2i} \theta_i)), \quad (5)$$

где n, m – размерность терм-множеств векторов входа НС ($n = 5, m = 3$), v_1, v_2 – степень принадлежности соответственно терм-множеств фазсификатора по отклонению частоты вращения и производной отклонения частоты вращения.

Введем обозначения терм-множеств по отклонению частоты вращения: $v_{11} - \mu(E)_{XS}$; $v_{12} - \mu(E)_S$; $v_{13} - \mu(E)_M$; $v_{14} - \mu(E)_L$; $v_{15} - \mu(E)_{XL}$; по производной отклонения частоты вращения: $v_{21} - \mu\left(\frac{dE}{dt}\right)_N$; $v_{22} - \mu\left(\frac{dE}{dt}\right)_Z$; $v_{23} - \mu\left(\frac{dE}{dt}\right)_P$.

На входе блока адаптации 1 формируется сигнал ошибки $\varepsilon_1(k) = E - \sum_{i=1}^n \phi_i v_{1i_k}$. Вычисление новых значений весовых коэффициентов ϕ_i адаптивного нейрона по отклонению частоты вращения выполняется по рекуррентной формуле:

$$\phi_i(k+1) = \phi_i(k) + 2C_1 \varepsilon_1(k) x_{1i}(k), \quad (6)$$

где $2C_1$ задает скорость настройки коэффициентов ϕ_i нейрона по отклонению частоты вращения, определяемой скоростью сходимости итерационного процесса оптимизации,

$2C_1 = 0.01 - 0.1$, $x_{1i}(k) = \left(\frac{dr_1}{d\phi_i(k)} \right) k$ – производная k -й итерации i -го коэффициента нейрона отклонения частоты вращения [6].

На входе блока адаптации 2 формируется сигнал ошибки $\varepsilon_2(k) = \frac{dE}{dt} - \sum_{i=1}^m \theta_i v_{2i_k}$. Вычисление новых значений весовых коэффициентов θ_i адаптивного нейрона по производной отклонения частоты вращения выполняется по рекуррентной формуле:

$$\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + 2C_2 \varepsilon_2(k) x_{2i}(k), \quad (7)$$

где $2C_2$ задает скорость настройки коэффициентов θ_i нейрона по отклонению напряжения, определяемой скоростью сходимости итерационного процесса оптимизации, $C_2 = 0.01 - 0.1$, $x_{2i}(k) = \left(\frac{dr_2}{d\theta_i(k)} \right) k$ – производная k -й итерации i -го коэффициента нейрона отклонения напряжения [6].

Тогда выход нейро-нечеткого регулятора частоты вращения, согласно вышеуказанным соотношениям, соответствует формуле:

$$y = F_3(x_{cm} + r_1 th(r_1) + r_2 th(r_2)) = F_3(x_{cm} + x_1 + x_2), \quad (8)$$

где r_1, r_2 – выходы сумматоров нейронов закрытого слоя, x_1, x_2 – выходы нейронов закрытого слоя.

5. Моделирование системы с различными ПИД-регуляторами

Результаты моделирования САР с различными ПИД-регуляторами представлены на рис. 9. Нечеткий регулятор характеризуется синей переходной характеристикой, нейро-нечеткий – желтой, «классический» – красной.

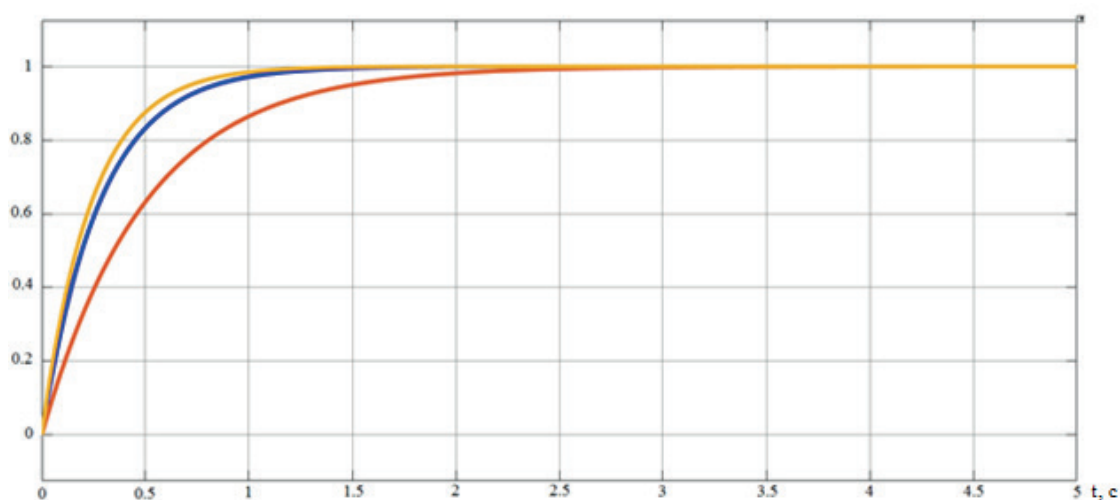


Рис. 9. Переходные процессы системы при работе двигателя в крейсерском режиме работы.

Переходные характеристики САР с нечётким и нейро-нечетким регулятором обладают одинаковым быстродействием (время переходных процессов – 1.5 с), что значительно меньше времени переходного процесса САР с «классическим» регулятором, которое составляет 2.5 с.

В действительности модель газотурбинного двигателя описывается дифференциальным уравнением высокого порядка (до 30-го) [3]. Это вызывает определенные сложности при синтезе регуляторов. При разработке систем управления применяют упрощенные модели, описываемые уравнениями 2–4 порядка. Однако не все регуляторы могут гарантировать нормальную работоспособность системы в условиях реального полета. Поэтому при исследовании и моделировании систем управления рассматриваются различные режимы работы газотурбинного двигателя.

Представленная ранее модель газотурбинного двигателя актуальна при крейсерском режиме (основном). Рассмотрим модели двигателя в двух других режимах: максимальный (набор высоты) и режим малого газа (наземный).

При максимальном режиме работы ГТД передаточная функция имеет вид [3]:

$$W_{ГТД} = \frac{5}{6p+1}. \quad (9)$$

При работе ГТД в режиме малого газа передаточная функция имеет вид [3]:

$$W_{ГТД} = \frac{2.5}{3.5p+1}. \quad (10)$$

Переходные характеристики САР с различными ПИД-регуляторами при максимальном режиме работы двигателя представлены на рис. 10.

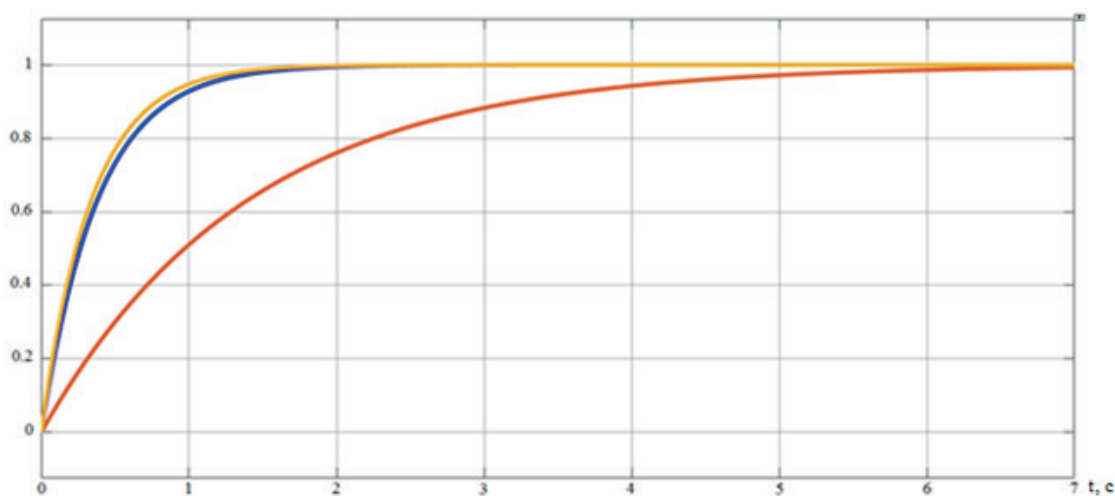


Рис. 10. Переходные процессы системы при работе двигателя в режиме набора высоты.

На рис. 11 представлен результат моделирования системы в режиме работы малого газа.

При максимальном режиме работы нечёткий и нейро-нечёткий ПИД-регуляторы обеспечивают время переходного процесса 2 с. Время переходного процесса системы с классическим регулятором — 6 с, что значительно выше времени переходного процесса САР с нечётким и нейро-нечётким ПИД-регуляторами.

В режиме работы малого газа переходной процесс системы с «классическим» регулятором обладает перерегулированием и колебательностью, что недопустимо. Нечёткий и нейронечёткий ПИД-регуляторы обеспечивают время переходного процесса 1 с.

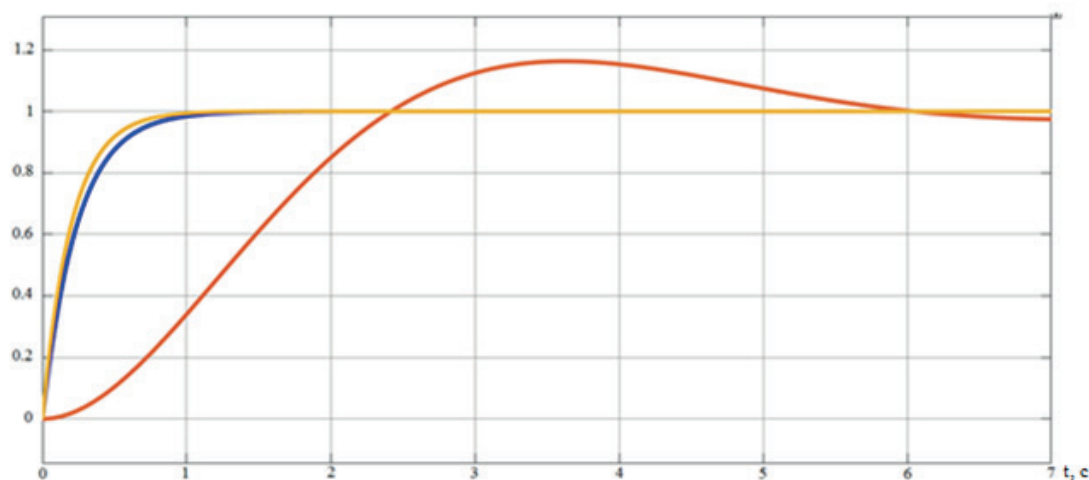


Рис. 11. Переходные процессы системы при работе двигателя в наземном режиме.

Заключение

В статье рассмотрены методы настройки адаптивных ПИД-регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения ГТД. Были проанализированы три вида ПИД-регуляторов («классический», нечёткий и нейро-нечёткий) для системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя.

Моделирование системы при крейсерском (основном) режиме работы ГТД показало, что все три регулятора обеспечивают протекание переходного процесса, удовлетворяющего основным требованиям к системам данного типа. Однако моделирование системы при изменении параметров САР ГТД проиллюстрировало неспособность классического регулятора обеспечивать необходимые показатели качества переходного процесса.

Нечёткий и нейро-нечёткий регуляторы продемонстрировали идентичные показатели качества системы, но переходной процесс системы с нейро-нечётким регулятором демонстрирует немного лучшее быстродействие.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что оптимальным подходом настройки ПИД-регулятора для системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя является нейро-нечеткий метод.

