ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)
DOI: 10.24151/1561-5405

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 29
№ 3
май – июнь

Vol. 29
No. 3
May – June

2024

ПОДПИСКА 2024

Научно-технический журнал «Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОНИКА»

Периодичность журнала – 6 номеров в год

В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. На его страницах освещаются результаты научно-исследовательских работ, выполненных в вузах и НИИ, на промышленных предприятиях страны, методические аспекты преподавания с учетом современных требований и форм обучения, дается информация о научных конференциях. Формируются специальные выпуски по тематическому признаку.

Подписаться на печатную версию журнала можно:

- **по каталогу** «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ» (подписной индекс 47570): https://www.ural-press.ru/catalog
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» (подписной индекс 38934): https://www.akc.ru
- **через Агентство** «ПРЕССИНФОРМ»: http://presskiosk.ru/catalog
- **через редакцию** – с любого номера и до конца года: http://ivuz-e.ru

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

- Научной электронной библиотеки: https://www.elibrary.ru
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»: https://www.rucont.ru; https://www.akc.ru; https://www.pressa-rf.ru
- ООО «Урал-Пресс Округ»: https://www.delpress.ru
- ООО «ИВИС»: https://www.ivis.ru



Адрес редакции: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, дом 1, МИЭТ, комн. 7231

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

Сайт: http://ivuz-e.ru

ISSN 1561-5405 (print), 2587-9960 (online)
DOI: 10.24151/1561-5405



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 29, № 3, 2024
май – июнь

Научно-технический журнал
Издается с 1996 г.
Выходит 6 раз в год

Учредитель и издатель: ***Национальный исследовательский университет «МИЭТ»***

Главный редактор: ***Чаплыгин Юрий Александрович*** – академик РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-7505-5175

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Беспалов Владимир Александрович – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Боргардт Николай Иванович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Институт физики НАН Беларуси (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Душкин Александр Викторович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-8078-8971
Коноплёв Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., президент РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2441-7455
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Мещеряков Роман Валерьевич – д.т.н., проф., Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1129-8434
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377
Неволин Владимир Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия)

© «Известия вузов. Электроника», 2024
© МИЭТ, 2024

Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Светухин Вячеслав Викторович – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф., НПК «Технологический центр» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Орёл, Россия), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-9074-385X
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

Заведующая редакцией ***И. М. Доронина***
Редактор ***А. В. Тихонова***
Корректор ***И. В. Проскурякова***
Верстка ***А. Ю. Рыжков, С. Ю. Рыжков***

Адрес редакции: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ.
Тел.: 8-499-734-6205, **e-mail:** magazine@miee.ru, **сайт:** http://ivuz-e.ru

Адрес издателя: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ.

Адрес полиграфического предприятия: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ.

Подписано в печать 17.06.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 16,74 усл.печ.л., 14,248 уч.-изд.л. Тираж 120 экз. Заказ № 13. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

Журнал включен ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим специальностям:

1.3.5. Физическая электроника (технические науки, физико-математические науки)
1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки, физико-математические науки)
1.3.11. Физика полупроводников (технические науки, физико-математические науки)
1.3.12. Физика магнитных явлений (технические науки, физико-математические науки)
2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника (технические науки)
2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (технические науки, физико-математические науки)
2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (технические науки)
2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)
2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science, в Российский индекс научного цитирования и в Рейтинг Science Index. Является членом Crossref.

Плата за публикацию статей не взимается.

Подписной индекс в каталоге «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» – 38934.
Подписной индекс в каталоге «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ» – 47570.

http://ivuz-e.ru
DOI: 10.24151/1561-5405
ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

Глухенькая В. Б., Пестов Г. Н., Гулидова А. И., Сауров М. А., Смирнов П. А., Федянина М. Е., Козлов А. О., Савицкий А. И. Кристаллизация тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с помощью тонкопленочного резистивного нагревательного элемента для создания оптоэлектронных и интегрально-оптических элементов и устройств на их основе 267

Технологические процессы и маршруты

Титов А. Ю., Погалов А. И., Тимошенков С. П. Исследование конструкторско-технологических особенностей пространственной сборки и монтажа функционального микромодуля 281

Пак К. И., Сорокина Л. И., Кузьмин А. В., Рязанов Р. М., Кицюк Е. П., Дубков С. В., Громов Д. Г. Формирование композитных слоев TiO_2-ZnO с повышенной фоточувствительностью методом электрофоретического осаждения 290

Смоляков Н. В., Марченков Н. В., Лебедев А. М., Чумаков Р. Г., Гончаренко М. С., Дюжев Н. А. Моделирование источников рентгеновского излучения для станции фотолитографии на технологическом накопительном комплексе «Зеленоград» 300

Элементы интегральной электроники

Рехвиашвили С. Ш., Гаев Д. С. Исследование влияния оптического излучения на интегральную микросхему ТТЛ-типа 310

Схемотехника и проектирование

Аубакиров Р. Р., Гуров К. О., Данилов А. А. Алгоритм проектирования *LC*-контуров с параллельной компенсацией в приемном контуре для систем индуктивного питания 319

Микро- и наносистемная техника

Галкин А. А., Еркин П. В., Захаров В. П., Соломкина Н. А., Тимошенков А. С., Тимошенков С. П. Применение инерциальных МЭМС-модулей в сканирующей LiDAR-системе 331

Интегральные радиоэлектронные устройства

Раннев Н. Ю., Кондратенко С. В., Байков В. Д., Дубинский А. В., Горшкова Н. М., Скок Д. В. Варианты реализации устройств восстановления тактовых сигналов и данных в составе КМОП высокоскоростных приемопередатчиков последовательных каналов. Обзор 346

Информационно-коммуникационные технологии

Городилов А. В., Чирков А. В. Разработка модели гибридной экспертной системы для современного промышленного производства 362

Шевцов В. А., Казачков В. О., Летфуллин И. Р. Исследование эффективности нелинейного сетевого кодирования 368

Ефанов Д. В. Особенности использования кодов Хэмминга при синтезе самопроверяемых цифровых устройств на основе метода инвертирования данных 379

Воеводин В. А. О задаче оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз информационной безопасности. II. Аналитическая математическая модель 393

Конференции

Об итогах XXXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2024» с международным участием 403

ISSN 1561-5405 (print), 2587-9960 (online)
DOI: 10.24151/1561-5405



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 29, No. 3, 2024
May – June

The scientifical and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

Founder and Publisher: ***National Research University of Electronic Technology***

Editor-in-Chief: ***Yury A. Chaplygin*** – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-7505-5175

Editorial Board:

Sergey A. Gavrilov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Vladimir A. Bespalov – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
Nikolay I. Borgardt – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-8015-7603
Alexandr V. Dushkin – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-8078-8971
Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7591-9175
Sergey V. Gaponenko – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of Physics of the NAS of Belarus (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Aleksandr A. Gorbatsevich – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Anatoly A. Horev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-9074-385X
Boris G. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., President of RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2441-7455
Vladimir A. Labunov **–** Acad. NAS of Belarus, Foreign member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJSC Company "Synopsys Armenia" (Yerevan, Armenia), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Roman V. Meshcheryakov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1129-8434

© "Proceedings of Universities. Electronics", 2024
© MIET, 2024

Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4348-0377
Vladimir N. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia)
Aleksey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Konstantin O. Petrosyants – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Orel State University named after I. S. Turgenev (Orel, Russia), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Vyacheslav V. Svetukhin – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., SMC "Technological Centre" (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-0831-9254
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain), ORCID: 0000-0002-1433-260X

Head of editorial staff ***Doronina I. M.***
Chief editors ***Tikhonova A. V., Proskuryakova I. V.***
Make-up ***Ryzhkov S. Yu., Ryzhkov A. Yu.***

Editorial Board's address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET, editorial office of the Journal "Proceedings of Universities. Electronics".
Tel.: +7-499-734-62-05, **e-mail:** magazine@miee.ru, **website:** http://ivuz-e.ru

Publisher's and printery addresses: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET.

Signed to print 17.06.2024. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 16,74. Number of copies 120. Order no. 13. Free price.
The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

The journal is included into the List of reviewed scientific publications, in which the main scientific results of thesis for candidate of science and doctor degrees must be published for the following specialties:

1.3.5. Physical electronics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.8. Condensed matter physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.11. Semiconductor physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
1.3.12. Physics of magnetic phenomena (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
2.2.1. Vacuum and plasma electronics (Engineering Sciences)
2.2.2. Electronic component base of micro- and nanoelectronics, quantum devices (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)
2.2.3. Technology and equipment for electronic materials and devices production (Engineering Sciences)
2.2.8. Material, product, substance and natural environment control and diagnostic techniques and devices (Engineering Sciences)
2.3.1. System analysis, information handling and processing (Engineering Sciences)
2.3.3. Process industries automation and control (Engineering Sciences)
2.3.5. Mathware and software for computer systems, complexes and networks (Engineering Sciences)

The journal is included into the Russian Science Citation Index on the Web of Science basis, into the Russian index of scientific citing and into the Rating Science Index. Is the member of Crossref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue "Russian Press" LLC "Agency "Book-Service" – 38934.
The subscription index in catalogue "Periodicals. Newspapers and magazines" LLC "Ural-Press Okrug" – 47570.

http://ivuz-e.ru
DOI: 10.24151/1561-5405
ISSN 1561-5405 (print)
ISSN 2587-9960 (online)

CONTENTS

Electronics materials

Glukhenkaya V. B., Pestov G. N., Gulidova A. I., Saurov M. A., Smirnov P. A., Fedyanina M. E., Kozlov A. O., Savitskiy A. I. Crystallization of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films using a thin-film resistive heating element to create optoelectronic and integrated optical elements and devices based on them 267

Technological processes and routes

Titov A. Yu., Pogalov A. I., Timoshenkov S. P. Research of engineering and technological specifics of the 3D assembly and mounting of a functional micromodule..... 281

Pak K. I., Sorokina L. I., Kuzmin A. V., Ryazanov R. M., Kitsyuk E. P., Dubkov S. V., Gromov D. G. Formation of composite TiO_2-ZnO layers with increased photosensitivity by electrophoretic deposition 290

Smolyakov N. V., Marchenkov N. V., Lebedev A. M., Chumakov R. G., Goncharenko M. S., Djuzhev N. A. Modeling of X-ray sources for a photolithography station at technological storage ring complex "Zelenograd"..... 300

Integrated electronics elements

Rekhviashvili S. Sh., Gaev D. S. Investigation of the effect of optical radiation on the TTL integrated circuit..... 310

Circuit engineering and design

Aubakirov R. R., Gurov K. O., Danilov A. A. Algorithm for designing *LC* circuits with parallel compensation in the receiving circuit for inductive power systems 319

Micro- and nanosystem technology

Galkin A. A., Erkin P. V., Zaharov V. P., Solomkina N. A., Timoshenkov A. S., Timoshenkov S. P. Application of inertial MEMS modules in a scanning LiDAR system..... 331

Integrated radioelectronic devices

Rannev N. Yu., Kondratenko S. V., Baykov V. D., Dubinsky A. V., Gorshkova N. M., Skok D. V. Implementation options for clock signal and data recovery devices as part of CMOS high-speed serial channel transceivers. Review 346

Information-communication technologies

Gorodilov A. V., Chirkov A. V. Development of the model of hybrid expert system for modern industrial production 362

Shevtsov V. A., Kazachkov V. O., Letfullin I. R. Investigation of the effectiveness of non-linear network coding..... 368

Efanov D. V. Special aspects of Hamming codes use in the self-checking digital devices synthesis based on the data inversion method..... 379

Voevodin V. A. On the task of assessing the stability of the functioning of information infrastructure elements exposed to information security threats. II. Analytical mathematical model 393

Conferences

On summation of 31st Russia-wide interuniversity science and technology conference of students, PhD students and young scientists "Microelectronics and Computer Sciences – 2024" with international participation..... 403

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

Научная статья
УДК 544.344.015.4
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-267-280
EDN: AHFMYE

Кристаллизация тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с помощью тонкопленочного резистивного нагревательного элемента для создания оптоэлектронных и интегрально-оптических элементов и устройств на их основе

***В. Б. Глухенькая*[1], *Г. Н. Пестов*[1,2], *А. И. Гулидова*[1], *М. А. Сауров*[1,2], *П. А. Смирнов*[1,3], *М. Е. Федянина*[1], *А. О. Козлов*[2], *А. И. Савицкий*[1,2]**

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия*
[3]*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия*

u132032@edu.miet.ru

Аннотация. Тонкие пленки материала $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) характеризуются высокой скоростью фазовых превращений (< 50 нс) и оптическим контрастом (~ 30 %) между аморфной и кристаллической структурами. Распространенным способом переключения тонких пленок GST из аморфного состояния в кристаллическое и обратно является лазерное излучение. Однако реализовать обратимое переключение элементов большой площади функциональной области GST можно только в режиме сканирования поверхности импульсным лазерным пучком, что существенно увеличивает время переключения. В работе представлена конструкция для переключения функциональной микроразмерной области GST с помощью тонкопленочного резистивного нагревательного элемента. Установлено, что кристаллизация функциональной области GST размером 100 ×100 мкм и толщиной 30 нм в fcc-структуру происходит при протекании через нагревательный элемент одиночного электрического импульса длительностью 200 мс и амплитудой 2,1 В (~ 310 мА) или при напряжении 1,7 В и токе ~ 220 мА в DC-режиме измерений. В соответствии с выполненным компьютерным моделированием при данном электрическом воздействии область GST разогревается до температуры ~ 218 °C. Полученные результаты демонстрируют возможность применения разработанной и изготовленной структуры для создания элементов энергонезависимых активных оптических и оптоэлектронных устройств, в том числе устройств отображения информации.

© В. Б. Глухенькая, Г. Н. Пестов, А. И. Гулидова, М. А. Сауров, П. А. Смирнов, М. Е. Федянина, А. О. Козлов, А. И. Савицкий, 2024

Ключевые слова: тонкие пленки GST, фазопеременные материалы, электрическое переключение, металлический резистивный нагреватель, джоулев нагрев, электрический нагрев

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-79-10309) в научно-исследовательской лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники» МИЭТ.

Благодарности: авторы выражают благодарность А. А. Шерченкову, П. И. Лазаренко и Д. Ю. Терехову за оказанную помощь в проведении экспериментов.

Для цитирования: Кристаллизация тонких пленок $Ge_2Sb_2Te_5$ с помощью тонкопленочного резистивного нагревательного элемента для создания оптоэлектронных и интегрально-оптических элементов и устройств на их основе / В. Б. Глухенькая, Г. Н. Пестов, А. И. Гулидова и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 267–280. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-267-280. – EDN: AHFMYE.

Original article

Crystallization of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films using a thin-film resistive heating element to create optoelectronic and integrated optical elements and devices based on them

V. B. Glukhenkaya[1], G. N. Pestov[1,2], A. I. Gulidova[1], M. A. Saurov[1,2], P. A. Smirnov[1,3], M. E. Fedyanina[1], A. O. Kozlov[2], A. I. Savitskiy[1,2]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]SMC "Technological Centre", Moscow, Russia
[3]P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

u132032@edu.miet.ru

Abstract. Thin films of the $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) material are characterized by high rate of phase transformations (< 50 ns) and high optical contrast (~ 30 %) between amorphous and crystalline structure. A common way to switch thin GST films from an amorphous to a crystalline state is laser radiation. However, reversible switching of elements with a large size of the GST functional area can only be achieved in the surface scanning mode with a pulsed laser beam, which significantly increases switching time. In this work, the design of the functional micro-sized GST region switching a thin-film resistive heating element is presented. It has been established that crystallization of 100×100 μm 30 nm GST functional area into fcc structure occurs when single 200 ms long electric impulse with amplitude 2.1 V (~ 310 mA), or at 1.7 V and ~ 220 mA current in DC measuring mode, flows through heating element. According to implemented computer simulation, the GST area at this electrical action heats up to ~ 218 °C. The results obtained demonstrate the possibility to use the developed and fabricated structure for creation of elements of non-volatile active optical and optoelectronic devices, including information display devices.