Литература:

1. Воробьёв В.В., Киселев А.М., Поляков В.В. Системы управления в летательных аппаратах. М.: ВВИА; 2008. 203 с.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления, под ред. Н.Д. Егупова. М.: МГТУ им. Баумана; 2001. 662 с.
3. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей, как объектов регулирования. М.: Изд-во МАИ; 1999. 97 с. ISBN 5-7035-2215-3
4. Рудинский И.Д. Технология проектирования автоматизированных систем обработки информации и управления. М.: Горячая Линия – Телеком; 2011. 304 с. ISBN 978-5-9912-0148-3
5. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. М.: Финансы и статистик; 2009. 320 с. ISBN: 5-279-02776-6

6. Будько М.Б., Будько М.Ю., Гирик А.В., Грозов В.А. Система управления мультироторным беспилотным летательным аппаратом на основе гибридного нейрорегулятора. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019;19(2):209–215.

<https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-209-215>

7. Вилесов А.В., Гуревич Е.И., Ивченко В.Д. Аналитический метод расчета и оптимизации параметров измерительных узлов автоматизированных систем контроля. *Вестник концерна ПВО «Алмаз-Антей»*. 2015;1(13):37–42.

8. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Физматлит; 2016. 464 с.

9. Гутова С.Г., Казакевич И.А. Настройка параметров пропорционально интегрального регулятора с помощью метода симплекс планирования. *Управление большими системами: сборник трудов*. 2016;61:95–117.

10. Рутковская Д.А., Пилинский М.В., Рутковский Л.Р. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудницкого. М.: Горячая линия – Телеком; 2008. 383 с. ISBN 5-93517-103-1

References:

1. Vorob'ev V.V., Kiselev A.M., Polyakov V.V. *Sistemy upravleniya v letatel'nykh apparatakh* (Aircraft control systems). Moscow: VVIA Publishing House; 2008. 203 p. (in Russ.).

2. *Metody robustnogo, neuro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya* (Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control); N.D. Egupov (Ed.). Moscow: MGTU im. Bauman Publishing House; 2001. 662 p. (in Russ.).

3. Gol'berg F.D., Batenin A.V. *Matematicheskie modeli gazoturbinnnykh dvigatelei, kak ob'ektov regulirovaniya* (Mathematical models of the gas turbine engines as control objects). Moscow: MAI Publishing House; 1999. 97 p. (in Russ.). ISBN 5-7035-2215-3

4. Rudinskii I.D. *Tekhnologiya proektirovaniya avtomatizirovannykh sistem obrabotki informatsii i upravleniya* (Design technology of automated information processing and control systems). Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom; 2011. 304 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0148-3

5. Yarushkina N.G. *Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh system* (Fundamentals of the theory of the fuzzy and hybrid systems). Moscow: Finansy i statistika; 2009. 320 p. (in Russ.). ISBN: 5-279-02776-6

6. Bud'ko M.B., Bud'ko M.Yu., Girik A.V., Grozov V.A. Multi-Rotor unmanned aerial control system based on Hybrid neuro-regulator. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2019;19(2):209–215 (in Russ.). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-2-209-215>

7. Vilesov A.V., Gurevich V.I., Ivchenko V.D. Analytical method of calculation and optimization of parameters measuring units automated control systems. *Vestnik kontserna PVO «Almaz-Antei» = J. «Almaz-Antey» Air and Space Defence Corporation*. 2015;1(13):37–42 (in Russ.).

8. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Mnogomernnye, nelineinye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* (Automatic control theory. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems). Moscow: Fizmatlit; 2016. 464 p. (in Russ.).

9. Gutova S.G., Kazakevich I.A. Tuning parameters proportional integral controller using the method of simplex planning. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov = Large-Scale Systems Control*. 2016;61:95–117 (in Russ.).

10. Rutkovskaya D.A., Pilinskii M.V., Rutkovskii L.R. *Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy, per. s pol'sk. I.D. Rudnitskogo* (Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems: trans. from Polish. by I.D. Rudnitsky). Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom; 2008. 383 p. (in Russ.). ISBN 5-93517-103-1

[Rutkowska, Danuta Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. Warszawa; Łódź: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2004]

Об авторах:

Чертилин Кирилл Эдуардович, аспирант кафедры автоматических систем Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0003-1211-4905>

Ивченко Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus Author ID: 56664128900.

Настройка адаптивных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов системы автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя

About the authors:

Kirill E. Chertilin, Postgraduate Student, Department of Automatic systems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0003-1211-4905>

Valeriy D. Ivchenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Automatic systems, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia). Scopus Author ID: 56664128900.

Поступила: 17.02.2020; получена после доработки: 23.07.2020; принята к опубликованию: 07.09.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-157-166>



УДК: 621.372.8

Дифракция низкочастотных волн на упругих тонкостенных оболочках вращения

**В.Ю. Приходько[@],
До Ву Минь Тханг**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

В работе найдены асимптотические и функциональные соотношения, связывающие характеристики рассеянного ближнего и дальнего полей с упругими и спектральными характеристиками тонкостенных вытянутых упругих оболочек, описываемых теорией Лява. Исследование проводилось методом двумасштабных разложений. Для ближнего рассеянного поля получены рекуррентные системы краевых задач для уравнений Лапласа и Пуассона, решения которых найдены в явном виде. Диаграммы направленности рассеянного поля получены при помощи теории волновых потенциалов для уравнения Гельмгольца. Найдены асимптотические формулы для плотностей потенциалов простого и двойного слоев. Это позволило представить асимптотику диаграммы направленности рассеянного поля в виде параметрических интегралов, зависящих от углов падения и наблюдения, частоты, формы поверхности и материальных характеристик оболочки. Асимптотический метод оказался эффективен для сильно вытянутых оболочек, когда отношение максимального продольного диаметра к максимальному диаметру вращения больше десяти. Для таких сильно вытянутых тел применение различных разностных и итерационных схем проблематично из-за трудностей триангуляции поверхности оболочки. Приведены численные реализации расчетов диаграмм направленности стальной оболочки сфероидальной формы в воде при различных углах падения плоских волн в широком диапазоне частот. Проведенные в работе численные расчеты не привязаны к определенной частоте, так как геометрические размеры приведены в длинах волн. Расчеты показали, что диаграмма направленности для вытянутых тел начинает отличаться от сферически симме-

тричной при значениях $kl > 4$. При возрастании волновых размеров оболочки возникают лепестки диаграммы направленности, направление которых зависит от вышеуказанных параметров. Количество лепестков, их направленность и мощность можно изменять при помощи специальных распределений импедансов поверхности оболочек.

Ключевые слова: асимптотические разложения, рассеянное поле, дифференциальные уравнения, краевые задачи, теория тонких оболочек.

Для цитирования: Приходько В.Ю., До Ву Минь Тханг. Дифракция низкочастотных волн на упругих тонкостенных оболочках вращения. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):157-166. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-157-166>

Diffraction of low-frequency waves on elastic thin-walled shells of rotation

Vyacheslav Yu. Prikhodko[@],
Thang Minh Vu Do

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

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

Asymptotic and functional relations connecting the characteristics of scattered near and far fields with elastic and spectral characteristics of thin-walled elongated elastic shells described by the Love theory were found. The study was carried out by the method of two-scale expansions. For the near scattered field, recurrent systems of boundary value problems for Laplace and Poisson equations were obtained, the solutions of which were found explicitly. The radiation patterns of the scattered field were obtained using the theory of wave potentials for the Helmholtz equation. Asymptotic formulas for the potential densities of simple and double layers were found. This made it possible to present the asymptotics of the scattered field directivity diagram in the form of parametric integrals that depend on the angles of incidence and observation, frequency, surface shape, and material characteristics of the shell. The asymptotic method was effective for strongly elongated shells when the ratio of the maximum longitudinal diameter to the maximum diameter of rotation is more than ten. For such highly elongated bodies, the use of various difference and iterative schemes is problematic due to the difficulties of triangulating the shell surface. Numerical implementations of calculations of directional diagrams of a spheroidal steel shell in water at different angles of incidence of plane waves in a wide frequency range are given. The numerical calculations performed in this work are not tied to a specific frequency, since the geometric dimensions are given in wavelengths. Calculations have shown that the radiation pattern for elongated bodies begins to differ from the spherically symmetrical one at values $kl > 4$. When the wave size of the shell increases, the lobes of the directional diagram appear. The lobes direction depends on the above parameters. The number of lobes, their direction and power can be changed by using special distributions of the shell surface impedances.

Keywords: asymptotic expansions, scattered field, differential equations, boundary tasks, thin shells theory.

For citation: Prikhodko V.Yu., Thang Minh Vu Do. Diffraction of low-frequency waves on elastic thin-walled shells of rotation. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = *Russian Technological Journal*. 2020;8(6):157-166 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-157-166>

1. Постановка задачи

Рассмотрим упругую замкнутую тонкостенную оболочку со срединной поверхностью S , описываемой в цилиндрической системе координат r, φ, z уравнением

$$r = \varepsilon F(z)$$

где $\varepsilon = d/l$, $F(z) > 0$, d – максимальный диаметр оболочки, l – длина оболочки, $z \in (-l/2, l/2)$, $F(\pm l/2) = 0$.

Оболочка описывается следующими материальными параметрами: h – полутолщина стенок оболочки; параметр, описывающий тонкостенность оболочки $\varepsilon_1 = 2h/d \ll 1$; E – модуль Юнга; ρ_p – плотность материала оболочки; ν – коэффициент Пуассона; $c_p = \sqrt{E/\rho_p}$ – скорость продольных волн в стержне из материала оболочки. Срединная поверхность оболочки описывается системой динамических дифференциальных уравнений движения в частных производных (зависимость от времени $\exp(-i\omega t)$ везде опускаем):

$$\begin{aligned} L_{ij} \vec{u} &= \sum_{j=1}^3 \left(h^2 N_{ij} / 3 + L_{ij} \right) u_j - k_p^2 u_i = \gamma p_i, i = 1, 2, 3, \\ \frac{\partial}{\partial n} (p + p_{ins}) &= \rho \omega^2 w(\vec{r}), \quad \vec{r} \in S. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь N_{ij}, L_{ij} – матричные дифференциальные операторы в частных производных, заданные на поверхности S и определяемые теорией тонкостенных оболочек (в настоящей работе используется моментная теория тонкостенных оболочек типа Лява в варианте и обозначениях [1, стр. 77]); u_1, u_2 – тангенциальные компоненты вектора смещений; $u_3 = w$ – прогиб; $k_p = \omega/c_p$; $\frac{\partial}{\partial n}$ – производная по направлению внешней нормали к срединной поверхности оболочки; $\gamma = (2Eh)^{-1}$. Пусть оболочка находится в сжимаемой среде с плотностью ρ и скоростью звука c , а на оболочку падает плоская звуковая волна

$$p_{ins} = A \exp(i\vec{k}, \vec{x}), \quad \vec{k} = k(\cos \varphi_0 \sin \theta_0, \sin \varphi_0 \sin \theta_0, \cos \theta_0), \quad k = |\vec{k}| = \omega/c \quad (2)$$

в сферической системе координат (R, θ, φ) с центром, совпадающим с цилиндрической системой. Тогда в уравнениях системы (1) $p_1 = p_2 = 0$, $p_3 = p + p_{ins}$, где рассеянное оболочкой поле удовлетворяет уравнению Гельмгольца во внешней к оболочке области пространства

$$\rho \operatorname{div} \left(\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p \right) + k^2 p = 0 \quad (3)$$

и краевому условию на срединной поверхности оболочки

$$\frac{\partial}{\partial n} (p + p_{ins}) = \rho \omega^2 w(\vec{x}), \quad \vec{x} \in S. \quad (4)$$

Математическую постановку задачи дифракции завершает условие излучения Зоммерфельда

$$p(\vec{x}) = \Phi(\theta, \varphi) \exp(ikR) / R + O(R^{-2}), \quad R \rightarrow \infty, \quad (5)$$

равномерно по углам сферической системы координат (R, θ, φ) ; $F(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности рассеянного поля.

2. Метод решения

Поставленная задача (1)–(5) – это внешняя краевая задача для уравнения Гельмгольца. Краевым условием на границе является решение краевой задачи для оператора теории оболочек, заданного на поверхности. Эти задачи связаны между собой. В отличие от случая классических краевых условий Дирихле или Неймана, поставленная задача относится к типу так называемых неклассических краевых задач, иногда называемых гранично-контактными задачами. Такую задачу не удастся свести к интегральному уравнению, так как оператор теории оболочек – это система из трех уравнений в частных производных (два уравнения второго порядка и уравнение четвертого порядка) [1]. Наиболее эффективными методами решения являются асимптотические методы, разработанные для классических краевых условий сравнительно недавно [2–6]. В работах [7–11] задачи дифракции волн решаются другими методами, которые пока не удастся применить к рассматриваемой здесь задаче.

Представим рассеянное поле в виде суммы рассеянных полей от абсолютно жесткого тела и собственно упругой составляющей

$$p = p^{(r)} + p^{(e)}. \quad (6)$$

Получим две внешние краевые задачи для уравнения Гельмгольца

$$(\Delta + k^2)p^{(r)} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial n}(p + p_{ins}) = 0, \quad \vec{x} \in S; \quad (7)$$

$$(\Delta + k^2)p^{(e)} = 0, \quad \frac{\partial p^{(e)}}{\partial n} = \rho \omega^2 w, \quad \vec{x} \in S; \quad L_i \vec{u} = \gamma p_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (8)$$

с условиями излучения Зоммерфельда.

Для решения задач (7), (8) используем метод двумасштабных разложений [2]. В ближней зоне будем искать решение в виде

$$p^{(e)} = \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon^m [p_{m0}(\xi, \varphi, z) + \ln \varepsilon p_{m1}(\xi, \varphi, z)],$$

$$\vec{u} = \vec{u}_{00}(\varphi, z) + \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon^m [\vec{u}_{m0}(\varphi, z) + \ln \varepsilon \vec{u}_{m1}(\varphi, z)], \quad \xi = r / \varepsilon, \quad (9)$$

а в дальней зоне

$$p^{(e)} = \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon^m p_m.$$

После подстановки (9) в (8) получаем рекуррентную систему уравнений Лапласа и Пуассона

$$\Delta p_{ij} = 0, \quad i = 1, 2; \quad \Delta p_{ij} = -\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2\right)p_{i-2,j}; \quad i = 3, 4, \dots; \quad j = 0, 1. \quad (10)$$

где $\Delta = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{\xi^2} \frac{\partial}{\partial \varphi^2}$.

Используя выражение для нормальной производной в ближней зоне

$$\frac{\partial}{\partial n} = \frac{1}{B} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} - \varepsilon F' \frac{\partial}{\partial z} \right) + O(\varepsilon^2), \quad B^2 = 1 + (\varepsilon F')^2, \quad \text{получаем рекуррентную систему краевых условий на поверхности оболочки}$$

$$\frac{\partial \mathcal{P}_{10}}{\partial \xi} = B \rho \omega^2 w_{00}, \quad \frac{\partial \mathcal{P}_{11}}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{P}_{21}}{\partial \xi} = B \rho \omega^2 w_{11}, \quad \frac{\partial \mathcal{P}_{20}}{\partial \xi} = B \rho \omega^2 w_{10}, \quad (11)$$

$$L\bar{u}_{00} = \bar{\gamma} A \exp(ik_3 z), \quad \bar{\gamma} = (0, 0, \gamma); \quad L\bar{u}_{10} = \bar{\gamma} (2iAB(k_x \cos \varphi + k_y \sin \varphi) \exp(ik_3 z) + p_{20}); \quad L\bar{u}_{11} = \bar{\gamma} p_{11}.$$

Таким образом, получается замкнутая последовательность краевых задач для рекуррентной системы уравнений Пуассона (10).

Решение в дальней зоне будем искать в виде волновых потенциалов простого и двойного слоев, распределенных на оси оболочки

$$p^{(e)} = \Pi(v_1) + \frac{\partial}{\partial x} \Pi(v_2) + \frac{\partial}{\partial y} \Pi(v_3), \quad (12)$$

где $v_i(t)$ – плотности потенциалов.

Асимптотика потенциала простого слоя в дальней зоне имеет вид

$$\Pi = \frac{\exp(ikR)}{R} \int_{-l/2}^{l/2} v(t) \exp(-ikt \cos \theta) dt,$$

$v(z)$ – искомые плотности потенциалов. Неизвестные плотности найдем из краевых задач (6)–(12), используя асимптотические представления потенциала при $r \rightarrow 0$

$$\Pi = \ln r \sum_0^\infty a_n(z) r^{2n} + \sum_0^\infty b_n(z) r^{2n}, \quad (13)$$

где $a_0(z) = -2v(z)$, $b_0(z) = -\int_0^\infty \ln 2td((v(z+t) + v(z-t)) \exp(ikt))$, остальные коэффициенты вычисляются при помощи рекуррентных соотношений. Отметим что ряды (13) сходятся равномерно по z и эти ряды можно дифференцировать любое число раз. В частности, для потенциалов двойного слоя получаем

$$\frac{\partial}{\partial x} \Pi(v_2) = \cos \varphi a_2(z)/r + O(1), \quad \frac{\partial}{\partial y} \Pi(v_3) = \sin \varphi a_3(z)/r + O(1).$$

Здесь a_n вычисляются по рекуррентной формуле:

$$4(n+1)^2 a_{n+1} + (d^2/dz^2 + k^2) a_n = 0.$$

3. Ближнее поле и смещения оболочки

Из уравнений (10), (11) найдем

$$p_{10} = C_1 \ln \xi + C_2, \quad C_1 = BF \rho \omega^2 w_{00}, \quad C_2 = 0.$$

Перепишем главный член дальнего поля (12) в переменных ближнего поля и будем сращивать внешнее и внутреннее разложения в области, где $r \rightarrow 0$. Проводя процедуру сращивания внешних и внутренних разложений, получаем искомую плотность потенциалов в следующем виде

$$\nu_1 = BF\rho\omega^2 w_{00}/2, \nu_2 = \nu_3 = 0,$$

и главный член асимптотики упругой составляющей ближнего поля

$$p_{10} = -d/lBF\rho\omega^2 w_{00} \ln r.$$

Для следующего приближения получаем краевую задачу для уравнения Лапласа

$$\Delta p_{20} = 0, \frac{\partial p_{20}}{\partial \xi} = B\rho\omega^2 w_{10},$$

где $w_{10} = w_{10}^0 + w_{10}^1 \cos \varphi + w_{10}^2 \sin \varphi$, w_{10}^i являются решениями замкнутых систем дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} L_0 \vec{u}_{10}^0 &= -\vec{\gamma} BF\rho\omega^2 w_{00} \ln F, \\ L_1 \vec{u}_{10}^1 &= \vec{\gamma} 2ikAF \sin \theta_0 \cos \varphi_0 \exp(ik_3 z), \\ L_1 \vec{u}_{10}^2 &= \vec{\gamma} 2ikAF \sin \theta_0 \sin \varphi_0 \exp(ik_3 z). \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь L_0 и L_1 – операторы осесимметричной и балочной гармоник теории оболочек, которые исследованы в работах [2–4]. В общем решении уравнения Лапласа

$$p_{20} = (C_1/\xi + C_2\xi)\cos\varphi + (C_3/\xi + C_4\xi)\sin\xi + C_5 \ln \xi + C_6$$

неизвестные коэффициенты находим аналогично первому приближению из уравнений (11). Аналогично решается задача для жесткой составляющей дифракционного поля.

4. Основные результаты

Полученные выше формулы для плотностей потенциалов (12)–(14) позволяют представить диаграмму направленности, согласно формулам (12), (13), в виде параметрических интегралов, где параметрами являются угол падения плоской волны, угол наблюдения, частота, форма поверхности и материальные характеристики оболочки:

$$\begin{aligned} \Phi(\theta, \varphi) &= \frac{\rho\omega^2}{2} \int_{-l/2}^{l/2} (\varepsilon w_{00}^0 + \varepsilon^2 w_{10}^0) BF \exp(-ikt \cos \theta) dt + \\ &+ \frac{A\varepsilon^2}{4} (2k \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_0)) \int_{-l/2}^{l/2} F^2 \exp(-ikt(\cos \theta_0 - \cos \theta)) dt + \\ &+ \int_{-l/2}^{l/2} (k^2 \sin^2 \theta F^2 + 2FF'ik \cos \theta) \exp(-ikt(\cos \theta_0 - \cos \theta)) dt. \end{aligned} \quad (15)$$

В ряде задач дифракции поверхность оболочки заменяется импедансной поверхностью, описываемой классическим краевым условием третьего рода

$$\left(\frac{\partial}{\partial n} + ikg\right)(p + p_{ins}) = 0, \quad \vec{x} \in S,$$

где $g = \rho c / Z(z)$, $Z(z)$ – импеданс поверхности оболочки, который является комплекснозначной функцией и может быть создан при помощи специальных технологий. Возможны два варианта:

1. Если $\operatorname{Re} g \geq 0$, то энергия падающей волны частично поглощается оболочкой или распространяется за оболочкой без поглощения.

2. Если $\operatorname{Re} g < 0$, то поверхность оболочки активна, то есть происходит излучение оболочки, и в этом случае необходимо дополнительное исследование задачи. В первом случае можно получить выражение для диаграммы направленности в виде формулы

$$\begin{aligned} \Phi(\theta, \varphi) = & \frac{ik^2 d}{2l} p_{ins} \int_{-l/2}^{l/2} g(t) F(t) \exp(-ikt(\cos \theta_0 - \cos \theta)) dt + \\ & + \frac{A\varepsilon^2}{4} (2k \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_0)) \int_{-l/2}^{l/2} F^2 \exp(-ikt(\cos \theta_0 - \cos \theta)) dt + \\ & + \int_{-l/2}^{l/2} (k^2 \sin^2 \theta F^2 + 2FF'ik \cos \theta) \exp(-ikt(\cos \theta_0 - \cos \theta)) dt. \end{aligned}$$

В этом случае проведены численные расчеты для сфероидальной оболочки с параметрами $d/l = 0/1$, $kl = 10$, $\varphi = \varphi_0 = 0$, $g = 0.1$ при различных углах падения плоской волны $\theta_0 = 0; \pi/4; \pi/2$. Результаты расчетов представлены на рис. 1, 2, 3 соответственно, на которых изображены нормированные модули диаграмм направленности

$$|\Phi(\theta, \varphi)| / \max |\Phi(\theta, \varphi)|.$$

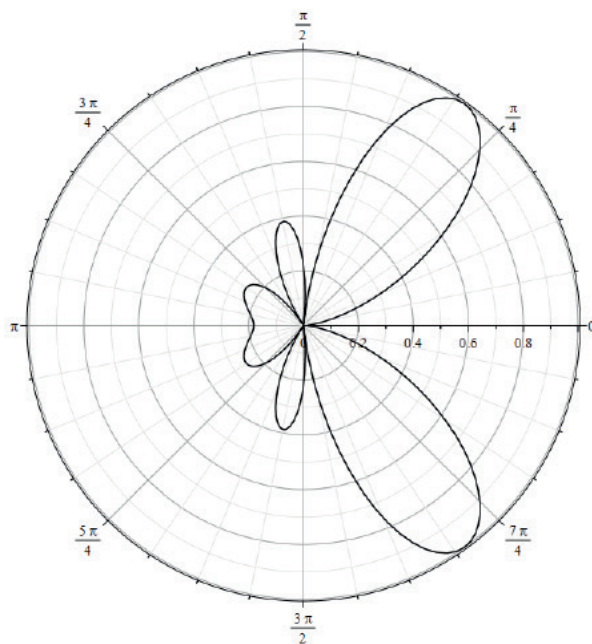


Рис. 1.