Keywords: thin films GST, phase change materials, electrical switching, metal resistive heater, Joule heating, electrical heating

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-79-10309) in the "Materials and devices laboratory of active photonics" MIET.

Acknowledgements: the authors express their gratitude to A. A. Sherchenkov, P. I. Lazarenko and D. Yu. Terekhov for their assistance in conducting experiments.

For citation: Glukhenkaya V. B., Pestov G. N., Gulidova A. I., Saurov M. A., Smirnov P. A., Fedyanina M. E., Kozlov A. O., Savitskiy A. I. Crystallization of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films using a thin-film resistive heating element to create optoelectronic and integrated optical elements and devices based on them. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 267–280. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-267-280. – EDN: AHFMYE.

Введение. Развитие оптоэлектроники, фотоники и интегральной оптики, а также усложнение задач, которые решают данные области, предъявляют повышенные требования к высокоскоростной передаче, обработке, хранению и визуализации данных, к совершенствованию систем отображения информации и управления оптическими сигналами. Возрастающий интерес к структурам, позволяющим осуществлять энергонезависимое хранение или отображение информации и эффективное управление проходящим или отраженным оптическим сигналом [1–4], определяют актуальность проводимых исследований и открывают возможности для изучения и создания быстродействующих оптических и оптоэлектронных элементов, в том числе активных элементов отображения информации с обратимо перестраиваемыми оптическими свойствами.

Активные элементы отображения информации могут быть разработаны и изготовлены на основе фазопеременных материалов (Phase Change Materials, PCM). Особенность данных материалов заключается в возможности протекания быстрых обратимых фазовых превращений между неупорядоченным (аморфным) и упорядоченным (кристаллическим) состояниями. Данные превращения сопровождаются существенным изменением показателя преломления и отражательной способности, что позволяет осуществлять контролируемое изменение оптических параметров взаимодействующего с фазопеременным материалом излучения.

На сегодняшний день можно выделить три основных направления исследований и разработок, на которых сконцентрировано внимание научных групп в области фотоники: 1) элементы фотонных интегральных схем, в частности многоуровневая оптическая память [5], элементы волноводной фотоники [6–8], нейроморфные сети и вычисления [9, 10] и т. д.; 2) элементы отображения информации и маскирующих покрытий, в частности перестраиваемые светофильтры [11], динамические дисплеи [2, 12–14], термокамуфляж [15, 16] и т. д.; 3) структуры на основе метаповерхностей, в частности голографические элементы [17, 18], наноантенны ближнего и среднего инфракрасного диапазонов [19, 20], металинзы и фокусирующие устройства [21, 22] и т. д.

Наиболее перспективным материалом для создания активных быстродействующих оптических элементов с переключаемыми или перестраиваемыми оптическими свойствами являются тонкие пленки $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST). Выбор данного материала обусловлен высокой скоростью фазовых превращений (< 50 нс) [4], большим оптическим контрастом (~ 30 %) [23], возможностью формирования более десяти состояний с различной степенью кристаллизации [24], энергонезависимым поддержанием формируемых фазо-

вых состояний, низким уровнем поглощения в аморфном состоянии в ближнем инфракрасном диапазоне, а также совместимостью с КМОП-технологией. Инициировать обратимые изменения фазового состояния в тонких пленках GST можно с помощью низкочастотного электрического поля (электрическое переключение [25]), лазерного излучения (оптическое переключение [26, 27]) и внешнего нагревательного элемента, в том числе резистивного (резистивное переключение [28, 29]).

Цель настоящей работы – разработка конструкции и определение параметров переключения (кристаллизации) функциональной микроразмерной области $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) с помощью тонкопленочного резистивного нагревателя.

Переключение функциональной области GST. В процессе разработки активных элементов оптических и оптоэлектронных устройств отображения информации важна не только скорость изменения фазовых состояний, но и возможность равномерной объемной кристаллизации / аморфизации функциональной области GST, в том числе области GST большой площади. Поиск оптимальных подходов к переключению фазопеременных материалов и изготовленных на их основе оптоэлектронных элементов является актуальной научно-практической задачей. При электрическом переключении с уменьшением размеров функциональной области увеличивается ее сопротивление, а следовательно, и ток, необходимый для инициации процессов кристаллизации / аморфизации, что приводит к росту энергопотребления в целом. Вследствие точечного разогрева и высоких тепловых потерь кристаллизация всего объема материала микроразмерной функциональной области при относительно малых токах и низком энергопотреблении не происходит. Равномерно закристаллизовать функциональную область GST большой площади при локальном воздействии можно с помощью лазерного излучения. Однако это предъявляет повышенные требования к равномерности распределения профиля интенсивности излучения (применение амплитудно-фазовых корректоров пучка – π-шейперов) и обусловливает наличие громоздкого внешнего источника энергетического воздействия. Инициировать фазовые изменения функциональной площади можно также в режиме сканирования лазерного луча по поверхности материала, но это повлечет за собой увеличение времени переключения функциональной области в целом.

Оптимальным решением для корректного функционирования разрабатываемых элементов является переключение GST с помощью резистивного нагревательного элемента. При резистивном переключении кристаллизация функциональной области GST происходит в результате поглощения джоулева тепла, выделяемого резистивным нагревателем вследствие протекания через него электрического тока. Данный способ переключения обеспечивает не только кристаллизацию поверхности функциональной области большой площади, но и всего ее объема, что позволяет осуществлять стабильное управление падающим и/или отраженным световым сигналом. Кристаллизация микроразмерной области GST с помощью резистивного нагревательного элемента может быть инициирована при следующих параметрах электрического импульса: 1,0–3,2 В/200 мс [29] или 2,4 В/10 мс [30]. Параметры переключения области GST зависят от материалов нагревателя и прилегающих слоев, а также от размеров самой переключаемой области.

Технологические этапы изготовления экспериментальной структуры. Исследование процесса переключения функциональной области GST размером 100 × 100 мкм проводили с помощью тонкопленочного резистивного нагревателя. Структуры изготавливали на стеклянных подложках Corning glass 1737F толщиной 0,7 мм методом контактной литографии в три этапа. На первом этапе формировали метки совмещения и

металлический тонкопленочный резистивный нагреватель (рис. 1, *а*), на втором этапе – контактные площадки (рис. 1, *б*), на третьем этапе – функциональную область $Ge_2Sb_2Te_5$ (30 нм), на поверхность которой осаждали 20-нм слой оксида кремния SiO_2 (рис. 1, *в*), предотвращающий процессы окисления и деградации функционального материала вследствие термических воздействий. Металлический нагреватель и контактные площадки изготавливали из никеля (Ni) толщиной 150 и 250 нм соответственно. Для повышения адгезионной прочности Ni-нагревателя и контактных площадок на подложке предварительно формировали 20-нм подслой из титана (Ti). Нагреватель представляет собой элемент длиной 1,5 мм и с переменной шириной, которая при движении от края нагревательного элемента к центру уменьшается от 400 до 250 мкм.

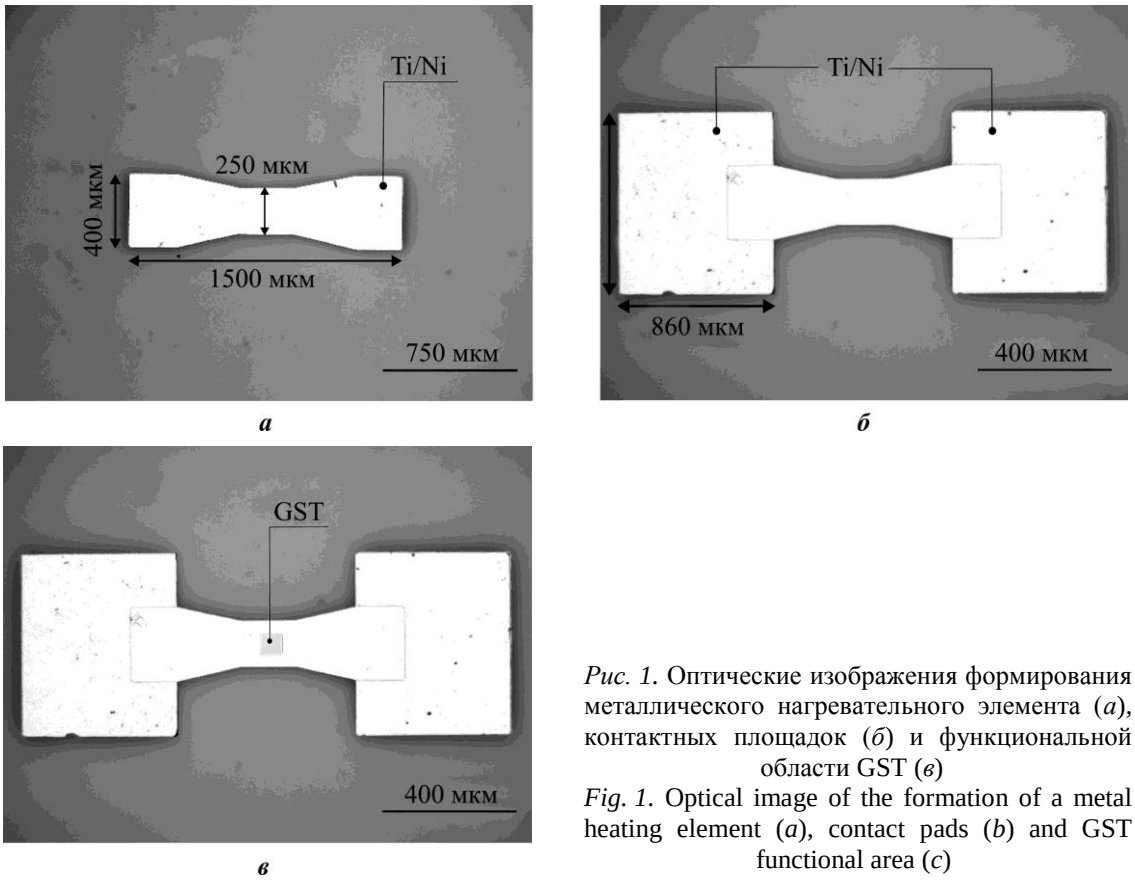


Рис. 1. Оптические изображения формирования металлического нагревательного элемента (*а*), контактных площадок (*б*) и функциональной области GST (*в*)
Fig. 1. Optical image of the formation of a metal heating element (*a*), contact pads (*b*) and GST functional area (*c*)

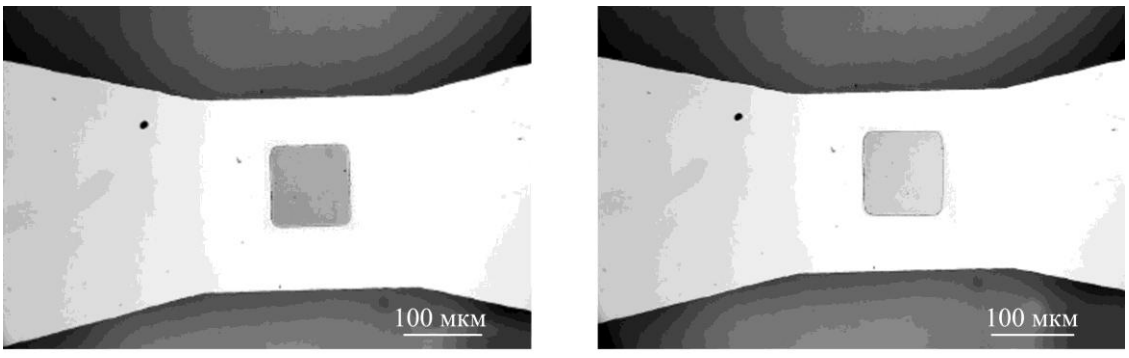
Элементы структуры на каждом из этапов формировали в слое позитивного фоторезиста (ФП3515) толщиной 1,5 мкм с разрешающей способностью 500 линий/мм. Данное разрешение обеспечивает формирование элементов с топологическим размером в несколько единиц микрометров. Нанесение фоторезиста проводили методом двухэтапного центрифугирования, после чего его сушили при температуре 90 °С в течение 10 мин. Экспонирование фоторезиста проводили УФ-лампой (λ = 365 нм) через темнопольный пленочный фотошаблон, выполненный на тонкой полимерной пленке. Проэкспонированные участки фоторезистивной маски проявляли в 0,6%-ном растворе NaOH в течение 25 с при комнатной температуре. Вскрытые окна впоследствии заполняли металлом (Ti, Ni), функциональным (GST) и защитным (SiO_2) материалами.

Заполнение вскрытых окон тонкими пленками Ti, Ni и GST проводили методом магнетронного распыления материалов мишени. Защитный слой SiO_2 формировали методом электронно-лучевого испарения. Перед заполнением вскрытых окон поверхность образца обрабатывали в кислородной плазме в течение 3 мин с целью удаления недопроявленного фоторезиста и остаточной влаги, а также для дополнительной физико-химической активации поверхности. Снятие фоторезиста после завершения каждого из этапов проводили в 99%-ном растворе ДМФА методом взрывной литографии в ультразвуковой ванне при температуре 70 °C в течение 30 с. Далее образец последовательно промывали в горячей (70 °C, 1 мин) и проточной холодной (25 °C, 1 мин) деионизованной воде и сушили в потоке аргона.

Методы исследований. Толщину всех сформированных слоев контролировали методом стилусной профилометрии (KLA-Tencor, США). Контроль линейных размеров изготовленной структуры осуществляли методом оптической микроскопии. Отклонение размеров сформированных на подложке элементов относительно размеров элементов на фотошаблоне не превышало 15 %.

Электрическое переключение функциональной области GST с помощью резистивного нагревательного элемента осуществляли на зондовой станции с помощью источника питания Agilent E3647A, цифрового мультиметра Keithley 2700 (DC-режим) и генератора импульсов 200 В Keysight B2912A (импульсный режим). Идентификацию фазового состояния пленок GST до и после резистивного переключения проводили методом комбинационного рассеяния (КР) света на установке Centaur U HR (λ = 532 нм, $P \approx 0{,}1$ мВт). Спектральные характеристики показателя преломления $n(\lambda)$ и коэффициента экстинкции $k(\lambda)$ материала функциональной области получены методом эллипсометрии в видимой области спектра с помощью эллипсометра Horiba Uvisel 2 (Horiba, Франция).

Результаты и их обсуждение. В DC-режиме измерений в результате протекания через нагревательный элемент тока, равного 220 мА, при напряжении 1,7 В наблюдается изменение отражательной способности функциональной области (рис. 2). Аналогичные результаты получены при переключении структуры одиночным электрическим импульсом П-образной формы длительностью t = 200 мс и амплитудой U = 2,1 В, при этом через нагреватель протекал ток ~ 310 мА.



а ***б***

Рис. 2. Оптические изображения функциональной области GST до (*а*) и после (*б*) резистивного переключения

Fig. 2. Optical images of the GST functional area before (*a*) and after (*b*) resistive switching

Наблюдаемые оптические изменения обусловлены различием спектральных характеристик $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ материала GST, полученных в области переключения до и после электрического воздействия: $\Delta n \approx 1{,}0$, $\Delta k \approx 0{,}5$ при $\lambda = 650$ нм (рис. 3, *а*). На основе полученных спектральных характеристик с помощью математической модели Тауца – Лоренца для исследуемых структур проведен расчет оптической ширины запрещенной зоны $\Delta E_g^{\text{опт}}$ [31, 32]. Результаты расчета показали, что $\Delta E_g^{\text{опт}}$ исходной пленки GST равна 0,7 эВ, а после переключения составляет 0,4 эВ. Полученные значения коррелируют с литературными данными и соответствуют значениям $\Delta E_g^{\text{опт}}$ для материала GST в аморфном [33] и кристаллическом [32] состояниях.