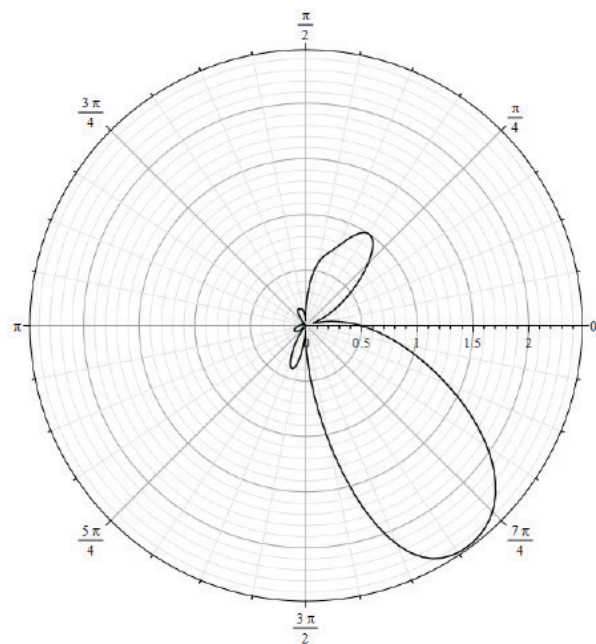


Рис. 2.

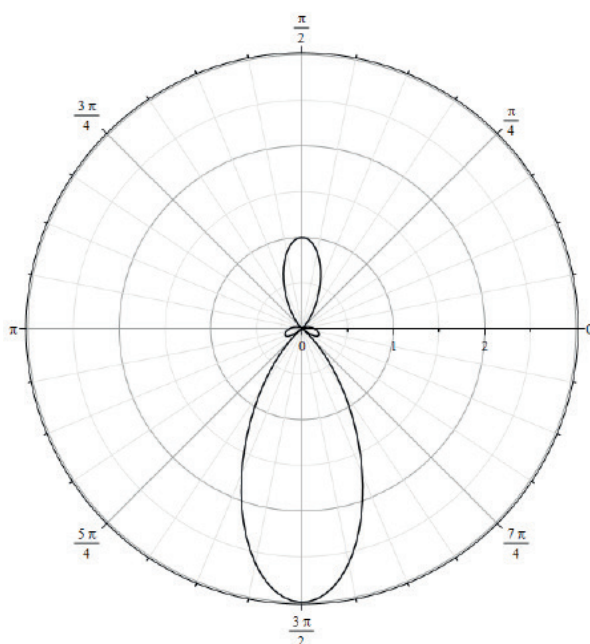


Рис. 3.

Отметим, что проведенные расчеты не привязаны к определенной частоте, так как геометрические размеры приведены в длинах волн. Расчеты показали, что диаграмма направленности для вытянутых тел начинает отличаться от сферически симметричной при значениях $kl > 4$. На рис. 4 показана диаграмма для пограничной частоты $kl = 4$. При возрастании волновых размеров оболочки возникают лепестки диаграммы направленности, угловые характеристики и тонкая структура которых зависит от вышеуказанных параметров. Количество лепестков, их направленность и мощность можно изменять при помощи специальных распределений импедансов поверхности оболочек и кривизны поверхности.

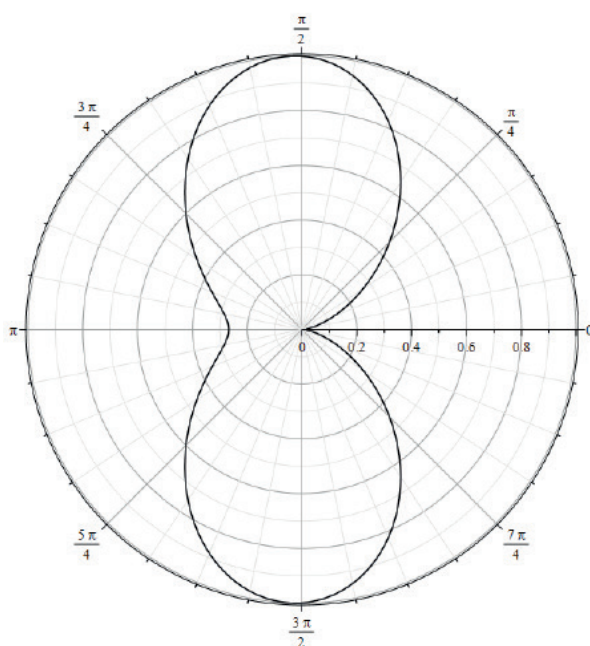


Рис. 4.

Литература:

1. Гольденвейзер А.Л., Лидский В.Б., Товстик П.Е. Свободные колебания тонких упругих оболочек. М.: Наука, 1979. 389 с.
2. Абрамов А.А., Конюхова Н.Б., Парийский Б.С., Курочкин С.В., Приходько В.Ю. Численные исследования осесимметричных свободных колебаний в вакууме и в сжимаемой среде вытянутой цилиндрической оболочки с полусферическими куполами. *Журн. вычисл. матем. и матем. физики*. 1993;33(10):1550-1580.
3. Федорюк М.В. Дифракция плоской волны на вытянутом теле вращения. *Докл. АН СССР*. 1983;272(3):587-590.
4. Приходько В.Ю. Дифракция звука на вытянутых тонких упругих оболочках вращения. *Акустический журнал*. 1987;33(1):83-87.
5. Конюхова Н.Б., Парийский Б.С., Приходько В.Ю. О резонансном излучении вытянутой сфероидальной оболочки. *Акустический журнал*. 1997;43(4):508-513.
6. Приходько В.Ю. Распространение и дифракция волн на упругих оболочках в неоднородных волноводах, *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2014;6:146330-1-146330-6.
7. Ильменков С.Л. Метод функций Грина в задаче дифракции звука на телах неаналитической формы. *Морские интеллектуальные технологии*. 2014;1-2(23):32-36.
8. Андронов И.В. Дифракция гауссова пучка на сильно вытянутом сфероиде. *Акустический журнал*. 2019;65(4):435-439.
<https://doi.org/10.1134/S0320791919040014>
9. Ларин Н.В. Дифракция цилиндрической звуковой волны на непрерывно-неоднородной термоупругой сферической оболочке. *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2018;24(4):644-659.
https://doi.org/10.33113/MKMK.RAS.2018.24.04.644_659.09
10. Корольков А.И., Шанин А.В., Белоус А.А. Дифракция на вытянутом теле вращения с импедансными границами. Метод граничного интегрального параболического уравнения. *Акустический журнал*. 2019;65(4):440-447.
<https://doi.org/10.1134/S0320791919040063>
11. Yunzhe T., Wei W., Fan J., Wang B. Acoustic Scattering from a Cylindrical Shell with Double Internal Rigid Plates. *Acoustical Physics*. 2019;65(1):7-13.
<https://doi.org/10.1134/S1063771019010123>

References:

1. Gol'denveizer A.L., Lidskii V.B., Tovstik P.E. *Svobodnye kolebaniya tonkikh uprugikh obolochek* (Free oscillations of thin elastic shells). Moscow: Nauka; 1979. 389 p. (in Russ.).
2. Abramov A.A., Konyukhova N.B., Kurochkin S.V., Pariiskii B.S., Prihod'ko V. Yu. Numerical investigation of axisymmetric free oscillations in a vacuum and excitation in a compressible medium of a prolate cylindrical shell with hemispherical ends. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki = Comput. Math. Math. Phys.* 1993;33(10):1365-1390.
3. Fedoryuk M.V. Diffraction of a Plane Wave by an Elongated Body of Revolution. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1983;272(3):587-590 (in Russ.).
4. Prihod'ko V.Yu. Sound diffraction on prolate thin-walled elastic shells of revolution. *Akusticheskij Zhurnal* 1987;33(1):83-87 (in Russ.).
5. Konyukhova N.B., Pariiskii B.S., Prihod'ko V.Yu. Resonance Radiation of a Prolate Spheroidal Shell under an Axisymmetric Concentrated Excitation. *Acoustical Physics*. 1997;43(4):435-439.
6. Prihod'ko V.Yu. Propagation and waves diffraction by elastic thin-walled shells in inhomogeneous waveguides. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta = Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov State University*. 2014;6:146330-1-146330-6 (in Russ.).
7. Il'menkov S.L. Method of Green functions in the problem of sound diffraction on non-analytical bodies. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine intelligent technologies*. 2014;1-2(23):32-36 (in Russ.).
8. Andronov I.V. Diffraction of a Gaussian beam by a strongly elongated spheroid. *Acoustical Physics*. 2019;65(4):335-339.
<https://doi.org/10.1134/S1063771019040018>
9. Larin N.V. Diffraction of the cylindrical sound wave on a continuous inhomogeneous thermoelastic spherical shell. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii = J. of Composite Mechanics and Design*. 2018;24(4):644-659 (in Russ.).
https://doi.org/10.33113/MKMK.RAS.2018.24.04.644_659.09
10. Korolkov A.I., Shanin A.V., Belous A.A. Diffraction by an elongated body of revolution with impedance boundaries. The boundary integral parabolic equation method. *Acoustical Physics*. 2019;65(4):340-347.
<https://doi.org/10.1134/S1063771019040067>
11. Yunzhe T., Wei W., Fan J., Wang B. Acoustic Scattering from a Cylindrical Shell with Double Internal Rigid Plates. *Acoustical Physics*. 2019;65(1):7-13.
<https://doi.org/10.1134/S1063771019010123>

Об авторах:

Приходько Вячеслав Юстинович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики-2 Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

До Ву Минь Тханг, магистр кафедры высшей математики Института Кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Vyacheslav Yu. Prikhodko, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Higher Mathematics-2, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Thang Vu Minh Do, Master of the Department of Higher Mathematics, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Поступила: 24.02.2020; получена после доработки: 16.06.2020; принята к опубликованию: 07.09.2020.

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-167-183>



УДК 004.89

Технология оценки рисков на этапах жизненного цикла продукции с использованием нечеткой логики

А.Н. Чесалин[@],
С.Я. Гродзенский,
Фам Ван Ты,
М.Ю. Нилов,
А.Н. Агафонов

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

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

Исследуется проблема оценки рисков на этапах жизненного цикла продукции с использованием как качественных, так и количественных подходов. Предлагается обобщенный алгоритм выбора нечеткой модели оценки рисков при различных исходных данных и требованиях к системе для эффективного применения статистической информации и экспертных оценок. «Риск-ориентированный подход» позволяет сократить затраты на исправление возможных ошибок в будущем и уменьшить неопределенность при выполнении последующих действий. Проанализированы положения современных стандартов по анализу рисков и дана классификация методов анализа риска в соответствии с положениями национального стандарта ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска». Предложен подход на основе нечеткой логики и гибридной нечеткой нейросетевой модели, который позволяет представить используемые критерии в удобной форме и осуществить логический вывод с помощью простых и наглядных продукционных правил. При этом эффективность и точность разработанной системы оценки рисков, основанной на нечеткой логике, в основном определяется качеством экспертной информации и состоятельностью используемых методов ее получения. Для повышения точности результатов предлагается применение коллективных экспертных оценок с последующим анализом согласованности полученных экспертных оценок с помощью определения коэффициентов вариации, ранговой корреляции, конкордации и пр. Представлен обобщенный алгоритм экспертного оценивания, которого рекомендуется придерживаться при разработке экспертных систем по анализу рисков. Предложен алгоритм построения нечеткой системы

анализа рисков на основе эффективного способа получения экспертных оценок и анализе статистической информации. При наличии априорной информации о ранее происшедших событиях, которую можно применить для анализа и прогнозирования рисков, предлагается уточнять нечеткий вывод с использованием широко известных методов математической статистики, алгоритмов оптимизации, к примеру, градиентного спуска, симплекс-метода или генетических алгоритмов.

Ключевые слова: оценка рисков, нечеткая логика, гибридный нейро-нечеткий вывод.

Для цитирования: Чесалин А.Н., Гродзенский С.Я., Фам Ван Ты, Нилов М.Ю., Агафонов А.Н. Технология оценки рисков на этапах жизненного цикла продукции с использованием нечеткой логики. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):167-183. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-167-183>

Technology for risk assessment at product lifecycle stages using fuzzy logic

Aleksandr N. Chesalin[@],
Sergey Ya. Grodzensky,
Pham Van Tu,
Mikhail Yu. Nilov,
Aleksey N. Agafonov

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

The problem of risk assessment at the stages of the product life cycle using both qualitative and quantitative approaches is investigated, and a generalized algorithm for selecting a fuzzy risk assessment model with different input data and system requirements is proposed for the effective use of statistical information and expert assessments. The "risk-based approach" allows to reduce the cost of correcting possible errors in the future and reduce the uncertainty when performing subsequent actions. It is noted that the results of SWOT analysis, as a rule, are of a qualitative descriptive nature, and do not contain specific recommendations. The provisions of modern standards on risk analysis are analyzed and the classification of risk analysis methods is given in accordance with the provisions of the national standard GOST R 58771-2019 "Risk management. Technologies for risk assessment", in which the key is the concept of uncertainty, estimated using different scales of gradation of risk damage and probability of its occurrence. An approach based on fuzzy logic and a hybrid fuzzy neural network model is proposed, which allows to present the used criteria in a convenient form and implement a logical conclusion using simple and visual production rules. At the same time, the effectiveness and accuracy of the developed risk assessment system based on fuzzy logic is mainly determined by the quality of expert information and the consistency of the methods used to obtain it. To improve the accuracy of the results, it is proposed to use collective expert estimates with subsequent analysis of the consistency of the obtained expert estimates by determining the coefficients of variation, rank correlation, concordance, and so on. A generalized algorithm of expert assessment is presented, which is recommended to follow when developing expert systems for risk analysis. Various models of fuzzy inference (Mamdani, Takagi-Sugeno, hybrid neuro-fuzzy inference) are considered. An algorithm for constructing a fuzzy risk analysis system based on an effective method for obtaining expert assessments and analyzing statistical information is proposed. It is suggested that if there is a priori information about previously occurred events that can be used for risk analysis and

forecasting, the fuzzy conclusion should be refined using widely known methods of mathematical statistics, optimization algorithms, for example, gradient descent, simplex method or genetic algorithms. An example of developing a risk assessment system when an enterprise enters into contracts with both the customer and co-executors is given.

Keywords: risk assessment, fuzzy logic, hybrid neuro-fuzzy inference.

For citation: Chesalin A.N., Grodzensky S.Ya., Pham Van Tu, Nilov M.Yu., Agafonov A.N. Technology for risk assessment at product lifecycle stages using fuzzy logic. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):167-183 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-167-183>

Введение

Проблема оценки и управления рисками на этапах жизненного цикла продукции приобретает в настоящее время все более важное значение. Так называемый «Риск-ориентированный подход» позволяет сократить затраты на исправление возможных ошибок в будущем и уменьшить неопределенность при выполнении последующих действий. Одним из способов решения рассматриваемой проблемы может быть SWOT-анализ – метод стратегического планирования, заключающийся в выявлении факторов внутренней и внешней среды организации и разделении их на четыре категории: Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности), Threats (угрозы). Как показывает опыт многих предприятий, результаты SWOT-анализа, как правило, носят качественный описательный характер, не содержат конкретных рекомендаций.

К настоящему времени разработано множество методик по анализу риска. Международной Электротехнической Комиссией (МЭК) выпущен стандарт IEC 31010:2019 «Risk management – Risk assessment techniques» и с учетом его положений разработан национальный стандарт ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» (дата введения в действие 1 марта 2020 г.), в котором представлено около сорока разнообразных методов анализа риска. При этом предлагаются как простые (например, диаграмма Парето), так и довольно трудоемкие методы, требующие глубокой теоретической подготовки и большого практического опыта, например, теория игр, метод Монте-Карло, байесовские сети и анализ марковских процессов. Все методы можно условно разделить на группы (технологии) в зависимости от применимости в различных задачах управления рисками (рис. 1).

Ключевым в стандарте ГОСТ Р 58771-2019 является понятие неопределенности, которое предлагается оценивать с использованием различных шкал градаций ущерба от риска и вероятности его возникновения.

Одним из наиболее простых и, вероятно по этой причине популярным на практике методом, представленным в стандарте, является матрица последствий/вероятности (рис. 2) (матрица рисков или «тепловая карта»), позволяющая проводить качественную экспертную оценку риска на основе пары «последствия – вероятность», которая обычно ассоциируется с рассматриваемым событием.

По нашему мнению, для анализа рисков необходим некий инструмент, позволяющий как бы синтезировать количественные и качественные данные разной достоверности и информативности. Для этого в данной работе предлагается использовать аппарат нечеткой логики, предложенный Л. Заде в работах [1, 2], который позволяет представить ис-

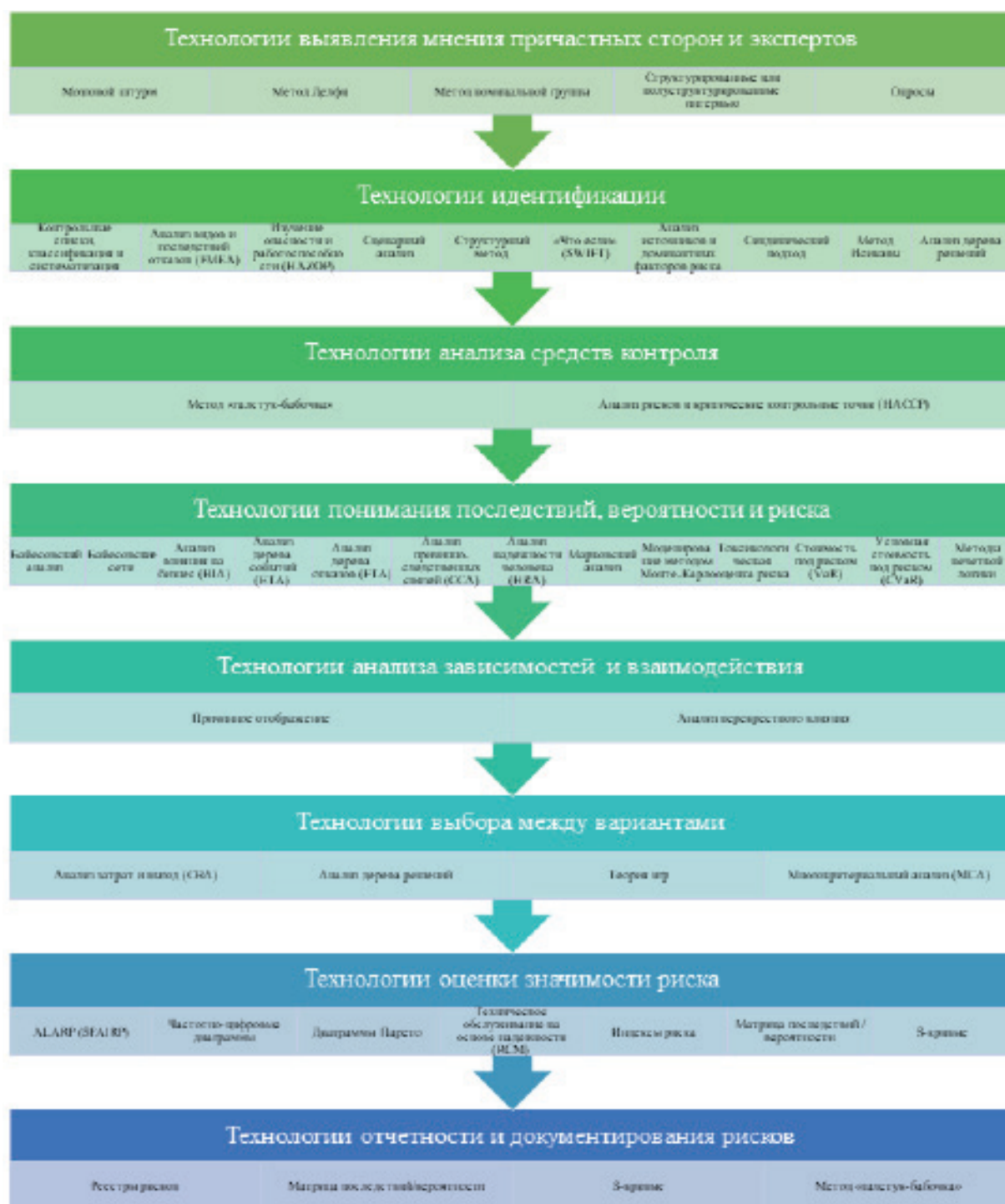


Рис. 1. Методы анализа риска в соответствии с ГОСТ Р 58771-2019.

пользуемые критерии в удобной форме и осуществить логический вывод (оценку рисков) с помощью простых и наглядных продукционных правил.

Анализ рисков на основе нечеткой логики

Нечёткий подход давно зарекомендовал себя как простой и надежный метод для решения многих проблем управления в технических системах (нечёткие регуляторы исполь-

		Уровень последствий				
		Незначительный	Умеренный	Значительный	Высокий	Критический
Уровень вероятности	Крайне маловероятно	Низкий	Низкий	Ниже среднего	Средний	Средний
	Маловероятно	Низкий	Ниже среднего	Ниже среднего	Средний	Выше среднего
	Средне	Низкий	Ниже среднего	Средний	Выше среднего	Выше среднего
	Вероятно	Низкий	Ниже среднего	Средний	Выше среднего	Высокий
	Очень вероятно	Ниже среднего	Средний	Выше среднего	Высокий	Высокий

Рис. 2. Тепловая карта рисков.

зуются в бытовой технике, автомобилях, робототехнике и пр.). В статье [3] предложено использование аппарата нечеткой логики для оценки надежности автоматизированных систем с учетом человеческого фактора. В работе [4] описано использование нечеткой нейросети ANFIS для оценки рисков информационной безопасности организации.

Вместе с тем, несмотря на всю простоту и удобство применения нечеткой логики, эффективность и точность разработанной системы оценки рисков в основном определяется качеством экспертной информации и состоятельностью используемых методов ее получения. В связи с этим необходимо применение различного инструментария для получения экспертных оценок, к примеру, в работе [5] рассмотрен подход, сочетающий в себе аппарат нечеткой логики и метод анализа иерархий для принятия управленческих решений, в работах [6–9] показана возможность применения нечеткой логики в управлении качеством в сочетании с другими инструментами. При построении системы анализа рисков рекомендуется применение коллективных экспертных оценок, позволяющих получать более точные результаты, особенно при использовании специальных методов организации взаимодействия экспертов (мозговой штурм, метод Дельфи и т. п.). При этом необходимо проводить анализ согласованности полученных экспертных оценок с помощью определения коэффициентов вариации, ранговой корреляции, конкордации и пр. На рис. 3 показана блок-схема обобщенного алгоритма экспертного оценивания.

Ниже предлагается алгоритм построения нечеткой системы анализа рисков на основе эффективного способа получения экспертных оценок и анализе статистической информации. Для разработки нечеткой системы анализа рисков на основе экспертных оценок предпочтительным является использование нечеткой логики с методом логического вывода, предложенным Мамдани [10]. Блок-схема алгоритма показана на рис. 4.