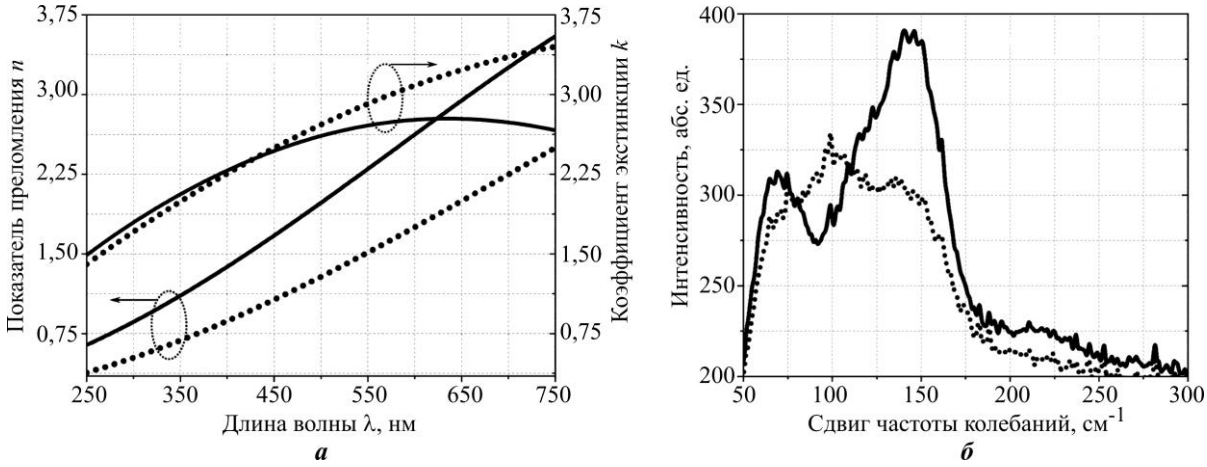


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента экстинкции *k* и показателя преломления *n* от длины волны λ (*а*) и КР-спектры (*б*) функциональной области GST до (——) и после (• • •) резистивного переключения

Fig. 3. Spectral dependence of the extinction coefficient *k* and refractive index *n* on the wavelength λ (*a*) and Raman spectra (*b*) of the GST functional region before (——) and after (• • •) resistive switching

Анализ результатов спектроскопии КР света в данной области показал, что формы КР-спектров материала GST, полученных до и после переключения, существенно различаются (рис. 3, *б*). Это также подтверждает произошедшие структурные изменения вследствие приложенного электрического воздействия. Отметим, что в работе [34] при сравнении результатов спектроскопии КР света и рентгенофазового анализа свежеосажденных и термически обработанных тонких пленок GST установлено, что изменение формы КР-спектров обусловлено кристаллизацией исходной аморфной области GST в fcc-структуру.

Расчет тепловых параметров и температурное моделирование. Кристаллизация аморфных тонких пленок материала $Ge_2Sb_2Te_5$ толщиной 30 нм начинается при температуре $T_{\text{кр}} \approx 145$ °C [35]. Для того чтобы полностью закристаллизовать пленку данного материала под воздействием электрического импульса, необходимо нагреть ее выше $T_{\text{кр}}$ – до температур ~ 200–220 °C [1]. Для того чтобы разогреть функциональную область GST толщиной 30 нм и площадью 100×100 мкм от комнатной температуры (25 °C) до 200 °C, необходимо затратить 63 нДж тепла, рассчитанного по формуле

$$Q_{\text{кр}}^{GST} = c_{\text{ам}} m \Delta t = c_{\text{ам}} \rho_{\text{ам}} V \Delta t ,$$

где $c_{ам}$ = 213 Дж/(кг·К) [36] – удельная теплоемкость пленки; m – масса материала GST; Δt – разница между начальной (комнатной) и конечной температурами GST; $\rho_{ам}$ = 5900 кг/м^3 [29] – плотность пленки; V – объем, занимаемый тонкой пленкой.

Если через резистивный Ni-нагреватель (R_{Ni} = 1 Ом) толщиной 150 нм пропустить одиночный импульс амплитудой U = 2,1 В и длительностью t = 200 мс, то выделится ~ 0,8 Дж тепла, что с учетом теплового рассеяния существенно больше $Q_{кр}^{GST}$:

$$Q^{Ni} = \frac{U^2 t}{R_{Ni}}.$$

Компьютерное моделирование распространения тепловых потоков методом конечных элементов с использованием специализированного программного обеспечения показало хорошую корреляцию модели с экспериментально полученными данными. Согласно результатам моделирования в структуре выбранной геометрии максимальное распределение плотности тока достигается в самой узкой части нагревательного элемента, в которой расположена переключаемая область GST. При протекании электрического тока через разработанную и изготовленную структуру в самой узкой части нагревателя функциональная область GST разогревается до температуры ~ 218 °C (рис. 4, *а*) при приложении напряжения U = 2,1 В (рис. 4, *б*). Расчет построенной мультифизической модели осуществляли на основе интерполяции экспериментальных результатов. Моделирование процесса теплопередачи проводили с использованием закона теплопроводности:

$$\rho C_p u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q_p,$$

расчеты распределений электрического тока и потенциала проводили с помощью соотношений:

$$Q_p = \nabla j = \sigma E, \quad E = -\nabla U,$$

где ρ – плотность твердого тела, кг/м^3; C_p – удельная теплоемкость твердого тела, Дж/(кг·К); u – поле скорости перемещения жидкости / газа при конвективном теплообмене, м/с; ∇T – градиент температуры; k – коэффициент теплопроводности твердого тела, Дж/(Вт·К); Q_p – джоулев тепловой поток, Вт/м^2; j – плотность тока, А/м^2; σ – электропроводность, См/м; ∇U – градиент напряжения.

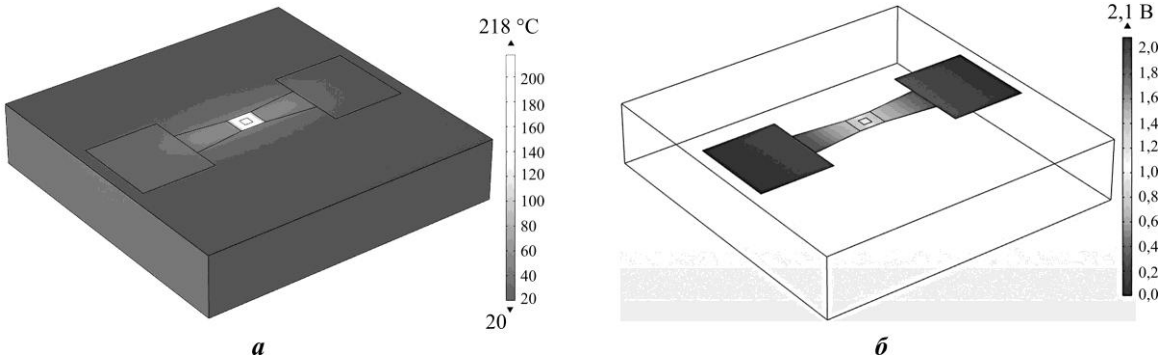


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования разработанной структуры: *а* – карта распределения температуры; *б* – карта распределения электрического потенциала
Fig. 4. Computer simulation results of the developed structure: *a* – temperature distribution map; *b* – electrical potential distribution map

Заключение. Полученные результаты демонстрируют возможность применения разработанной и изготовленной структуры для создания элементов энергонезависимых активных оптических и оптоэлектронных устройств, в том числе устройств отображения информации. Данная структура может быть использована для дальнейшей разработки и оптимизации технологии изготовления оптических и оптоэлектронных устройств, обеспечивающих контролируемое изменение прошедшего / отраженного оптического сигнала с помощью резистивного нагревательного элемента, в том числе для разработки и создания оптоэлектронного устройства с обратимо-перестраиваемой дифракционной решеткой, формируемой в поле сканирования лазерным излучением фемтосекундной длительностью [37].

Литература

1. ***Guo P., Sarangan A. M., Agha I.*** A review of germanium-antimony-telluride phase change materials for non-volatile memories and optical modulators // Appl. Sci. 2019. Vol. 9. Iss. 3. Art. No. 530. https://doi.org/10.3390/app9030530

2. Wide bandgap phase change material tuned visible photonics / ***W. Dong, H. Liu, J. K. Behera et al.*** // Adv. Funct. Mater. 2019. Vol. 29. Iss. 6. Art. ID: 180618. https://doi.org/10.1002/adfm.201806181

3. ***Wuttig M., Bhaskaran H., Taubner T.*** Phase-change materials for non-volatile photonic applications // Nature Photon. 2017. Vol. 11. Iss. 8. P. 465–476. https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.126

4. ***Козюхин С. А., Лазаренко П. И., Попов А. И., Еременко И. Л.*** Материалы фазовой памяти и их применение // Успехи химии. 2022. Т. 91. № 9. Ст. RCR5033. EDN: MPYYZG.

5. Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory / ***C. Ríos, M. Stegmaier, P. Hosseini et al.*** // Nature Photon. 2015. Vol. 9. Iss. 11. P. 725–732. https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.182

6. Low power reconfigurable multilevel nanophotonic devices based on Sn-doped $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films / ***P. Lazarenko, V. Kovalyuk, P. An et al.*** // Acta Mater. 2002. Vol. 234. Art. ID: 117994. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117994

7. Optical switching at 1.55 μm in silicon racetrack resonators using phase change materials / ***M. Rudé, J. Pello, R. E. Simpson et al.*** // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103. Iss. 14. Art. No. 141119. https://doi.org/10.1063/1.4824714

8. Active control of surface plasmon waveguides with a phase change material / ***M. Rudé, R. E. Simpson, R. Quidant et al.*** // ACS Photonics. 2015. Vol. 2. Iss. 6. P. 669−674. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5b00050

9. All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities / ***J. Feldmann, N. Youngblood, C. D. Wright et al.*** // Nature. 2019. Vol. 569. No. 7755. P. 208–214. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1157-8

10. A neuromorphic device implemented on a salmon-DNA electrolyte and its application to artificial neural networks / ***D.-H. Kang, J.-H. Kim, S. Oh et al.*** // Adv. Sci. 2019. Vol. 6. Iss. 17. Art. ID: 1901265. https://doi.org/10.1002/advs.201901265

11. ***Hosseini P., Wright C. D., Bhaskaran H.*** An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films // Nature. 2014. Vol. 511. No. 7508. P. 206–211. https://doi.org/10.1038/nature13487

12. ***Ríos C., Hosseini P., Taylor R. A., Bhaskaran H.*** Color depth modulation and resolution in phase-change material nanodisplays // Adv. Mater. 2016. Vol. 28. Iss. 23. P. 4720–4726. https://doi.org/10.1002/adma.201506238

13. A nonvolatile phase-change metamaterial color display / ***S. G.-C. Carrillo, L. Trimby, Y.-Y. Au et al.*** // Adv. Opt. Mater. 2019. Vol. 7. Iss. 18. Art. ID: 1801782. https://doi.org/10.1002/adom.201801782

14. Polarization-independent actively tunable colour generation on imprinted plasmonic surfaces / ***D. Franklin, Y. Chen, A. Vazquez-Guardado et al.*** // Nat. Commun. 2015. Vol. 6. No. 1. Art. No. 7337. https://doi.org/10.1038/ncomms8337

15. Thermal camouflage based on the phase-changing material GST / ***Y. Qu, Q. Li, L. Cai et al.*** // Light Sci. Appl. 2018. Vol. 7. No. 1. Art. No. 26. https://doi.org/10.1038/s41377-018-0038-5

16. ***Kim C., Kim Y., Lee M.*** Laser-induced tuning and spatial control of the emissivity of phase-changing $Ge_2Sb_2Te_5$ emitter for thermal camouflage // Adv. Mater. Technol. 2022. Vol. 7. Iss. 8. Art. ID: 2101349. https://doi.org/10.1002/admt.202101349

17. Rewritable full-color computer-generated holograms based on color-selective diffractive optical components including phase-change materials / ***C.-Y. Hwang, G. H. Kim, J.-H. Yang et al.*** // Nanoscale. 2018. Vol. 10. Iss. 46. P. 21648–21655. https://doi.org/10.1039/C8NR04471F

18. Holographic image generation with a thin-film resonance caused by chalcogenide phase-change material / ***S.-Y. Lee, Y.-H. Kim, S.-M. Cho et al.*** // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. Art. No. 41152. https://doi.org/10.1038/srep41152

19. Active-tuning and polarization-independent absorber and sensor in the infrared region based on the phase change material of $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) / ***Z. Guo, X. Yang, F. Shen et al.*** // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. Art. No. 12433. https://doi.org/10.1038/s41598-018-30550-2

20. Electrical tuning of phase-change antennas and metasurfaces / ***Y. Wang, P. Landreman, D. Schoen et al.*** // Nat. Nanotechnol. 2021. Vol. 16. Iss. 6. P. 667–672. https://doi.org/10.1038/s41565-021-00882-8

21. Stimuli-responsive dynamic metaholographic displays with designer liquid crystal modulators / ***I. Kim, M. A. Ansari, M. Q. Mehmood et al.*** // Adv. Mater. 2020. Vol. 32. Iss. 50. Art. No. 200466421. https://doi.org/10.1002/adma.202004664

22. Electrically switchable metallic polymer nanoantennas / ***J. Karst, M. Floess, M. Ubl et al.*** // Science. 2021. Vol. 374. Iss. 6567. P. 612–616. https://doi.org/10.1126/science.abj3433

23. Impact of disorder on optical reflectivity contrast of epitaxial $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films / ***M. Behrens, A. Lotnyk, U. Roß et al.*** // CrystEngComm. 2018. Vol. 20. Iss. 26. P. 3688–3695. https://doi.org/10.1039/C8CE00534F

24. Device-level photonic memories and logic applications using phase-change materials / ***Z. Cheng, C. Ríos, N. Youngblood et al.*** // Adv. Mater. 2018. vol. 30. Iss. 32. Art. ID: 1802435. https://doi.org/10.1002/adma.201802435

25. Phase change memory technology / ***G. W. Burr, M. J. Breitwisch, M. Franceschini et al.*** // J. Vac. Sci. Technol. B. 2010. Vol. 28. Iss. 2. P. 223–262. https://doi.org/10.1116/1.3301579

26. Laser-induced modification of amorphous GST225 phase change materials / ***S. A. Kozyukhin, P. I. Lazarenko, Yu. V. Vorobyov et al.*** // Matériaux et Techniques. 2019. Vol. 107. No. 3. Art. No. 307. https://doi.org/10.1051/mattech/2019008

27. ***Du J., Mu Z., Li L., Li J.*** A Raman study on nanosecond-laser-induced multi-level switching of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films // Opt. Laser Technol. 2021. Vol. 144. Art. ID: 107393. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107393

28. Electrically reconfigurable non-volatile metasurface using low-loss optical phase-change material / ***Y. Zhang, C. Fowler, J. Liang et al.*** // Nat. Nanotechnol. 2021. Vol. 16. Iss. 6. P. 661–666. https://doi.org/10.1038/s41565-021-00881-9

29. ITO-based microheaters for reversible multi-stage switching of phase-change materials: Towards miniaturized beyond-binary reconfigurable integrated photonics / ***H. Taghinejad, S. Abdollahramezani, A. A. Eftekhar et al.*** // Opt. Express. 2021. Vol. 29. Iss. 13. P. 20449–20462. https://doi.org/10.1364/OE.424676

30. ***Zhou T., Gao D., Cao Sh., Cheng Zh.*** Electrically tunable non-volatile reflective display pixel structure based on phase change material // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1544. Art. No. 012034. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1544/1/012034

31. Comparison of methods to determine bandgaps of ultrathin HfO_2 films using spectroscopic ellipsometry / ***M. Di, E. Bersch, A. C. Diebold et al.*** // J. Vac. Sci. Technol. A. 2011. Vol. 29. Iss. 4. Art. ID: 041001. https://doi.org/10.1116/1.3597838

32. Optical constants acquisition and phase change properties of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films based on spectroscopy / ***Z. Xu, C. Chen, Z. Wang et al.*** // RSC Adv. 2018. Vol. 8. Iss. 37. P. 21040–21046. https://doi.org/10.1039/C8RA01382A

33. Influence of the degree of crystallinity on the dispersion of the optical parameters of $Ge_2Sb_2Te_5$ phase-change memory thin films / ***M. E. Fedyanina, P. I. Lazarenko, Yu. V. Vorobyov et al.*** // Semiconductors. 2020. Vol. 54. Iss. 13. P. 1775–1783. https://doi.org/10.1134/S1063782620130060

34. Peculiarities of crystallization process for $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films by nanosecond single laser pulse / ***P. Lazarenko, M. Savelyev, A. Sherchenkov et al.*** // Chalcogenide Lett. 2018. Vol. 15. No. 1. P. 25–33.