Нечеткий логический вывод методом Мамдани

База знаний Мамдани представляет собой набор продукционных правил («если – то»):

$$w^j \left[x_1 = \tilde{A}_1^j \wedge x_2 = \tilde{A}_2^j, \dots \wedge x_n = \tilde{A}_n^j \right] \Rightarrow y = \tilde{B}^j, j = 1:m,$$

где w^j – весомость правила, $\tilde{A}_i^j = \int \mu_{\tilde{A}_i^j}(x_i) / x$ – нечеткое множество терма входной лингвистической переменной x_i в j -м правиле, $\tilde{B}^j = \int \mu_{\tilde{B}^j}(y) / x$ – нечеткое множество терма

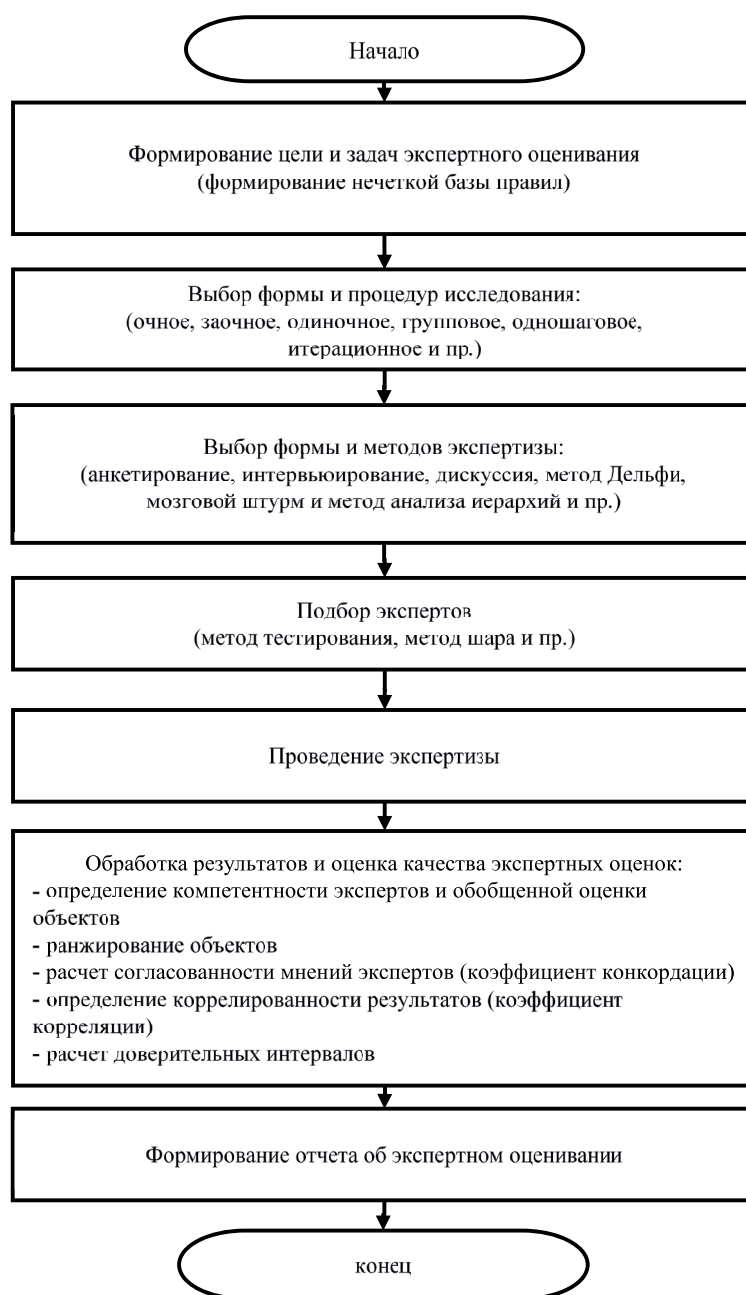


Рис. 3. Блок-схема алгоритма экспертного оценивания.

выходной лингвистической переменной y в j -м правиле, $\wedge$ – оператор «и» (в базе правил также может использоваться оператор «или» ($\vee$)).

Логический вывод Мамдани представляет собой следующую процедуру (рис. 5).

Пусть задан вектор значений входных переменных:

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

тогда:

– фаззификация входных переменных представляет собой операцию взятия значения каждой функции принадлежности:

$$A_i^j = \mu_{\tilde{A}_i^j}(x_i^*);$$



Рис. 4. Блок-схема алгоритма нечеткого вывода.

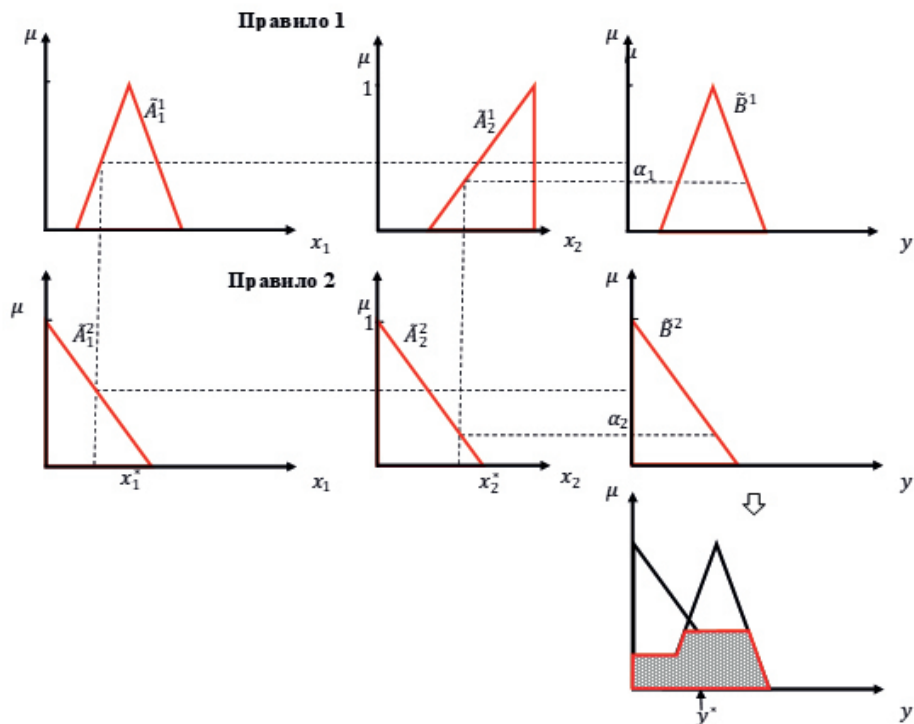


Рис. 5. Нечеткий логический вывод Мамдани.

– агрегирование подусловий $\alpha^j = \mu_{\tilde{A}_1^j}(x_1^*)$:

$$\alpha^j = w^j \min \left[\mu_{\tilde{A}_1^j}(x_1^*), \mu_{\tilde{A}_2^j}(x_2^*), \dots, \mu_{\tilde{A}_n^j}(x_n^*) \right];$$

– активизация подзаклучений представляет собой функцию импликации $\tilde{B}^{j*} = \text{imp}(\tilde{B}^j, \alpha^j)$, которая может быть представлена в следующем виде:

$$\tilde{B}^{j*} = \int \min[\alpha^j, \mu_{\tilde{B}^j}(y)] / y;$$

– аккумуляирование заключений $\tilde{B} = \text{aggr}(\tilde{B}^{1*}, \tilde{B}^{2*}, \dots, \tilde{B}^{m*})$ может быть представлено в следующем виде:

$$\tilde{B} = \max[\tilde{B}^{1*}, \tilde{B}^{2*}, \dots, \tilde{B}^{m*}];$$

– деффазификация выходной переменной методом центра тяжести:

$$y^* = \frac{\int \mu_{\tilde{B}}(y) y dy}{\int \mu_{\tilde{B}}(y) dy}.$$

Как правило, при анализе рисков на предприятиях ведется сбор информации о ранее происшедших ситуациях, которую можно применить для анализа и прогнозирования рисков. В этом случае предлагается также использовать нечеткий подход, но с применением не только экспертных оценок, но и дополнительной информации для их уточнения. Данный подход принято называть гибридным. В этом случае нечеткий вывод уточняют с использованием широко известных методов математической статистики, таких, как метод наименьших квадратов, или различных алгоритмов оптимизации, к примеру, градиентного спуска, симплекс-метода или генетических алгоритмов.

Нечеткий логический вывод методом Такаги-Сугено

В гибридной системе, как правило, используется логический вывод Такаги-Сугено (либо Цукамото) [3, 10], который сложнее при формировании логических правил (необходимо подобрать коэффициенты функции целевой переменной), чем логический вывод Мамдани, но позволяет проектировать точные системы на основе статистической информации. В случае использования логического вывода Такаги-Сугено при импликации выходным сигналом лингвистического решения является не лингвистическое решение в виде нечетких функций, а конкретное число или линейная функция, что является удобным при уточнении базы правил.

База знаний Такаги-Сугено представляет собой набор продукционных правил («если – то») следующего вида:

$$x_1 = \tilde{A}_1^j \wedge x_2 = \tilde{A}_2^j, \dots, \wedge x_n = \tilde{A}_n^j \Rightarrow y = f^j(x_1, x_2 \dots x_n), j = 1:m,$$

где $f^j(x_1, x_2 \dots x_n) = \theta_0^j + \sum_{i=1:n} \theta_i^j x_i$ – полиномиальная функция целевой переменной от входных данных; $\theta_i^j \in \mathbb{R}$ – некоторые коэффициенты.

Нечеткий логический вывод Такаги-Сугено представляет собой следующую процедуру (рис. 6).

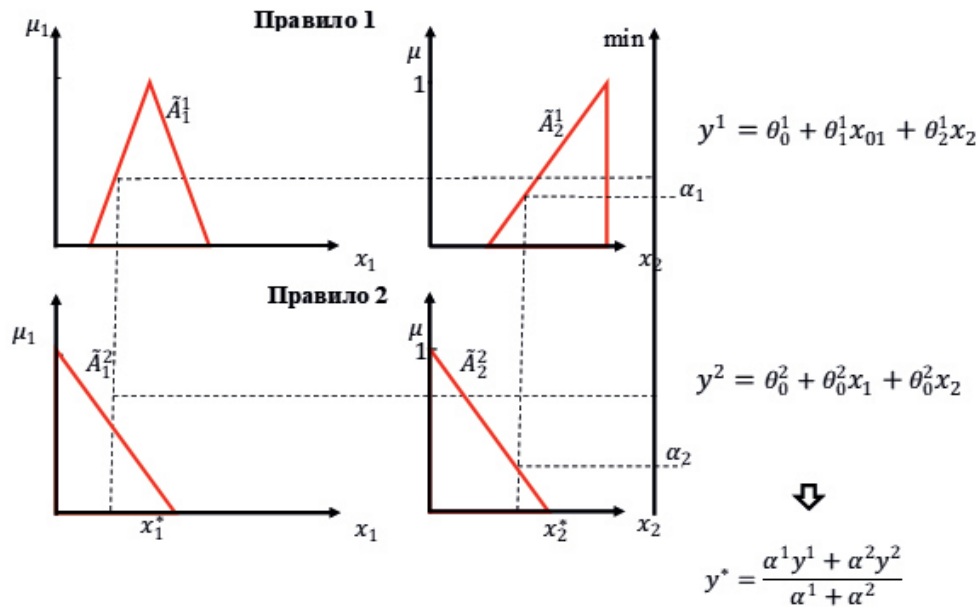


Рис. 6. Нечеткий логический вывод Такаги-Сугено.

Пусть задан вектор значений входных переменных:

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

тогда:

– фаззификация входных переменных представляет собой операцию взятия значения каждой функции принадлежности: $A_i^j = \mu_{\tilde{A}_i^j}(x_i^*)$;

– агрегирование подусловий $\alpha^j = \mu_{A^j}(X^*)$:

$$\alpha^j = \min[\mu_{\tilde{A}_1^j}(x_1^*), \mu_{\tilde{A}_2^j}(x_2^*), \dots, \mu_{\tilde{A}_n^j}(x_n^*)];$$

– активизация подзаключений представляет собой расчет функции $f^j(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которая может быть представлена в следующем виде:

$$y^j = \theta_0^j + \sum_{i=1:n} \theta_i^j x_i;$$

– расчет целевого значения y производится по следующей формуле:

$$y^* = \frac{\sum_{j=1:m} \alpha^j y^j}{\sum_{j=1:m} \alpha^j}.$$

Таким образом, в выводе Такаги-Сугено не используются затратные операции интегрирования, как в случае вывода Мамдани (операции агрегирования и дефаззификации).

Гибридная нейро-нечеткая система

Если статистической информации достаточно для построения системы, то целесообразно использовать гибридную нейро-нечеткую систему, которую принято называть ANFIS [10] (adaptive neuro-fuzzy inference system – адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода), сочетающая достоинства нечеткой логики и нейросетевых алгоритмов. Преимущества нейро-нечеткой системы перед нейросетевой следующие:

- нейро-нечеткая система дает возможность использовать априорную экспертную информацию, позволяющую значительно ускорить и сократить процесс обучения сети;
- нейро-нечеткая система обладает логической прозрачностью и удобна для разъяснений;
- нейро-нечеткая система позволяет получить более точные результаты (прогнозы), используя меньшее количество данных.

Далее описан алгоритм нечеткого вывода и обучения ANFIS.

Гибридная нейронная сеть, отражающая приведенный механизм вывода, представлена на рис. 7.

Данная сеть может быть описана следующим образом:

x_i – входы сети, $i = 1 : m$, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;

y – выход сети;

R_j – нечеткие правила («если – то»), $j = 1 : m$;

$\tilde{A}_i^j$ – нечеткие множества, представляющие термы входных переменных (функции принадлежности термов должны быть дифференцируемыми функциями);

α_j – степени истинности предпосылок правил R_j ;

$f_j(X)$ – некоторая полиномиальная функция каждого правила R_j .

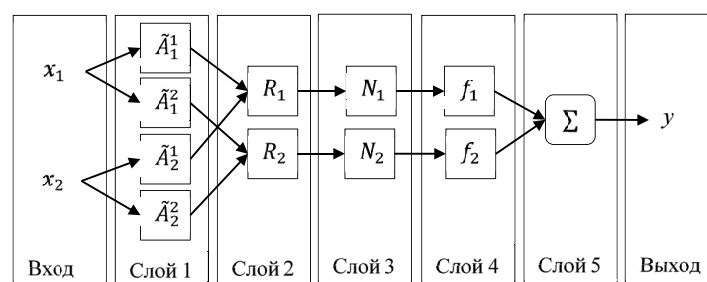


Рис. 7. Схематичное изображение гибридной нейронной сети.

Пусть задан вектор значений входных переменных:

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

1. Слой 1: (фаззификация). Нейроны данного слоя представляют собой нечеткие множества $\tilde{A}_i^j$ термов входных переменных. Выходы данного слоя представляют собой результат операции дефаззификации $\mu_{\tilde{A}_i^j}(x_i^*)$.

2. Слой 2: (агрегирование). Нейроны данного слоя представляют собой степени истинности предпосылок каждого правила базы знаний системы, вычисляемые по формулам:

$$\alpha_j = \min \left[\mu_{\tilde{A}_1^j}(x_1^*), \mu_{\tilde{A}_2^j}(x_2^*), \dots, \mu_{\tilde{A}_n^j}(x_n^*) \right].$$

3. Слой 3: (нормализация). Нейроны данного слоя вычисляют относительную степень выполнения нечетких правил:

$$w_j = \frac{\alpha_j}{\sum_{k=1:m} \alpha_k}.$$

4. Слой 4: (активизация). Нейроны данного слоя выполняют операции:

$$y_j = \beta_1 f^j(X) = \theta_0^j + \sum_{i=1:n} \theta_i^j x_i.$$

5. Слой 5: (суммирование). Единственный нейрон данного слоя вычисляет выходной результат сети:

$$y^* = \sum_{j=1:m} y_j.$$

Обучение нейро-нечеткой сети реализуется методом обратного распространения ошибки с корректировкой функций принадлежности $\tilde{A}_i^j$ и коэффициентов θ_i^j . При этом целесообразно использовать математические пакеты, где данная сеть реализована, или же применить языки программирования, имеющие соответствующие библиотеки для работы с нечеткими множествами.

Нейронная сеть – многослойный персептрон

Если при решении проблемы используются большие данные (Big Data) и не выдвигаются жестких требований к «прозрачности» экспертного заключения, следует использовать современные архитектуры нейронных сетей глубокого обучения [11]. В этом случае простым, но эффективным вариантом может быть использование нейронной сети с архитектурой – многослойный персептрон, которая используется для задач классификации табличных данных.

Обобщенный алгоритм выбора подходящей модели нечеткого вывода при различных исходных данных и требованиях к системе для эффективного применения статистической информации и экспертных оценок показан на рис. 8.

Для реализации нечеткой системы анализа рисков возможно применение различных программных средств: Matlab (Simulink) [12], Scilab, SimInTech [13, 14], python (scikit-fuzzy) и др.

Нечеткая система для оценки рисков при заключении договоров

Для оценки рисков предлагается использовать набор критериев соответствия организации-исполнителя предъявляемым требованиям. Данный набор не претендует на полный охват всех факторов, возникающих при заключении контракта с заказчиком. В зависимости от специфики предприятия (отрасли) факторы можно модифицировать, исходя из экспертной оценки необходимости их добавления/изменения. При заключении договора в качестве заказчика или исполнителя предприятие может оценивать риски известными методами, хотя бы проводя SWOT-анализ. При выборе исполнителя (контрагента, поставщика и т.д.) и заключении с ним договора предприятие должно оценить возможности соисполнителя в соответствии с договором и техническим заданием (ТЗ), а также степень проработанности договора (полноту, корректность) и оценить риски его невыполнения, неполного выполнения, нарушения сроков и т.п.

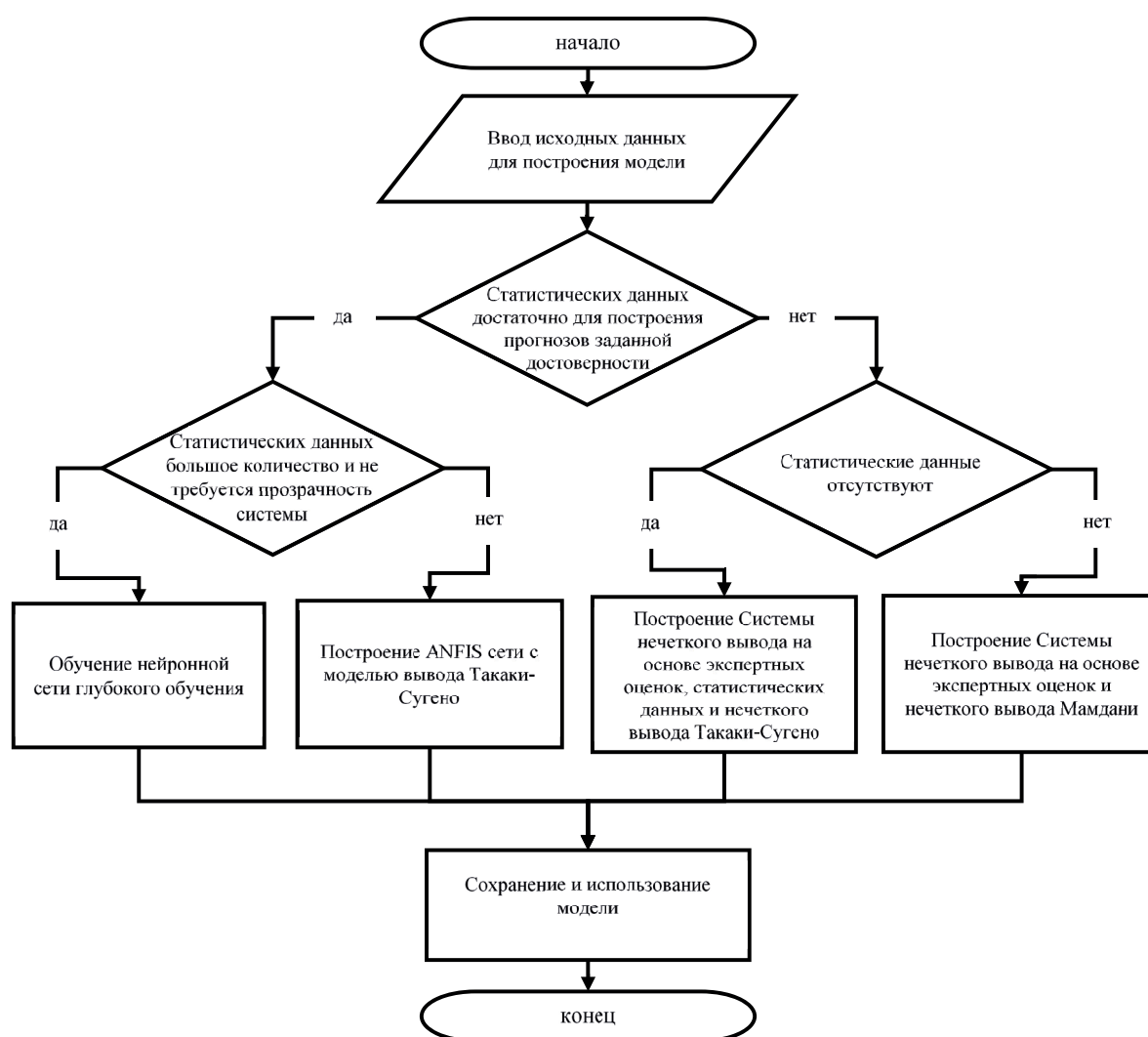


Рис. 8. Обобщенный алгоритм выбора подходящей модели нечеткого вывода.

Предлагается формировать факторы, определяющие риски невыполнения исполнителем (контрагентом) договора, иерархически, как показано в табл. 1, начав с укрупненных факторов (критериев), непосредственно определяющих показатели выходной переменной (оценку надежности), затем формировать критерии, влияющие на значения укрупненных факторов, и в последнюю очередь – метрики, описывающие критерии.

Управление рисками при заключении предприятием договора с заказчиком

При принятии ответственности за выполнение договора предприятие должно оценить свои возможности по выполнению работ и соответственно оценить риски невыполнения (неполного выполнения, не в сроки и т.п.) договора. В табл. 2 приведены факторы, определяющие риски невыполнения предприятием договора.

В табл. 3 представлен фрагмент описания факторов риска невыполнения предприятием договора в виде лингвистических переменных. Терм-множества рекомендуется выбирать по аналогии с тепловой картой оценки рисков и использовать простые треугольные функции принадлежности.

Таблица 1. Факторы рисков невыполнения контрагентом договора

Факторы	Критерии
1. Возможности исполнителя по выполнению работ, в соответствии с договором и ТЗ	1.1. Наличие опыта выполнения аналогичных работ 1.2. Наличие производственных мощностей для выполнения работ 1.3. Наличие высококвалифицированного персонала для выполнения работ
2. Степень проработанности договора	2.1. Договор согласовывается со всеми заинтересованными лицами 2.2. В договоре прописана ответственность за срыв сроков и поставку некачественной продукции 2.3. В договоре прописана возможность контроля выполнения договора в течение всего срока
3. Характеристика договора	3.1. Важность договора/работ 3.2. Сложность работ по договору 3.3. Сроки выполнения работ
4. Последствия при невыполнении (не полном выполнении) исполнителем договора	4.1. Срыв сроков 4.2. Поставка некачественной продукции (услуг) 4.3. Сложность передачи работы другому исполнителю
5. Конкурентоспособность исполнителя	5.1. Наличие сертифицированной системы менеджмента качества 5.2. Наличие долговременных связей с исполнителем 5.3. Цена, выставленная исполнителем (накладные расходы исполнителя) 5.4. Территориальная близость исполнителя 5.5. Возможность установления долгосрочных связей

Таблица 2. Факторы рисков невыполнения предприятием договора

Факторы	Критерии
1. Возможности предприятия по выполнению работ, в соответствии с договором и ТЗ	1.1. Наличие опыта выполнения аналогичных работ 1.2. Наличие производственных мощностей для выполнения работ 1.3. Наличие высококвалифицированного персонала для выполнения работ
2. Степень проработанности договора	2.1. Договор согласовывается со всеми заинтересованными лицами 2.2. В договоре прописана возможность корректировки сроков выполнения договора
3. Характеристика договора	3.1. Сложность работ по договору 3.2. Сроки выполнения работ по договору
4. Последствия при невыполнении (не полном выполнении) исполнителем договора	4.1. Срыв сроков 4.2. Поставка некачественной продукции (услуг) 4.3. Сложность передачи работы другому исполнителю
5. Конкурентоспособность исполнителя	5.1. Наличие долговременных связей с заказчиком 5.2. Территориальная близость исполнителя 5.3. Возможность установления долгосрочных связей

В табл. 4 представлен фрагмент разработанной базы правил для оценки рисков при заключении договоров.