35. Electrophysical properties of Ge–Sb–Te thin films for phase change memory devices / ***P. I. Lazarenko, S. A. Kozyukhin, A. A. Sherchenkov et al.*** // Russ. Phys. J. 2017. Vol. 59. Iss. 9. P. 1417–1424. https://doi.org/10.1007/s11182-017-0925-x

36. Current-driven phase-change optical gate switch using indium–tin-oxide heater / ***K. Kato, M. Kuwahara, H. Kawashima et al.*** // Appl. Phys. Express. 2017. Vol. 10. No. 7. Art. No. 072201. https://doi.org/10.7567/APEX.10.072201

37. Direct single-pass writing of two-phase binary diffraction gratings in a $Ge_2Sb_2Te_5$ thin film by femtosecond laser pulses / ***M. P. Smayev, P. I. Lazarenko, I. A. Budagovsky et al.*** // Opt. Laser Technol. 2022. Vol. 153. Art. ID: 108212. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108212

Статья поступила в редакцию 25.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 22.11.2023 г.;
принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Глухенькая Виктория Борисовна – инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), u132032@edu.miet.ru

Пестов Григорий Николаевич – инженер Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), grisha.pestow@yandex.ru

Гулидова Алла Ималиевна – студентка Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), skant_5@mail.ru

Сауров Михаил Александрович – аспирант Института интегральной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер научно-исследовательской лаборатории мемристивных систем на основе самоорганизованных наноструктур НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), michael15-52@mail.ru

Смирнов Петр Андреевич – студент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-исследователь Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 53), petr-smirnov-00@yandex.ru

Федянина Мария Евгеньевна – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), mahamaha1996@gmail.com

Козлов Александр Олегович – ведущий инженер НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), alex_kozlov@yahoo.com

Савицкий Андрей Иванович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), andr.savitskiy@gmail.com

References

1. Guo P., Sarangan A. M., Agha I. A review of germanium-antimony-telluride phase change materials for non-volatile memories and optical modulators. *Appl. Sci.*, 2019, vol. 9, iss. 3, art. no. 530. https://doi.org/10.3390/app9030530

2. Dong W., Liu H., Behera J. K., Lu L., Ng R. J. H., Sreekanth K. V., Zhou X., Yang J. K. W., Simpson R. E. Wide bandgap phase change material tuned visible photonics. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, vol. 29, iss. 6, art. ID: 180618. https://doi.org/10.1002/adfm.201806181

3. Wuttig M., Bhaskaran H., Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications. *Nature Photon.*, 2017, vol. 11, iss. 8, pp. 465–476. https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.126

4. Kozyukhin S. A., Lazarenko P. I., Popov A. I., Eremenko I. L. Phase change memory materials and their applications. *Russ. Chem. Rev.*, 2022, vol. 91, iss. 9, art. ID: RCR5033. https://doi.org/10.1070/RCR5033

5. Ríos C., Stegmaier M., Hosseini P., Wang D., Scherer T., Wright C. D., Bhaskaran H., Pernice W. H. P. Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory. *Nature Photon.*, 2015, vol. 9, iss. 11, pp. 725–732. https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.182

6. Lazarenko P., Kovalyuk V., An P., Kozyukhin S., Takáts V., Golikov A., Glukhenkaya V., Vorobyov Yu. et al. Low power reconfigurable multilevel nanophotonic devices based on Sn-doped $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films. *Acta Mater.*, 2002, vol. 234, art. ID: 117994. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117994

7. Rudé M., Pello J., Simpson R. E., Osmond J., Roelkens G., Tol J. J. G. M. van der, Pruneri V. Optical switching at 1.55 μm in silicon racetrack resonators using phase change materials. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 103, iss. 14, art. no. 141119. https://doi.org/10.1063/1.4824714

8. Rudé M., Simpson R. E., Quidant R., Pruneri V., Renger J. Active control of surface plasmon waveguides with a phase change material. *ACS Photonics*, 2015, vol. 2, iss. 6, pp. 669−674. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5b00050

9. Feldmann J., Youngblood N., Wright C. D., Bhaskaran H., Pernice W. H. P. All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities. *Nature*, 2019, vol. 569, no. 7755, pp. 208–214. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1157-8

10. Kang D.-H., Kim J.-H., Oh S., Park H.-Y., Dugasani S. R., Kang B.-S., Choi C., Choi R. et al. A neuromorphic device implemented on a salmon-DNA electrolyte and its application to artificial neural networks. *Adv. Sci.*, 2019, vol. 6, iss. 17, art. ID: 1901265. https://doi.org/10.1002/advs.201901265

11. Hosseini P., Wright C. D., Bhaskaran H. An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films. *Nature*, 2014, vol. 511, no. 7508, pp. 206–211. https://doi.org/10.1038/nature13487

12. Ríos C., Hosseini P., Taylor R. A., Bhaskaran H. Color depth modulation and resolution in phase-change material nanodisplays. *Adv. Mater.*, 2016, vol. 28, iss. 23, pp. 4720–4726. https://doi.org/10.1002/adma.201506238

13. Carrillo S. G.-C., Trimby L., Au Y.-Y., Nagareddy V. K., Rodriguez-Hernandez G., Hosseini P., Ríos C., Bhaskaran H., Wright C. D. A nonvolatile phase-change metamaterial color display. *Adv. Opt. Mater.*, 2019, vol. 7, iss. 18, art. ID: 1801782. https://doi.org/10.1002/adom.201801782

14. Franklin D., Chen Y., Vazquez-Guardado A., Modak S., Boroumand J., Xu D., Wu S.-T., Chanda D. Polarization-independent actively tunable colour generation on imprinted plasmonic surfaces. *Nat. Commun.*, 2015, vol. 6, no. 1, art. no. 7337. https://doi.org/10.1038/ncomms8337

15. Qu Y., Li Q., Cai L., Pan M., Ghosh P., Du K., Qiu M. Thermal camouflage based on the phase-changing material GST. *Light Sci. Appl.*, 2018, vol. 7, no. 1, art. no. 26. https://doi.org/10.1038/s41377-018-0038-5

16. Kim C., Kim Y., Lee M. Laser-induced tuning and spatial control of the emissivity of phase-changing $Ge_2Sb_2Te_5$ emitter for thermal camouflage. *Adv. Mater. Technol.*, 2022, vol. 7, iss. 8, art. ID: 2101349. https://doi.org/10.1002/admt.202101349

17. Hwang C.-Y., Kim G. H., Yang J.-H., Hwang C.-S., Cho S. M., Lee W.-J., Pi J.-E., Choi J. H. et al. Rewritable full-color computer-generated holograms based on color-selective diffractive optical components including phase-change materials. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, iss. 46, pp. 21648–21655. https://doi.org/10.1039/C8NR04471F

18. Lee S.-Y., Kim Y.-H., Cho S.-M., Kim G. H., Kim T.-Y., Ryu H., Kim H. N., Kang H. B. et al. Holographic image generation with a thin-film resonance caused by chalcogenide phase-change material. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, art. no. 41152. https://doi.org/10.1038/srep41152

19. Guo Z., Yang X., Shen F., Zhou Q., Gao J., Guo K. Active-tuning and polarization-independent absorber and sensor in the infrared region based on the phase change material of $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST). *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, art. no. 12433. https://doi.org/10.1038/s41598-018-30550-2

20. Wang Y., Landreman P., Schoen D., Okabe K., Marshall A., Celano U., Wong H.-S. P., Park J., Brongersma M. L. Electrical tuning of phase-change antennas and metasurfaces. *Nat. Nanotechnol.*, 2021, vol. 16, iss. 6, pp. 667–672. https://doi.org/10.1038/s41565-021-00882-8

21. Kim I., Ansari M. A., Mehmood M. Q., Kim W.-S., Jang J., Zubair M., Kim Y.-K., Rho J. Stimuli-responsive dynamic metaholographic displays with designer liquid crystal modulators. *Adv. Mater.*, 2020, vol. 32, iss. 50, art. no. 200466421. https://doi.org/10.1002/adma.202004664

22. Karst J., Floess M., Ubl M., Dingler C., Malacrida C., Steinle T., Ludwigs S., Hentschel M., Giessen H. Electrically switchable metallic polymer nanoantennas. *Science*, 2021, vol. 374, iss. 6567, pp. 612–616. https://doi.org/10.1126/science.abj3433

23. Behrens M., Lotnyk A., Roß U., Griebel J., Schumacher P., Gerlach J. W., Rauschenbach B. Impact of disorder on optical reflectivity contrast of epitaxial $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films. *CrystEngComm*, 2018, vol. 20, iss. 26, pp. 3688–3695. https://doi.org/10.1039/C8CE00534F

24. Cheng Z., Ríos C., Youngblood N., Wright C. D., Pernice W. H. P., Bhaskaran H. Device-level photonic memories and logic applications using phase-change materials. *Adv. Mater.*, 2018, vol. 30, iss. 32, art. ID: 1802435. https://doi.org/10.1002/adma.201802435

25. Burr G. W., Breitwisch M. J., Franceschini M., Garetto D., Gopalakrishnan K., Jackson B., Kurdi B., Lam C. et al. Phase change memory technology. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2010, vol. 28, iss. 2, pp. 223–262. https://doi.org/10.1116/1.3301579

26. Kozyukhin S. A., Lazarenko P. I., Vorobyov Yu. V., Savelyev M. S., Polokhin A. A., Glukhenkaya V. B., Sherchenkov A. A., Gerasimenko A. Yu. Laser-induced modification of amorphous GST225 phase change materials. *Matériaux et Techniques,* 2019, vol. 107, no. 3, art. no. 307. https://doi.org/10.1051/
mattech/2019008

27. Du J., Mu Z., Li L., Li J. A Raman study on nanosecond-laser-induced multi-level switching of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 144, art. ID: 107393. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107393

28. Zhang Y., Fowler C., Liang J., Azhar B., Shalaginov M. Y., Deckoff-Jones S., An S., Chou J. B. et al. Electrically reconfigurable non-volatile metasurface using low-loss optical phase-change material. *Nat. Nanotechnol.*, 2021, vol. 16, iss. 6, pp. 661–666. https://doi.org/10.1038/s41565-021-00881-9

29. Taghinejad H., Abdollahramezani S., Eftekhar A. A., Fan T., Hosseinnia A. H., Hemmatyar O., Dorche A. E., Gallmon A., Adibi A. ITO-based microheaters for reversible multi-stage switching of phase-change materials: Towards miniaturized beyond-binary reconfigurable integrated photonics. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, iss. 13, pp. 20449–20462. https://doi.org/10.1364/OE.424676

30. Zhou T., Gao D., Cao Sh., Cheng Zh. Electrically tunable non-volatile reflective display pixel structure based on phase change material. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1544, art. no. 012034. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1544/1/012034

31. Di M., Bersch E., Diebold A. C., Consiglio S., Clark R. D., Leusink G. J., Kaack T. Comparison of methods to determine bandgaps of ultrathin HfO_2 films using spectroscopic ellipsometry. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2011, vol. 29, iss. 4, art. ID: 041001. https://doi.org/10.1116/1.3597838

32. Xu Z., Chen C., Wang Z., Wu K., Chong H., Ye H. Optical constants acquisition and phase change properties of $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films based on spectroscopy. *RSC Adv.*, 2018, vol. 8, iss. 37, pp. 21040–21046. https://doi.org/10.1039/C8RA01382A

33. Fedyanina M. E., Lazarenko P. I., Vorobyov Yu. V., Kozyukhin S. A., Dedkova A. A., Yakubov A. O., Levitskii V. S., Sagunova I. V., Sherchenkov A. A. Influence of the degree of crystallinity on the dispersion of the optical parameters of $Ge_2Sb_2Te_5$ phase-change memory thin films. *Semiconductors*, 2020, vol. 54, iss. 13, pp. 1775–1783. https://doi.org/10.1134/S1063782620130060

34. Lazarenko P., Savelyev M., Sherchenkov A., Gerasimenko A., Kozyukhin S., Glukhenkaya V., Polokhin A., Shaman Y., Vinogradov A. Peculiarities of crystallization process for $Ge_2Sb_2Te_5$ thin films by nanosecond single laser pulse. *Chalcogenide Lett.*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 25–33.