Разработка базы правил представляет собой наиболее сложную и ответственную задачу, для ее составления рекомендуется привлекать группу экспертов и применять алгоритм, представленный на рис. 3. Применение нечеткой логики позволяет реализовать прозрачную и эффективную оценку рисков.

Таблица 3. Факторы рисков и соответствующие им лингвистические переменные

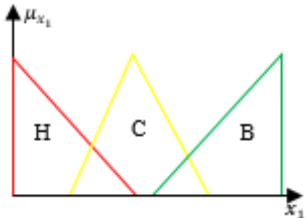
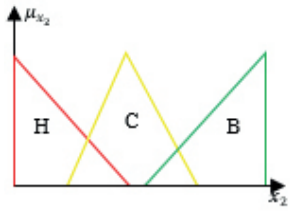
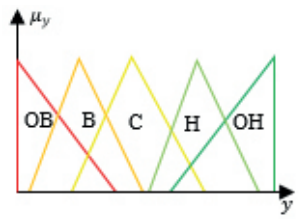
Обозначение фактора	Название лингвистической переменной	Терм множества	Функции принадлежности
x_1	Возможности предприятия	«В» – предприятие имеет высокий уровень оснащения и ресурсов «С» – предприятие имеет средний уровень оснащения и ресурсов «Н» – предприятие имеет низкий уровень оснащения и ресурсов	
x_2	Степень проработанности договора	«В» – высокий уровень проработки договора «С» – средний уровень проработки договора «Н» – низкий уровень проработки договора	
...	...	...	...
y	Риск невыполнения предприятием договора	«ОВ» – очень высокий уровень риска «В» – высокий уровень риска «С» – средний уровень риска «Н» – низкий уровень риска «ОН» – очень низкий уровень риска	

Таблица 4. База нечетких продукционных правил

№ правила	Посылка («если»)	Следствие («то»)
1	$x_1 = Н$ и $x_2 = Н$ и $x_3 = Н$ и $x_4 = Н$ и $x_5 = Н$	$y = ОВ$
2	$x_1 = Н$ и $x_2 = С$ и $x_3 = С$ и $x_4 = Н$ и $x_5 = С$	$y = В$
3	$x_1 = С$ и $x_2 = С$ и $x_3 = С$ и $x_4 = С$ и $x_5 = С$	$y = С$
4	$x_1 = Н$ и $x_2 = С$ и $x_3 = С$ и $x_4 = Н$ и $x_5 = С$	$y = Н$
5	$x_1 = В$ и $x_2 = В$ и $x_3 = В$ и $x_4 = В$ и $x_5 = В$	$y = ОН$
...	...	...

Заключение

Проведено исследование технологий анализа рисков:

- проанализированы положения современных стандартов по анализу рисков, рассмотрены некоторые эффективные технологии анализа рисков;
- представлен обобщённый алгоритм экспертного оценивания, которого рекомендуется придерживаться при разработке экспертных систем по анализу рисков;
- рассмотрены различные варианты нечеткого вывода, отмечена их эффективность в различных задачах;
- предложен обобщенный алгоритм выбора метода нечеткой модели при различных

исходных данных и требованиях к системе для эффективного применения статистической информации и экспертных оценок;

– приведен пример разработки системы оценки рисков при заключении предприятием договоров, как с заказчиком, так и с соисполнителями.

Авторы надеются, что рекомендации настоящей работы окажутся полезными при разработке нечетких систем в других областях науки и техники.

Литература:

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: пер. с англ., под ред. Н.Н. Моисеева, С.А. Орловского. М.: Мир; 1976. 166 с.
2. Zadeh L. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965;8(3):338-353.
[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
3. Гродзенский С.Я., Чесалин А.Н. Использование аппарата нечеткой логики для оценки надежности автоматизированных систем. *Нелинейный мир*. 2017;15(4):17-23.
4. Glushenko S.A. An adaptive neuro-fuzzy inference system for assessment of risks to an organization's information security. *Business Informatics*. 2017;1(39):68-77.
<http://doi.org/10.17323/1998-0663.2017.1.68.77>
5. Чесалин А.Н., Гродзенский С.Я., Нилов М.Ю. Метод самооценки качества принятия управленческих решений. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения «INTERMATIC-2018» Материалы Международной научно-технической конференции*. 2018;5:1149-1152.
6. Hajer M., Ketata R., Taieb B., Samir A. Comparative study of Fuzzy Hierarchical Hybrid approaches for control of Quality Management System. In: *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM-2015)*. 2015. P. 1034-1040.
<https://doi.org/10.1109/IESM.2015.7380282>
7. Ying B., Hanyou W., Longkang W., Kangkang T. Study and analysis on fuzzy quality control for the high-end manufacturing process based on Taguchi quality loss function. *J. Comput. Methods Sci. Eng.* 2019;19(1):121-136.
<https://doi.org/10.3233/JCM-180857>
8. Гродзенский С.Я., Гродзенский Я.С., Чесалин А.Н. Средства и методы управления качеством: учебное пособие. М.: Проспект; 2019. 128 с. ISBN: 978-5-392-28446-7
9. Гродзенский С.Я. Управление качеством: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Проспект, 2018. 320 с. ISBN: 978-5-392-28172-5
10. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком; 2007. 288 с.
11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning. Cambridge: The MIT Press; 2016. 800 p. ISBN: 0262035618.
12. Лохин В.М., Романов М.П., Казачек Н.А. Исследование периодических колебаний в робототехнических системах управления с нечеткими регуляторами. *Вестник МГТУ МИРЭА*. 2015;3-1(8):138-155.
13. Мызникова В.А., Устищенко В.В., Чубарь А.В. Построение нечетких регуляторов для систем управления автономных объектов в среде SimInTech. *Космические аппараты и технологии*. 2019;3(1):22-27.
<https://doi.org/10.26732/2618-7957-2019-1-22-27>
14. Карташов Б.А., Козлов О.С., Шабаев Е.А., Щекатуров А.М. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. М.: ДМК Пресс; 2017. 424 с. ISBN: 978-5-97060-482-3

References:

1. Zade L. *Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenii: per. s angl., pod red. N.N. Moiseeva, S.A. Orlovskogo* (The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning). Moscow: Mir; 1976. 166 p. (in Russ.).
2. Zadeh L. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965;8(3):338-353.
[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
3. Grodzenskiy S.Ya., Chesalin A.N. About the usage of fuzzy logic to reliability assessment of automated systems. *Nelineinyi mir = Nonlinear world*. 2017;5(4):17-23 (in Russ.)

4. Glushenko S.A. An adaptive neuro-fuzzy inference system for assessment of risks to an organization's information security. *Business Informatics*. 2017;1(39):68-77.
<http://doi.org/10.17323/1998-0663.2017.1.68.77>
5. Chesalin A.N., Grodzenskii S.Ya, Nilov M.Yu. Method of self-assessment of the quality of management decisions. In: *Proceedings of the International scientific and technical conference «Fundamental problems of radioengineering and device construction «INTERMATIC-2018»»* 2018;(5):1149-1152 (in Russ.).
6. Hajer M., Ketata R., Taieb B., Samir.A. Comparative study of Fuzzy Hierarchical Hybrid approaches for control of Quality Management System. In: *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM-2015)*. 2015. P. 1034-1040.
<https://doi.org/10.1109/IESM.2015.7380282>
7. Ying B., Hanyou W, Longkang W., Kangkang T. Study and analysis on fuzzy quality control for the high-end manufacturing process based on Taguchi quality loss function. *J. Comput. Methods Sci. Eng.* 2019;19(1):121-136.
<https://doi.org/10.3233/JCM-180857>
8. Grodzenskii S.Ya., Grodzenskii Ya.S., Chesalin A.N. *Sredstva i metody upravleniya kachestvom: uchebnoe posobie* (Means and methods of quality management: textbook). Moscow: Prospekt; 2019. 128 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-392-28446-7
9. Grodzenskii S.Ya. *Upravlenie kachestvom: uchebnyk. 2-e izd., pererab. i dop.* (Quality Management: textbook). Moscow: Prospekt; 2009. 320 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-392-28172-5
10. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* (Design of fuzzy systems using MATLAB). Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2007. 288 p. (in Russ.).
11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning. Cambridge: The MIT Press; 2016. 800 p. ISBN: 0262035618.
12. Lokhin V.M., Romanov M.P., Kazachek N.A. The investigation of the periodic oscillations in the control systems with fuzzy controllers. *Vestnik MGTU MIREA = Herald of MSTU MIREA*. 2015;3-1(8): 138-155 (in Russ.).
13. Myznikova V.A., Ustimenko V.V., Chubar A.V. Fuzzy controllers construction in the SimInTech environment. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii = Spacecrafts & Technologies*. 2019;3(1):22-27 (in Russ.).
<https://doi.org/10.26732/2618-7957-2019-1-22-27>
14. Kartashov B.A., Kozlov O.S., Shabaev E.A., Shchekaturov A.M. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech* (SimInTech technical systems dynamic modeling environment). Moscow: DMK Press; 2017. 424 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-97060-482-3

Об авторах:

Чесалин Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной и информационной безопасности Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: D-8080-2019, <https://orcid.org/0000-0002-1154-6151>

Гродзенский Сергей Яковлевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий в государственном управлении Института инновационных технологий и государственного управления ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). ResearcherID: AAA-8359-2019, <https://orcid.org/0000-0003-1965-5624>

Фам Ван Ты, аспирант кафедры метрологии и стандартизации Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78)

Нилов Михаил Юрьевич, аспирант кафедры метрологии и стандартизации Физико-технологического института ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0002-3621-4671>

Агафонов Алексей Николаевич, ассистент кафедры компьютерной и информационной безопасности Института кибернетики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). <https://orcid.org/0000-0001-8312-3265>

About the authors:

Aleksandr N. Chesalin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer and Information Security, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). ResearcherID: D-8080-2019, <https://orcid.org/0000-0002-1154-6151>

Sergey Ya. Grodzenskiy, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Information Technologies in Public Administration of the Institute of Innovative Technologies and Public Administration, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0003-1965-5624>, ResearcherID: AAA-8359-2019

Pham Van Tu, Postgraduate Student, the Department of Metrology and Standardization, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

Mikhail Yu. Nilov, Postgraduate Student, the Department of Metrology and Standardization, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0002-3621-4671>

Aleksey N. Agafonov, Assistant of the Department of Computer and Information Security, Institute of Cybernetics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). <https://orcid.org/0000-0001-8312-3265>

Поступила: 29.04.2020; получена после доработки: 12.06.2020; принята к опубликованию: 10.10.2020.

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

Дата опубликования 30 ноября 2020 г.

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

<http://rtj-mirea.ru>