35. Lazarenko P. I., Kozyukhin S. A., Sherchenkov A. A., Babich A. V., Timoshenkov S. P., Gromov D. G., Zabolotskaya A. V., Kozik V. V. Electrophysical properties of Ge–Sb–Te thin films for phase change memory devices. *Russ. Phys. J.*, 2017, vol. 59, iss. 9, pp. 1417–1424. https://doi.org/10.1007/s11182-017-0925-x

36. Kato K., Kuwahara M., Kawashima H., Tsuruoka T., Tsuda H. Current-driven phase-change optical gate switch using indium–tin-oxide heater. *Appl. Phys. Express*, 2017, vol. 10, no. 7, art. no. 072201. https://doi.org/10.7567/APEX.10.072201

37. Smayev M. P., Lazarenko P. I., Budagovsky I. A., Yakubov A. O., Borisov V. N., Vorobyov Yu. V., Kunkel T. S., Kozyukhin S. A. Direct single-pass writing of two-phase binary diffraction gratings in a $Ge_2Sb_2Te_5$ thin film by femtosecond laser pulses. *Opt. Laser Technol.*, 2022, vol. 153, art. ID: 108212. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108212

The article was submitted 25.09.2023; approved after reviewing 22.11.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Victoria B. Glukhenkaya – Engineer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), u132032@edu.miet.ru

Grigory N. Pestov – Engineer of the Institute of Integrated Electronics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), grisha.pestow@yandex.ru

Alla I. Gulidova – Student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), skant_5@mail.ru

Mikhail A. Saurov – PhD student of the Integrated Electronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer of the Research Laboratory of Memristive Systems Based on Self-Organized Nanostructures, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), michael15-52@mail.ru

Peter A. Smirnov – Student of the National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Research Engineer of the P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky ave., 53), petr-smirnov-00@yandex.ru

Mariya E. Fedyanina – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), mahamaha1996@gmail.com

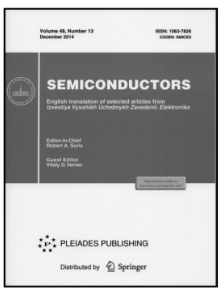
Aleksander O. Kozlov – Leading Engineer, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), alex_kozlov@yahoo.com

Andrey I. Savitskiy – Cand. Sci. (Eng.), Junior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Junior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Advanced Processes, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), andr.savitskiy@gmail.com

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал

SEMICONDUCTORS



Vol. 57, *No.* 1, 2023. – ISSN PRINT: 1063-7826, ISSN ONLINE: 1090-6479,

в котором опубликованы избранные статьи журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».

http://pleiades.online
http://link.springer.com

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья
УДК 621.3.049.77
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-281-289
EDN: ACQCCF

Исследование конструкторско-технологических особенностей пространственной сборки и монтажа функционального микромодуля

А. Ю. Титов, А. И. Погалов, С. П. Тимошенков

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

dtm@miee.ru

Аннотация. Для создания электронных изделий на базе перспективных технологий необходимы новые конструктивные варианты, учитывающие возможности коммутации элементов и компонентов, распределенных в ограниченном объеме. Гибкие платы на сегодняшний день не имеют альтернативы при обеспечении максимальной плотности коммутации, а также при пространственной сборке и монтаже микромодулей. В работе рассмотрены разработанные технологические процессы сборки и монтажа функционального микромодуля с защитой от внешних воздействий. Проведено моделирование с использованием метода конечных элементов для машинной реализации. Получена объемная картина распределения деформаций и напряжений в функциональном модуле. Показано, что созданная конструкция позволяет снизить массогабаритные характеристики, повысить надежность, обеспечить эффективный теплоотвод, электромагнитное экранирование и виброизоляцию микромодулей. Предложен новый способ сборки кремниевых кристаллов с использованием упоров. Осуществлен подбор материалов, изучены возникающие механические напряжения в соединении. Выявлены оптимальные данные с минимальными коэффициентами концентрации напряжений для обеспечения прочности и функционирования материалов, что дало возможность повысить выносливость соединений при циклических термомеханических воздействиях. На основании разработанных конечно-элементных моделей материалов, включая расчетные, а также узлов функционального микромодуля и принципов их использования проведен анализ напряженно-деформированного состояния, тепловых процессов, эффективности электромагнитного экранирования, способов защиты от вибрации и ударов, расчета прочности и долговечности, что позволило выбрать рациональные материалы, способы сборки и монтажа, конструкцию элементов и соединений.

© А. Ю. Титов, А. И. Погалов, С. П. Тимошенков, 2024

Ключевые слова: функциональный микромодуль, пространственная сборка, материалы микросоединения, термомеханическая прочность, напряженно-деформированное состояние, моделирование, конструктивно-технологические рекомендации, защита от внешних воздействий

Для цитирования: Титов А. Ю., Погалов А. И., Тимошенков С. П. Исследование конструкторско-технологических особенностей пространственной сборки и монтажа функционального микромодуля // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 281–289. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-281-289. – EDN: ACQCCF.

Original article

Research of engineering and technological specifics of the 3D assembly and mounting of a functional micromodule

A. Yu. Titov, A. I. Pogalov, S. P. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

dtm@miee.ru

Abstract. In order to create new generation electronic products based on advanced technologies, new design options are required that consider the switching capabilities of elements and components distributed in a limited space. Flexible boards today have no alternative in ensuring maximum switching density, as well as in 3D assembly and mounting of micromodules. In this work, the developed technological processes of assembly and mounting of the functional module with shield against external effects are considered. The simulation was carried out using finite element method for computer aided implementation. The dimensional pattern of strain and stress distribution in functional module was obtained. It was shown that created design makes it possible to reduce mass-dimensional characteristics, increase reliability, and provides effective heat dissipation, electromagnetic shielding and vibration isolation of micromodules. A new method of silicon crystal assembly using stops is proposed. The selection of materials was carried out and the resulting stresses in the connection were studied. The optimal data with minimum stress concentration factors to ensure materials strength and function has been identified, which has allowed increasing connections endurance under the influence of thermomechanical cycling. Based on the developed finite element models of materials, including computational ones, as well as nodes of the functional micromodule and the principles of their use, the analysis of stress-strain state, thermal processes, effectiveness of electromagnetic shielding, methods of protection against vibration and shock, strength and durability calculations was carried out, which has allowed the selection of rational materials, assembly and mounting methods, and elements and connections design.

Keywords: functional micromodule, 3D assembly, microconnection materials, thermomechanical strength, stress-strain state, simulation, engineering and technological recommendations, shield against external effects

For citation: Titov A. Yu., Pogalov A. I., Timoshenkov S. P. Research of engineering and technological specifics of the 3D assembly and mounting of a functional micromodule. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 281–289. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-281-289. – EDN: ACQCCF.

Введение. С учетом сохранения требований к уменьшению массогабаритных характеристик устройств необходимы новые технологии создания функциональных микромодулей. Существующие гибкие платы не имеют альтернативы, когда нужно обеспечить максимальную плотность коммутации, а также при пространственной сборке и монтаже микромодулей.

В настоящей работе рассматривается функциональный микромодуль, собранный на теплоотводящем основании и представляющий собой коммутационную плату со смонтированными на ней бескорпусными элементами [1]. Коммутационная плата выполнена в виде гибкой ленты с перфорацией для герметизации и фиксации бескорпусных элементов, основание снабжено пазами для размещения и герметизации бескорпусных элементов. Перфорация на ленте – матрица в виде одинаковых по форме квадратных окон.

Методы исследования. Цель моделирования – поиск способов повышения прочности без увеличения массы изделия. Проектирование конструкции изделия представляет собой сложный и многоступенчатый процесс определения оптимальных конструкторских, технологических, эксплуатационных параметров при заданной нагрузке и условиях эксплуатации.

При построении моделей прочности и материалов использовали единый подход и правила, принципы разработки и анализа результатов исследования. Проводили испытания по определению механических свойств материалов, соединений и узлов функционального микромодуля, а также их динамических свойств. Для учета рассеяния энергии колебаний применяли логарифмический декремент и коэффициент демпфирования. Использовали достоверную информацию об уровне внешних механических и температурных воздействий.

Для распределения слоя компаунда между лентой и бескорпусным элементом выполняли окна с перфорацией, что предупреждает деформации, минимизирует поверхностные напряжения и повышает функциональные возможности микромодуля. Герметизацию каждого бескорпусного элемента осуществляли через перфорацию с окнами на ленте с помощью эластичного низкомодульного компаунда с модулем упругости 20–40 МПа. В случае увеличения значения модуля упругости снижается выносливость соединений, в несколько раз ухудшаются динамические и демпфирующие характеристики. Такая конструкция обеспечивает не только хорошее совмещение, но и наибольшую прочность соединения гибкой коммутационной платы с поверхностью кристалла при герметизации СБИС. Прочность конструкции повышается за счет улучшения адгезионного соединения коммутационной платы с поверхностью кристалла. Разработанная конструкция придает жесткость коммутационной плате, обеспечивает совмещение защитного покрытия и устраняет его коробление [2–4]. Размер герметизирующего соединения бескорпусного элемента определяется размером микровыводов и составляет ~ 100 мкм. Когезионная прочность соединения при увеличении его толщины снижается в 3,5 раза.

На рис. 1 представлена схема размещения бескорпусного элемента функционального микромодуля. Бескорпусной элемент с микровыводами расположен на гибкой ком-

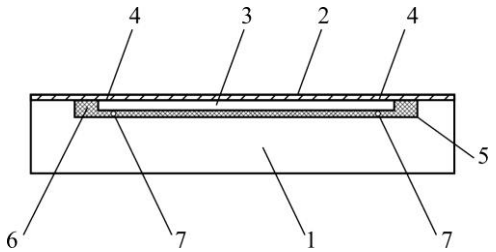


Рис. 1. Схема размещения бескорпусного элемента: 1 – теплоотводящее основание; 2 – гибкая коммутационная плата; 3 – бескорпусной элемент; 4 – микровыводы; 5 – паз; 6 – компаунд; 7 – шары

Fig. 1. Layout of the uncased element: 1 – heat sink base; 2 – flexible switching board; 3 – uncased element; 4 – micro-leads; 5 – groove; 6 – compound; 7 – balls

мутационной плате. В теплоотводящем основании выполнен паз, который заполняют шарами и компаундом в процессе сборки модуля.

Результаты и их обсуждение. На каждом бескорпусном элементе с лицевой стороны сформированы микровыводы размером ~ 100 мкм, выполняющие функцию не только электрического контакта, но и дополнительного упора между лентой и бескорпусным элементом. В результате расчетов для данной конструкции определены оптимальные размеры микровыводов, равные 70 мкм. При таком размере достигается наибольшая прочность соединения. При увеличении размера соединения до 200 мкм и более прочность уменьшается в 3 раза.

Надежность соединений кристалла с гибким носителем обусловлена напряженно-деформированным состоянием сборки, физико-химической совместимостью и механической прочностью ее материалов [5]. Исходя из того, что в модуле необходимо обеспечить повышенную функциональную сложность с повышенной надежностью сборки, а также с учетом уменьшения массогабаритных характеристик сборки обоснован выбор и проведены расчеты жесткости и прочности материалов конструкции, включая технологический процесс изготовления функционального микромодуля. Паяный шов сборки (эквивалентные механические напряжения) представлен на рис. 2.

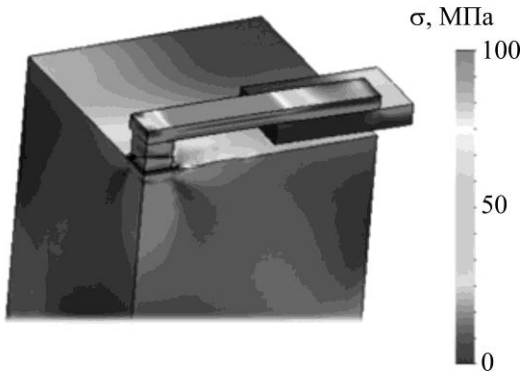


Рис. 2. Эквивалентные механические напряжения в паяном соединении
Fig. 2. Equivalent mechanical stresses in the solder joint

Для областей, в которых возможны высокие градиенты механических напряжений и температур, использовали неравномерную сетку конечных элементов. Моделирование и расчет напряженно-деформированного состояния материалов позволили установить наиболее значимые конструктивно-технологические факторы прочности функционального микромодуля. Для моделирования применяли материалы, которые могут оказывать влияние на термомеханическую прочность микромодулей, – легкоплавкие припои ПОС 61, ПОВи, ПОЦ с площадью паяного соединения от 50 до 80 мкм^2. Из результатов анализа механических напряжений и деформаций в материалах модели следует, что при температуре выше 80 °С механические напряжения в образце неравномерны по плоскости и по толщине слоев. Распределения механических напряжений в слоях имеют форму параболы, и максимальные значения напряжений находятся на краях и углах слоев. Характер конечных элементов разбиения показан на рис. 3.

Критическая нагрузка расположена на границе контактная площадка – кремний и кремний – клеевое соединение. Интенсивность нагрузки на контактной площадке при применении разных припоев составляет 250–260 МПа, и эпюра по высоте близка к постоянной. Для повышения выносливости соединений при циклических термомеханических воздействиях необходимо равномерное распределение механических напряжений по всей площади соединений и уменьшение их концентрации. Это позволит обеспечить прочность и нормальное функционирование материалов. При сборке использовали следующие компоновочные решения: уменьшение габаритов, увеличение плотности компоновки, выбор рациональных соотношений форм и размеров деталей и зазоров, совмещение нескольких функций в одной детали. Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5.

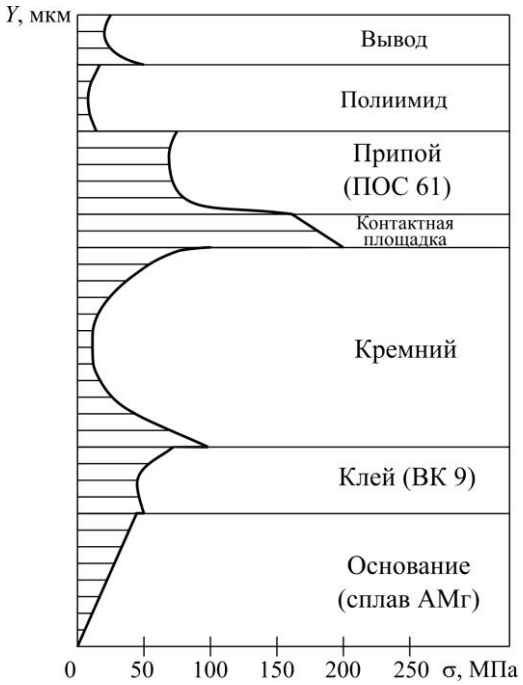


Рис. 3. Эпюра распределения эквивалентных механических напряжений в материалах функционального микромодуля
Fig. 3. Distribution diagram of equivalent mechanical stresses in the materials of the functional micromodule

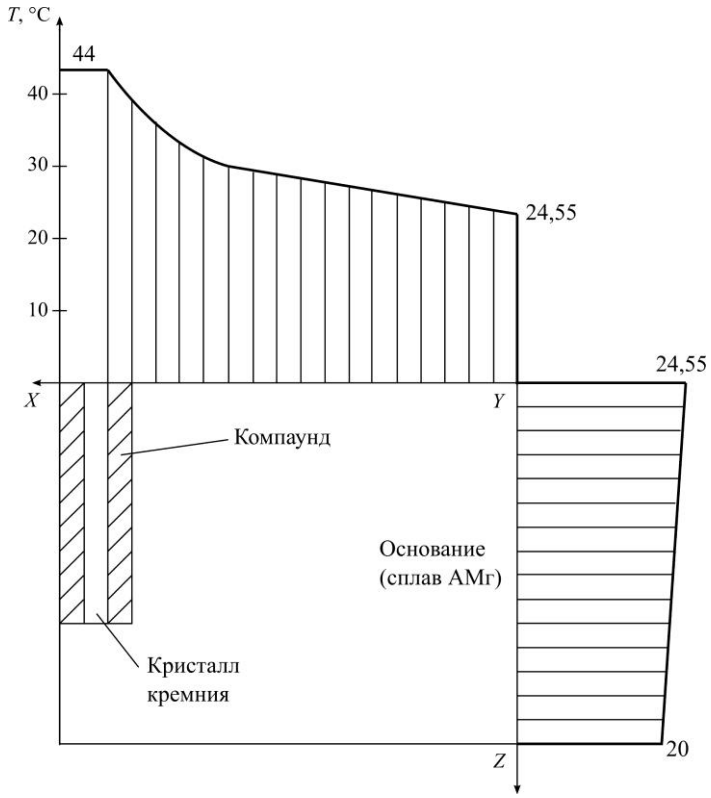


Рис. 4. Распределение температуры нагрева материалов по центральной горизонтальной оси *X* и вертикальной оси *Z* микромодуля
Fig. 4. Distribution of material heating temperature along the central horizontal *X* axis and vertical *Z* axis of the micromodule

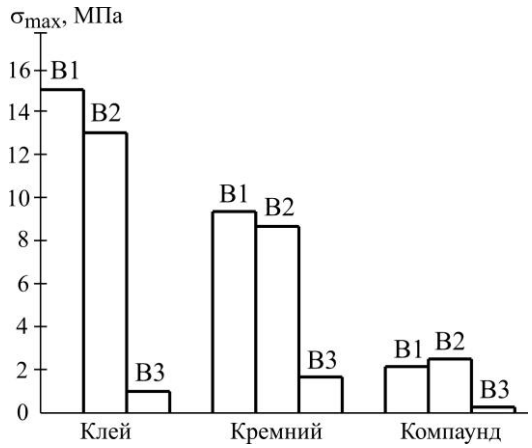


Рис. 5. Максимальные механические напряжения для трех вариантов моделей: В1, В2 – клеевой шов (клей ВК 9) – компаунд СИЭЛТ; В3 – клеевой шов (компаунд СИЭЛТ) и компаунд СИЭЛТ. Толщина клеевого шва и шва компаунда 0,05–0,2 мм, толщина кристалла кремния 0,46 мм

Fig. 5. Maximum mechanical stresses in adhesive, silicon and compound for three model variants: B1, B2 – adhesive seam (VK 9 glue) – CIELT compound; B3 – adhesive seam (CIELT compound) and CIELT compound. The thickness of the adhesive seam and the compound seam is 0.05–0.2 mm, the thickness of the silicon crystal is 0.46 mm

На рис. 4 приведены поля распределения механических напряжений в материалах соединения. Оптимальная толщина соединительного шва компаунда 50–70 мкм, при этом тепловое сопротивление составляет от 0,6 К/Вт. Механические напряжения в сборке для трех вариантов моделей проиллюстрированы на рис. 5.

На основании ранее проведенных исследований [6–9] установлено влияние конструктивно-технологических параметров на рациональную толщину клеевого шва, которая составляет ~ 100 мкм. При толщине клея 500 мкм механические напряжения в кремнии повысились на 20 %, их концентрация возросла на 10 %. Рациональная толщина медного проводника составляет 20 мкм, что приводит к снижению напряжений в меди на 10 %. Увеличение площади пайки от 50 до 80 мкм^2 позволяет снизить механические напряжения в медном проводнике от 57 до 47 МПа (на 20 %). Наилучшие результаты достигнуты при использовании бессвинцового припоя ПОВи, что дает возможность снизить действующие механические напряжения в паяном соединении в 1,5–2,2 раза и концентрацию напряжений на 15 %. В процессе эксплуатации на функциональный микромодуль воздействуют вибрационные и ударные нагрузки в диапазонах частот до 5000 Гц, ускорений до 100 g и температур от –60 до +70 °С. Одна из наиболее эффективных мер контроля динамических характеристик функционального микромодуля – использование виброизоляции от источника внешних возмущений.

Проведены исследования динамических свойств нескольких типов виброизоляторов (силиконовая резина ИРП, полиуретан СКУ, стальная плетеная проволока ЭИ-816, резина СКИ) с различными геометрическими и технологическими параметрами. При проведении расчетов [4, 6] в качестве виброизолятора использовали резину СКИ диаметром 6 мм, толщиной 4 мм. Типовая амплитудно-частотная характеристика такого функционального микромодуля показана на рис. 6. Расчеты показали, что резонансная частота f_0 составляет 16 Гц, коэффициент динамичности $k_д = f(\nu,\xi)$ не превышает 2,0. Ослабление вибраций наблюдается при коэффициенте расстройки $\nu = f/f_0 > \sqrt{2}$ при частотах возбуждения $f > 25$ Гц. При $\nu = 5$ и коэффициенте динамичности $k_д = 0{,}04$ происходит ослабление колебаний на порядок.

Функциональный микромодуль содержит теплоотводящее основание для размещения в нем кристаллов, а также служит для экранирования от наводок между микросхемами, входящими в состав микромодуля, и от внешних воздействий. Для экранирования кристаллов от электромагнитных воздействий разработан медный экран из фольгированной полиимидной пленки размером 15 × 15 мм и толщиной 0,1 мм, которая крепится на основание. На рис. 7 приведена зависимость эффективности экранирования

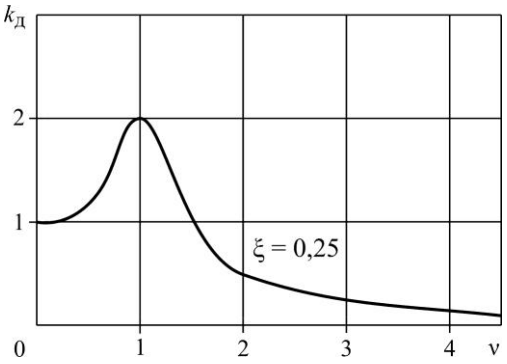


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика функционального микромодуля
Fig. 6. Amplitude-frequency response of the functional micromodule

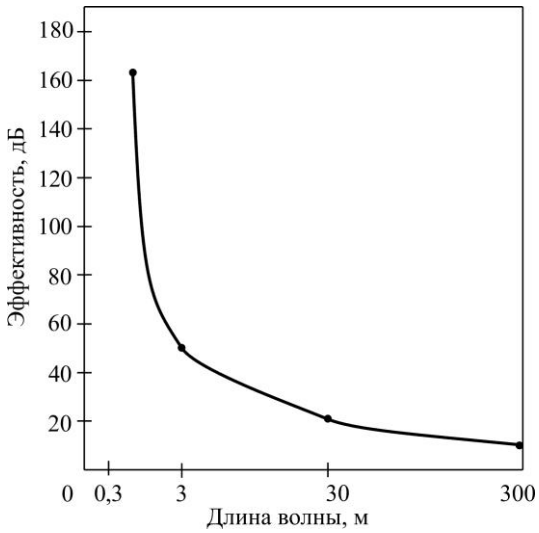


Рис. 7. Эффективность экранирования медного плоского экрана в радиотехническом диапазоне волн
Fig. 7. Shielding effectiveness of the copper flat screen in the radio wave range

экрана толщиной 0,1 мм в диапазоне волн λ = 0,3–300 м (f = 1 ГГц–1 МГц). Из результатов анализа следует, что при использовании кристаллов СВЧ-диапазона необходимо увеличить его толщину или комбинировать слои.

Подключение основания функционального микромодуля к цепи «земля» микроэлектронной аппаратуры посредством прямого контактирования (через свободные грани основания) позволит снизить влияние электромагнитной совместимости на сборку.

Заключение. Исследования показали, что разработанные технологические процессы сборки и монтажа бескорпусных микросхем на кубическое основание для создания функционального микромодуля с защитой от внешних воздействий обеспечивают эффективный отвод тепла, электромагнитное экранирование, виброизоляцию, рациональное использование прочности и жесткости материалов, элементов и соединений конструкции. Предложенный способ сборки кремниевых кристаллов как на полиимидной пленке, так и в пазах основания с использованием калиброванных упоров на лицевой и обратной сторонах позволяет сформировать соединительный шов требуемой толщины из эластичного низкомодульного компаунда, обеспечивающего необходимое демпфирование, эффективный сток тепла от кристаллов, снижение значений и концентраций напряжений, а также деформаций в материалах сборки [10].

Разработанные аналитические (конечно-элементные и расчетные) модели материалов, соединений и узлов функционального микромодуля, принципы их использования и проведенный анализ напряженно-деформированного состояния, тепловых процессов, эффективности электромагнитного экранирования, способов защиты от вибрации и ударов, расчета прочности и долговечности позволили выбрать оптимальные материалы, конструкцию элементов и соединений, определить рациональные способы сборки и монтажа.

Литература

1. ***Погалов А. И., Титов А. Ю., Долговых Ю. Г.*** Проектирование и инженерный расчет тепловых и прочностных характеристик функционального микромодуля // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2020. № 2 (178). С. 49–52. https://doi.org/10.7868/S2410993220020074. – EDN: OXUSNQ.

2. ***Кузнецов О. А., Погалов А. И., Сергеев В. С.*** Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1990. 144 с.

3. Справочник по пайке / под ред. ***И. Е. Петрунина***. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.

4. Неметаллические конструкционные материалы / ***Ю. В. Антипов, П. Г. Бабаевский, Ф. Я. Бородай и др.***; ред.-сост. А. А. Кульков. М.: Машиностроение, 2005. 463 с. (Машиностроение: энциклопедия в 40 т. / гл. ред. К. В. Фролов; т. II-4).

5. ***Погалов А. И., Грушевский А. М., Блинов Г. А., Титов А. Ю.*** Термомеханическая прочность материалов паяных соединений многокристальных модулей памяти // Изв. вузов. Электроника. 2009. № 6 (80). С. 3–7. EDN: KZIDAN.

6. ***Титов А. Ю., Погалов А. И., Угольников С. В., Сахаров Е. А.*** Исследование динамических характеристик виброизоляции функционального модуля // Интеллектуальные системы и микросистемная техника: сб. тр. науч.-практ. конф. (пос. Эльбрус, 01–07 февр. 2022). М.: МИЭТ, 2022. С. 156–159. EDN: XRFTJY.

7. ***Погалов А. И., Титов А. Ю., Тимошенков С. П.*** Термомеханическая прочность соединений элементов в микроэлектронных модулях // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 6. С. 565–572. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-6-565-572. – EDN: XBGUVG.

8. ***Pogalov A. I., Titov A. Yu., Timoshenkov S. P.*** Thermomechanical strength of element connections in microelectronic modules // Russ. Microelectron. 2020. Vol. 49. Iss. 7. P. 489–493. https://doi.org/10.1134/S1063739720070082

9. ***Титов А. Ю., Погалов А. И., Тимошенков С. П.*** Монтаж микроэлектронного модуля по бессвинцовой технологии на полиимидном носителе и теплопроводящем основании // Интеллектуальные системы и микросистемная техника: сб. тр. науч.-практ. конф. (пос. Эльбрус, 03–08 февр. 2020). М.: МИЭТ, 2020. С. 95–102. EDN: LFLDSI.

10. Installation of a microelectronic module according to lead-free technology on a polyimide film and a heat-conducting base / ***A. Pogalov, A. Titov, S. Ugolnikov et al.*** // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2020. P. 2153–2155. https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039008

Статья поступила в редакцию 15.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 21.11.2023 г.;
принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Титов Андрей Юрьевич – старший преподаватель Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), kisrpi@mail.ru

Погалов Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dtm@miee.ru

Тимошенков Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), spt@miee.ru

References

1. Pogalov A. I., Titov A. Yu., Dolgovykh Yu. G. Design and engineering calculation of heat and strength characteristics of a functional micromodule. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 3. Mikroelektronika = Electronic Engineering. Ser. 3. Microelectronics,* 2020, no. 2 (178), pp. 49–52. (In Russian). https://doi.org/10.7868/S2410993220020074. – EDN: OXUSNQ.

2. Kuznetsov O. A., Pogalov A. I., Sergeyev V. S. *Strength of microelectronic equipment elements.* Moscow, Radio i svyaz’ Publ., 1990. 144 p. (In Russian).

3. Petrunin I. E., ed. *Handbook of soldering.* 3rd ed., rev. and upd. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2003. 480 p. (In Russian).

4. Antipov Yu. V., Babaevskiy P. G., Boroday F. Ya. et al. *Nonmetallic structural materials*, comp. ed. A. A. Kul'kov. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2005. 463 p. (In Russian). Mechanical engineering, encyclopedia in 40 vol., chief ed. K. V. Frolov, vol. II-4.

5. Pogalov A. I., Grushevsky A. M., Blinov G. A., Titov A. Yu. Thermomechanical durability of materials for soldered connections of multicrystal modules. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2009, no. 6 (80), pp. 3–7. (In Russian). EDN: KZIDAN.

6. Titov A. Yu., Pogalov A. I., Ugolnikov S. V., Sakharov E. A. Study of the dynamic characteristics of the vibration isolation of the functional module. *Intellektual'nyye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika,* research-to-practice conference proceedings (pos. El'brus, 01–07 fevr. 2022). Moscow, MIET, 2022, p. 156–159. (In Russian). EDN: XRFTJY.

7. Pogalov A. I., Titov A. Yu., Timoshenkov S. P. Thermomechanical strength of connections of elements in microelectronic modules. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 6, pp. 565–572. (In Russian). https://doi.org/10.24151/1561-5405-2019-24-6-565-572. – EDN: XBGUVG.

8. Pogalov A. I., Titov A. Yu., Timoshenkov S. P. Thermomechanical strength of element connections in microelectronic modules. *Russ. Microelectron.*, 2020, vol. 49, iss. 7, pp. 489–493. https://doi.org/10.1134/S1063739720070082

9. Titov A. Yu., Pogalov A. I., Timoshenkov S. P. Installation of a microelectronic module using lead-free technology on a polyimide film and a heat-conducting base. *Intellektual'nyye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika*, research-to-practice conference proceedings (pos. El'brus, 03–08 fevr. 2020). Moscow, MIET, 2020, pp. 95–102. (In Russian). EDN: LFLDSI.

10. Pogalov A., Titov A., Ugolnikov S., Garbuzova M., Pshenichnova M. Installation of a microelectronic module according to lead-free technology on a polyimide film and a heat-conducting base. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus).* St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2020, pp. 2153–2155. https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039008

The article was submitted 15.08.2023; approved after reviewing 21.11.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Andrei Yu. Titov – Senior Lecturer of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kisrpi@mail.ru

Anatoly I. Pogalov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dtm@miee.ru

Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), spt@miee.ru

Уважаемые авторы!

С правилами оформления и опубликования научных статей можно ознакомиться на нашем сайте:
http://ivuz-e.ru

Научная статья
УДК 621.359.3
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-290-299
EDN: AFDOSW

Формирование композитных слоев TiO_2-ZnO с повышенной фоточувствительностью методом электрофоретического осаждения

К. И. Пак[1], Л. И. Сорокина[1], А. В. Кузьмин[1], Р. М. Рязанов[2], Е. П. Кицюк[2], С. В. Дубков[1], Д. Г. Громов[1,3]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия
[3]Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Минздрава России, г. Москва, Россия

8191272@edu.miet.ru

Аннотация. Повышение фоточувствительности диоксида титана TiO_2 за счет смещения спектра поглощения в длинноволновую область солнечного спектра является актуальной задачей. Решение данной проблемы возможно благодаря модифицированию TiO_2, например, с помощью создания гетероструктур с другим полупроводниковым материалом. В работе представлена разработка методики формирования фоточувствительных композитных слоев TiO_2-ZnO электрофоретическим осаждением. Приведены результаты изучения фоточувствительности образцов TiO_2 и TiO_2-ZnO на кремниевой подложке, покрытой углеродными нанотрубками. Формирование композитных слоев TiO_2-ZnO методом электрофоретического осаждения проведено с использованием стабилизирующих добавок: лаурилсульфата натрия и гидроксипропилцеллюлозы. В результате получены слои композитного материала TiO_2-ZnO / углеродные нанотрубки, морфология которых изучена методом растровой электронной спектроскопии. Установлено, что добавление 50 масс. % оксида цинка ZnO в суспензию обеспечивает формирование композитного материала TiO_2-ZnO с содержанием ZnO 30 масс. %. Исследование фоточувствительности полученного слоя методом хроноамперометрии показало увеличение генерируемого фототока в пять раз при использовании полного спектра ксеноновой лампы по сравнению с аналогичной структурой на основе коммерческого TiO_2 P25.

Ключевые слова: диоксид титана, оксид цинка, электрофоретическое осаждение, фоточувствительные материалы

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-19-00654).

Для цитирования: Формирование композитных слоев TiO_2-ZnO с повышенной фоточувствительностью методом электрофоретического осаждения / К. И. Пак, Л. И. Сорокина, А. В. Кузьмин и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 290–299. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-290-299. – EDN: AFDOSW.

© К. И. Пак, Л. И. Сорокина, А. В. Кузьмин, Р. М. Рязанов, Е. П. Кицюк, С. В. Дубков, Д. Г. Громов, 2024

Original article

Formation of composite TiO_2-ZnO layers with increased photosensitivity by electrophoretic deposition

K. I. Pak[1], L. I. Sorokina[1], A. V. Kuzmin[1], R. M. Ryazanov[2], E. P. Kitsyuk[2], S. V. Dubkov[1], D. G. Gromov[1,3]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]SMC "Technological Centre", Moscow, Russia
[3]I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

8191272@edu.miet.ru

Abstract. Enhancing the photosensitivity of titanium dioxide TiO_2 by shifting the absorption spectrum to the long-wave region of the solar spectrum is a critical task. Solution to this problem is possible through the modification of TiO_2, e. g. by formation of heterostructures with another semiconductor material. In this work, the development of a technique for the formation of photoactive TiO_2-ZnO composite layers using electrophoretic deposition is presented. The results of studying the photosensitivity of TiO_2 and TiO_2-ZnO samples on a silicon substrate coated with carbon nanotubes are given. The formation of TiO_2-ZnO composite layers by electrophoretic deposition was carried out using stabilizing additives: sodium lauryl sulfate and hydroxypropylcellulose. As a result the layers of TiO_2-ZnO/carbon nanotubes composite material were obtained; their morphology was studied by SEM. It was demonstrated that the addition of 50 wt. % zinc oxide ZnO to the suspension provides the formation of TiO_2-ZnO composite material with ZnO content of 30 wt. %. The study of obtained layer's photosensitivity by chronoamperometry has shown an increase in the generated photocurrent by 5 times when using the full spectrum of a xenon lamp in comparison with a similar structure based on commercial TiO_2 P25.

Keywords: titanium dioxide TiO2, zinc oxide ZnO, electrophoretic deposition, photosensitive materials

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-19-00654).

For citation: Pak K. I., Sorokina L. I., Kuzmin A. V., Ryazanov R. M., Kitsyuk E. P., Dubkov S. V., Gromov D. G. Formation of composite TiO_2-ZnO layers with increased photosensitivity by electrophoretic deposition. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 290–299. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-290-299. – EDN: AFDOSW.

Введение. Необходимость уменьшения антропогенных загрязнений окружающей среды и выбросов углекислого газа обусловливает создание «зеленых» технологий [1]. Одно из направлений развития таких технологий – разработка новых фоточувствительных материалов [2], которые могут быть использованы для производства самоочищающихся поверхностей [3], сенсоров [4], солнечных элементов [5], а также для разложения органических загрязнителей [6] и генерации водорода [7]. Фоточувстви-

тельные материалы применяются в альтернативной энергетике [8], позволяющей уменьшить использование традиционной энергетики или полностью ее заменить.

Один из традиционных фоточувствительных материалов – диоксид титана TiO_2. Он характеризуется высокой химической стабильностью, высокой фоточувствительностью, нетоксичностью [9]. Однако ввиду того, что TiO_2 поглощает только УФ-излучение (ширина запрещенной зоны 3,0–3,2 эВ в зависимости от модификации) [10], которое составляет примерно 5–8 % от естественного света, его эффективность как фоточувствительного материала при использовании солнечного света невысока. Для повышения фоточувствительности диоксида титана используют порошок TiO_2 P25, состоящий из 80 % анатаза и 20 % рутила [10]. Порошок широко используется в промышленности благодаря уменьшению рекомбинации электронно-дырочных пар и наличию смешанных фаз [11]. Для повышения эффективности TiO_2 проводят его модификацию, например, оксидами металлов. В таких композитах эффективность повышается в основном за счет гетероперехода [12]. К применяемым оксидам металлов относится оксид цинка ZnO, имеющий хорошую фоточувствительность, большую энергию связи экситона (60 мВ) и широкую запрещенную зону [13, 14].

В работах [15, 16] приводится информация о повышении фотокаталитической активности композиционных слоев TiO_2-ZnO по сравнению с чистыми слоями TiO_2 и ZnO. Дополнительно повысить эффективность фотокаталитических реакций можно, создав гетероструктуру фотокатализатора с углеродными нанотрубками (УНТ) [17–19]. УНТ имеют широкий спектр поглощения и могут служить эффективными ловушками для фотогенерированных электронов из TiO_2 и ZnO [20], что снижает рекомбинацию пар электрон – дырка и повышает вероятность фотокаталитических реакций. В работе [21] представлен результат повышенной фотокаталитической активности композиционных слоев TiO_2/УНТ, сформированных методом электрофоретического осаждения (ЭФО).

В настоящей работе исследуются гетероструктуры TiO_2-ZnO/УНТ и TiO_2/УНТ и разрабатывается простая методика формирования композиционных слоев TiO_2-ZnO методом ЭФО с управляемым составом для повышения фоточувствительности слоев на основе TiO_2.

Эксперимент. Для изготовления суспензии использовали изопропиловый спирт в качестве растворителя, нанопорошки TiO_2 P25 (Evonik) с размером частиц 25 нм, ZnO (Sigma-Aldrich) с размером частиц менее 100 нм и стабилизирующие добавки лаурилсульфата натрия (ЛСН) и гидроксипропилцеллюлозы (ГПЦ). Загрузка нанопорошков составляла 1 г/л во всех случаях. Суспензию обрабатывали с помощью погружного ультразвукового диспергатора УЗТА-0,1/28-О мощностью 100 Вт в течение 1 ч. ЭФО проводили в потенциостатическом режиме в электрофоретической ячейке, состоящей из источника тока KEYSIGHT B2912A, емкости с суспензией и электродов. Методика формирования слоев TiO_2 разработана и подробно описана в работе [22]. Осаждение TiO_2 проводили из суспензии на основе изопропилового спирта с добавлением ЛСН (0,1 мг ЛСН на 1 мг TiO_2).

Для разработки методики осаждения TiO_2-ZnO провели серию экспериментов ЭФО на подложке из нержавеющей стали. Подложки предварительно обработали в ультразвуковой ванне в ацетоне и деионизованной воде, после чего протравили в растворе $HF:NO_3:H_2O$ (1 % HF, 13 % HNO_3) при температуре 60 °C в течение 15 мин. Далее подложки промывали в деионизованной воде и сушили в парах изопропилового спирта.

Для исследования фоточувствительности образцов сформировали слои площадью 1,75 $см^2$ на подложках из монокристаллического кремния типа КЭФ-4,5, покрытых

УНТ. Синтез УНТ [23] проводили на установке PlasmaLabSystem 100 (Oxford Instruments, Великобритания) методом плазмостимулированного химического парофазного осаждения. В качестве противоэлектродов использовали фольгу из нержавеющей стали. Полученные образцы отжигали при температуре 300 °С в воздушной атмосфере 1 ч. Морфологию и состав слоя исследовали на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6010 Plus/LA (Япония) с приставкой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Съемку образцов проводили в режиме регистрации вторичных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ при увеличении 1000× и 7500×.

Для измерения фототока в полном спектре применяли комплекс для фотоэлектрохимических исследований SCS10-PEC-PRO компании Zolix (Китай), включающий в себя электрохимическую ячейку объемом 150 мл с электродом сравнения AgCl/Ag и платиновым электродом. В качестве источника света использовали ксеноновую лампу мощностью 500 Вт. Мощность падающего излучения на поверхность образца составляла порядка 100 мВт/см^2. В качестве электролита использовали 0,1 М водного раствора Na_2SO_4.

Результаты и их обсуждение. Зарядные и диспергирующие добавки при использовании технологии ЭФО обеспечивают высокую электрофоретическую подвижность частиц и воспроизводимость процесса за счет хорошей стабильности суспензии. Для разработки состава суспензии с TiO_2-ZnO проводили седиментационный анализ суспензий с различными стабилизирующими добавками и исследовали влияние количества добавок на скорость ЭФО. На рис. 1 представлены фотографии суспензий с TiO_2-ZnO объемом 25 мл со стабилизирующими добавками и без них.

В суспензии без стабилизирующих добавок частицы остаются во взвешенном состоянии долгое время (рис. 1, *а*), однако процесса ЭФО не происходит. Седиментационный анализ показывает, что суспензия с содержанием только ЛСН оседает спустя 30 мин и является не пригодной для проведения процесса ЭФО (рис. 1, *б*). При добавлении только ГПЦ суспензия наиболее стабильная, однако частицы электрофоретически не осаждаются из-за недостаточного поверхностного заряда (рис. 1, *в*). Суспензия с ЛСН и ГПЦ остается стабильной более 2 ч (рис. 1, *г*), и частицы TiO_2-ZnO электрофоретически осаждаются. Таким образом, сочетая ЛСН и ГПЦ, можно добиться повышения стабильности суспензии и поверхностного заряда частицы. Также установлено, что повышение концентрации ГПЦ приводит к повышению устойчивости суспензии, но в то же время уменьшается скорость ЭФО. Соотношение 0,04 мг ГПЦ на 1 мг TiO_2-ZnO поддерживает необходимый баланс и выбрано в качестве оптимального. Для установления оптимального соотношения ЛСН проводили серию экспе-

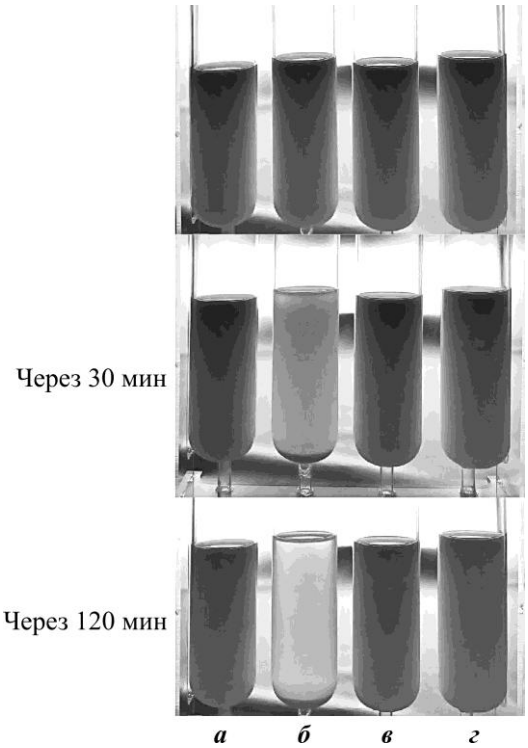


Рис. 1. Суспензии без добавок (*а*), с добавками ЛСН (*б*), ГПЦ (*в*), ГПЦ + ЛСН (*г*)
Fig. 1. Suspensions without additives (*a*), with SLS (*b*), HPC (*c*), HPC + SLS (*d*)

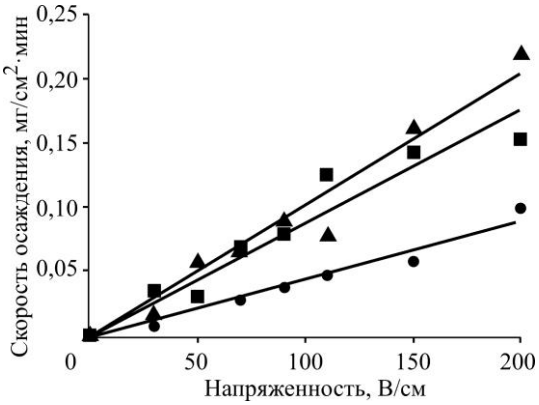


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения частиц от напряженности электрического поля при разных содержаниях ЛСН (• – 0,08 мг; ■ – 0,12 мг; ▲ – 0,16 мг) с добавлением 0,04 мг ГПЦ на 1 мг TiO_2-ZnO

Fig. 2. Dependence of the particle deposition rate on the electric field strength at different contents of SLS (• – 0.08 mg; ■ – 0.12 mg; ▲ – 0.16 mg) with the addition of 0.04 mg of HPC per 1 mg of TiO_2-ZnO

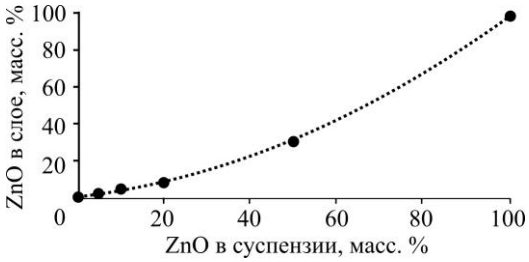


Рис. 3. Зависимость содержания ZnO в слое от содержания ZnO в суспензии

Fig. 3. Dependence of the content of ZnO in the layer on the content of ZnO in suspension

риментов ЭФО при одинаковом содержании ГПЦ 0,04 мг на 1 мг TiO_2-ZnO и разных содержаниях ЛСН (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что с ростом напряженности электрического поля скорость осаждения частиц возрастает линейно во всех случаях. С увеличением содержания ЛСН в суспензии скорость осаждения возрастает, однако перестает увеличиваться выше некоторого значения. Высокая скорость осаждения и минимальное количество примесей предпочтительны. Скорость осаждения при добавлении 0,12 мг и 0,16 мг ЛСН на 1 мг TiO_2-ZnO примерно одинаковая. Следовательно, оптимальным соотношением ЛСН и ГПЦ в суспензии является 0,12 мг ЛСН и 0,04 мг ГПЦ на 1 мг TiO_2-ZnO.

Методом ЭФО можно получать слои с определенным составом. Проведена серия экспериментов ЭФО из суспензий с разным массовым соотношением ZnO. Полученные слои исследовали методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. На рис. 3 приведена зависимость содержания ZnO в слое от содержания ZnO в суспензии. На основе данных рис. 3 можно прогнозировать состав композитов. Как видно, содержание ZnO в слое изменяется нелинейно в зависимости от содержания ZnO в суспензии. Это указывает на следующее: электрофоретическая подвижность частиц ZnO ниже, чем у TiO_2. По результатам данных исследований в качестве контрольного образца для изучения фоточувствительности выбран состав суспензии с 50 масс. % ZnO, что обеспечило формирование композитного слоя с содержанием ZnO 30 масс. %.

На рис. 4 представлены РЭМ-изображения морфологии и профилей полученных образцов – слоев TiO_2 и TiO_2-ZnO с удельной массой 0,15 мг/см^2 на кремниевых подложках с выращенным на них массивом УНТ. При удельной массе 0,15 мг/см^2 слой не сплошной (рис. 4, *а*, *б*). Это важно для фотокаталитических приложений: непокрытые области УНТ будут активно участвовать при поглощении света и организации сепарированных областей окислительных и восстановительных реакций. Толщина слоев составила ~ 0,8 мкм, а общая толщина слоев с УНТ – около 2 мкм (см. рис. 4, *в*, *г*).

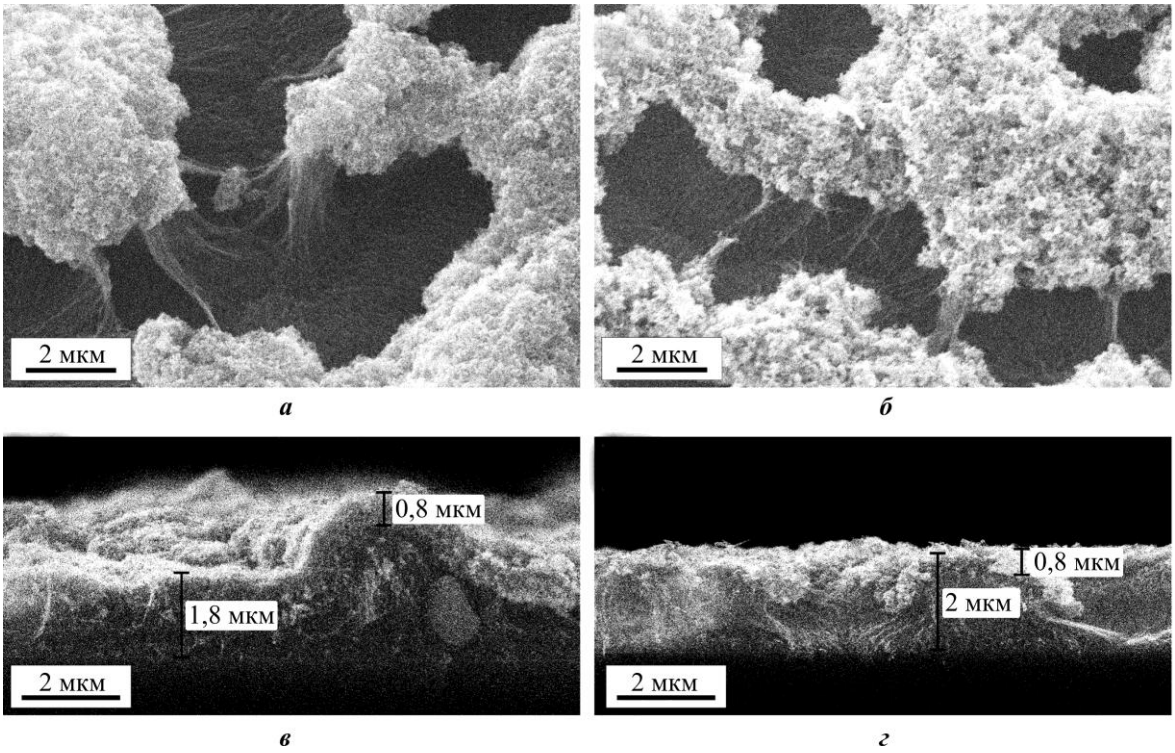


Рис. 4. РЭМ-изображения поверхности слоев TiO_2 (*а*), TiO_2-ZnO (*б*) и профилей TiO_2 (*в*), TiO_2-ZnO (*г*) с удельной массой 0,15 мг/см^2

Fig. 4. SEM images of the surface of the TiO_2 (*a*), TiO_2-ZnO (*b*) layers and the profiles of TiO_2 (*c*), TiO_2-ZnO (*d*) with a specific gravity of 0.15 mg/cm^2

На рис. 5 показаны результаты исследования фототоков сформированных структур TiO_2/УНТ и TiO_2-ZnO/УНТ. Исследования проводили в потенциостатическом режиме при нулевом напряжении относительно AgCl/Cl (3 М).

Из рис. 5 видно, что отдельно подложка Si + УНТ не генерирует фототок при освещении в отличие от образцов с TiO_2 и TiO_2-ZnO. В то же время при включении света появляется фототок на образцах со слоями TiO_2 и TiO_2-ZnO, а при выключении он исчезает. Фототок определяли по разности плотностей тока при освещении и без него. Плотность тока, отличная от нуля, в электрохимической ячейке связана с протекающими окислительно-восстановительными реакциями на поверхности электродов. При этом значение фототока для TiO_2 составило примерно 2 мкА/см^2, а для TiO_2-ZnO – 10 мкА/см^2. Токовая чувствительность образца TiO_2 и TiO_2-ZnO составила порядка $2\cdot10^{-5}$ и $1\cdot10^{-4}$ А/Вт соответственно. Таким образом, добавление 30 масс. % ZnO повышает токовую чувствительность и фоточувствительность в пять

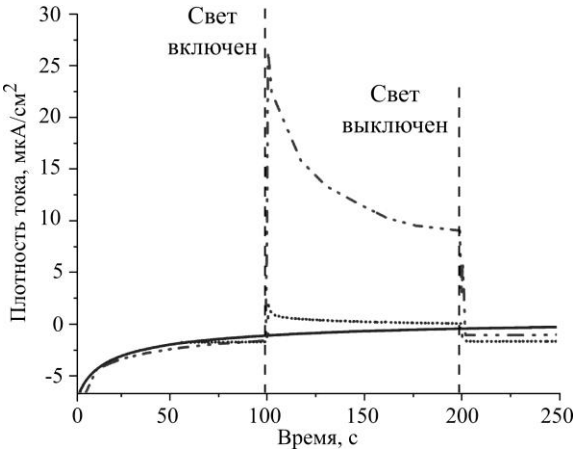


Рис. 5. Плотность тока слоев TiO_2, TiO_2-ZnO в зависимости от времени освещения полным спектром: —— Si + УНТ; – · · – TiO_2-ZnO; · · · · TiO_2

Fig. 5. Current density of TiO_2, TiO_2-ZnO layers depending on the full spectrum illumination time: —— Si + CNT; – · · – TiO_2-ZnO; · · · · TiO_2

раз. Это говорит об улучшенном разделении и переносе фотогенерированных электронно-дырочных пар благодаря образованию гетероперехода TiO_2-ZnO. Данный эффект также продемонстрирован в работе [15]. Следовательно, рассмотренный подход формирования гетероструктурной системы TiO_2-ZnO/УНТ позволяет добиться повышения фоточувствительности по сравнению с аналогичной структурой на основе TiO_2/УНТ и является перспективным для фотокаталитических приложений.

Заключение. С помощью разработанной методики формирования композитных фоточувствительных слоев TiO_2-ZnO с разным соотношением с использованием ЭФО на проводящей подложке со стабилизирующими добавками выявлено следующее. Добавление ГПЦ повышает стабильность суспензии, а ЛСН увеличивает поверхностный заряд частицы. Зависимость содержания ZnO в слое TiO_2-ZnO от его содержания в суспензии позволяет управлять составом осаждаемого слоя композиционного материала. Гетероструктурная система TiO_2-ZnO/УНТ продемонстрировала увеличение фоточувствительности в пять раз по сравнению с аналогичной структурой на основе TiO_2.

Литература

1. Advancement of renewable energy technologies via artificial and microalgae photosynthesis / ***Y. Xie, K. Sh. Khoo, K. W. Chew et al.*** // Bioresour. Technol. 2022. Vol. 363. Art. ID: 127830. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127830

2. ***Nuraje N.*** Photoactive nanomaterials // Nanomaterials. 2021. Vol. 11. Iss. 1. Art. No. 77. https://doi.org/10.3390/nano11010077

3. ***Padmanabhan N. T., John H.*** Titanium dioxide based self-cleaning smart surfaces: A short review // J. Environ. Chem. Eng. 2020. Vol. 8. Iss. 5. Art. ID: 104211. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104211

4. Review of ZnO-based nanomaterials in gas sensors / ***Y. Kang, F. Tu, L. Zhang et al.*** // Solid State Ion. 2021. Vol. 360. Art. ID: 115544. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2020.115544

5. Simple and low-cost Cu_2S/TiO_2 architecture for 3G ETA solar cell: Fabrication, characterization and their performance / ***V. S. Baviskar, D. B. Salunkhe, Ch. P. Nikam et al.*** // Nano-Structures & Nano-Objects. 2022. Vol. 32. Art. ID: 100919. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2022.100919

6. ***Shayegan Z., Lee C.-S., Haghighat F.*** TiO_2 photocatalyst for removal of volatile organic compounds in gas phase – A review // Chem. Eng. J. 2018. Vol. 334. P. 2408–2439. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.153

7. ***Juliya A. P., Abdul Mujeeb V. M., Sreenivasan K. P., Muraleedharan K.*** Enhanced H_2 evolution via photocatalytic water splitting using mesoporous TiO_2/RuO_2/CuO ternary nanomaterial // J. Photochem. Photobiol. 2021. Vol. 8. Art. ID: 100076. https://doi.org/10.1016/j.jpap.2021.100076

8. ***Michal R., Sfaelou S., Lianos P.*** Photocatalysis for renewable energy production using PhotoFuelCells // Molecules. 2014. Vol. 19. Iss. 12. P. 19732–19750. https://doi.org/10.3390/molecules191219732

9. ***Samokhvalov A.*** Hydrogen by photocatalysis with nitrogen codoped titanium dioxide // Renew. Sust. Energ. Rev. 2017. Vol. 72. P. 981–1000. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.024

10. Recent developments of TiO_2-based photocatalysis in the hydrogen evolution and photodegradation: A review / ***B. Bakbolat, Ch. Daulbayev, F. Sultanov et al.*** // Nanomaterials. 2020. Vol. 10. Iss. 9. Art. No. 1790. https://doi.org/10.3390/nano10091790

11. ***Ningthoukhongjam P., Nair R. G.*** Tuning the photocatalytic performance of Degussa P25 through phase ratio optimization // AIP Conf. Proc. 2019. Vol. 2162. Iss. 1. Art. No. 020032. https://doi.org/10.1063/1.5130242

12. ***Nolan M.*** Surface modification of TiO_2 with metal oxide nanoclusters: A route to composite photocatalytic materials // Chem. Commun. 2011. Vol. 47. Iss. 30. P. 8617–8619. https://doi.org/10.1039/C1CC13243A

13. Nanostructures of metal oxides / ***I. M. Tiginyanu, O. Lupan, V. V. Ursaki et al.*** // Comprehensive Semiconductor Science and Technology / eds P. Bhattacharya et al. Vol. 3. Amsterdam: Elsevier Science, 2011. P. 396–479. https://doi.org/10.1016/B978-0-44-453153-7.00105-X

14. Optical and photocatalytic properties of composite TiO_2/ZnO thin films / ***T. Giannakopoulou, N. Todorova, M. Giannouri et al.*** // Catal. Today. 2014. Vol. 230. P. 174–180. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.10.003

15. High-efficiency TiO_2/ZnO nanocomposites photocatalysts by sol–gel and hydrothermal methods / ***N. Bai, X. Liu, Z. Li et al.*** // J. Sol-Gel Sci. Technol. 2021. Vol. 99. Iss. 1. P. 92–100. https://doi.org/10.1007/s10971-021-05552-8

16. The TiO_2-ZnO systems with multifunctional applications in photoactive processes – Efficient photocatalyst under UV-LED light and electrode materials in DSSCs / ***A. Kubiak, S. Żółtowska, A. Bartkowiak et al.*** // Materials. 2021. Vol. 14. Iss. 20. Art. No. 6063. https://doi.org/10.3390/ma14206063

17. Synthesis and characterization of CNT/TiO_2/ZnO composites with high photocatalytic performance / ***Y. Huang, R. Li, D. Chen et al.*** // Catalysts. 2018. Vol. 8. Iss. 4. Art. No. 151. https://doi.org/10.3390/catal8040151

18. Coating porous TiO_2 films on carbon nanotubes to enhance the durability of ultrafine PtCo/CNT nanocatalysts for the oxygen reduction reaction / ***F. Cao, H. Zhang, X. Duan et al.*** // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2022. Vol. 14. Iss. 46. P. 51975–51982. https://doi.org/10.1021/acsami.2c15517

19. Carbon nanotube–TiO_2 thin films for photocatalytic applications / ***M. J. Sampaio, C. G. Silva, R. R. N. Marques et al.*** // Catalysis Today. 2011. Vol. 161. Iss. 1. P. 91–96. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.11.081

20. Recent progress on carbon-nanotube-based materials for photocatalytic applications: A review / ***J. Zhang, M. Dai, S. Zhang et al.*** // Sol. RRL. 2022. Vol. 6. Iss. 9. Art. ID: 2200243. https://doi.org/10.1002/solr.202200243

21. Development of TiO_2- and MWCNT based photocatalysts with Au and Cu clusters by electrophoretic deposition / ***L. I. Sorokina, E. A. Lebedev, S. V. Dubkov et al.*** // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 1954. Art. No. 012048. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1954/1/012048

22. The composite TiO_2–CuO_x layers formed by electrophoretic method for CO_2 gas photoreduction / ***L. I. Sorokina, A. M. Tarasov, A. I. Pepelyaeva et al.*** // Nanomaterials. 2023. Vol. 13. Iss. 14. Art. No. 2030. https://doi.org/10.3390/nano13142030

23. Influence of laser structuring and barium nitrate treatment on morphology and electrophysical characteristics of vertically aligned carbon nanotube arrays / ***A. Yu. Gerasimenko, E. P. Kitsyuk, A. V. Kuksin et al.*** // Diam. Relat. Mater. 2019. Vol. 96. P. 104–111. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.04.035

Статья поступила в редакцию 29.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 07.09.2023 г.; принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Пак Кира Игоревна – студентка Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), 8191272@edu.miet.ru

Сорокина Лариса Ивановна – инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), Larasork@gmail.com

Кузьмин Артем Валентинович – студент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), artem.zel2001@yandex.ru

Рязанов Роман Михайлович – инженер Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), младший научный сотрудник научно- исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), r.m.ryazanov@gmail.com

Кицюк Евгений Павлович – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории перспективных процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 7), kitsyuk.e@gmail.com

Дубков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sv.dubkov@gmail.com

Громов Дмитрий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), старший научный сотрудник Первого Московского государственного медицинского университета имени И. М. Сеченова Минздрава России (Россия, 119435, г. Москва, ул. Большая Пироговская, 2, стр. 4), gromadima@gmail.com

References

1. Xie Y., Khoo K. Sh., Chew K. W., Devadas V. V., Phang S. J., Lim H. R., Rajendran S., Show P. L. Advancement of renewable energy technologies via artificial and microalgae photosynthesis. *Bioresour. Technol.*, 2022, vol. 363, art. ID: 127830. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127830

2. Nuraje N. Photoactive nanomaterials. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, iss. 1, art. no. 77. https://doi.org/10.3390/nano11010077

3. Padmanabhan N. T., John H. Titanium dioxide based self-cleaning smart surfaces: A short review. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2020, vol. 8, iss. 5, art. ID: 104211. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104211

4. Kang Y., Yu F., Zhang L., Wang W., Chen L., Li Y. Review of ZnO-based nanomaterials in gas sensors. *Solid State Ion.*, 2021, vol. 360, art. ID: 115544. https://doi.org/10.1016/j.ssi.2020.115544

5. Baviskar V. S., Salunkhe D. B., Nikam Ch. P., Narkhede N. M., Jadhav Ch. D., Patil G. P., Patil R. S. Simple and low-cost Cu_2S/TiO_2 architecture for 3G ETA solar cell: Fabrication, characterization and their performance. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2022, vol. 32, art. ID: 100919. https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2022.100919

6. Shayegan Z., Lee C.-S., Haghighat F. TiO_2 photocatalyst for removal of volatile organic compounds in gas phase – A review. *Chem. Eng. J.*, 2018, vol. 334, pp. 2408–2439. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.153

7. Juliya A. P., Abdul Mujeeb V. M., Sreenivasan K. P., Muraleedharan K. Enhanced H_2 evolution via photocatalytic water splitting using mesoporous $TiO_2/RuO_2/CuO$ ternary nanomaterial. *J. Photochem. Photobiol.*, 2021, vol. 8, art. ID: 100076. https://doi.org/10.1016/j.jpap.2021.100076

8. Michal R., Sfaelou S., Lianos P. Photocatalysis for renewable energy production using PhotoFuelCells. *Molecules*, 2014, vol. 19, iss. 12, pp. 19732–19750. https://doi.org/10.3390/molecules191219732

9. Samokhvalov A. Hydrogen by photocatalysis with nitrogen codoped titanium dioxide. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2017, vol. 72, pp. 981–1000. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.024

10. Bakbolat B., Daulbayev Ch., Sultanov F., Beissenov R., Umirzakov A., Mereke A., Bekbaev A., Chuprakov I. Recent developments of TiO_2-based photocatalysis in the hydrogen evolution and photodegradation: A review. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, iss. 9, art. no. 1790. https://doi.org/10.3390/nano10091790

11. Ningthoukhongjam P., Nair R. G. Tuning the photocatalytic performance of Degussa P25 through phase ratio optimization. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2162, iss. 1, art. no. 020032. https://doi.org/10.1063/1.5130242

12. Nolan M. Surface modification of TiO_2 with metal oxide nanoclusters: a route to composite photocatalytic materials. *Chem. Commun.*, 2011, vol. 47, iss. 30, pp. 8617–8619. https://doi.org/10.1039/C1CC13243A

13. Tiginyanu I. M., Lupan O., Ursaki V. V., Chow L., Enachi M. Nanostructures of metal oxides. *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, eds P. Bhattacharya et al. Vol. 3. Amsterdam, Elsevier Science, 2011, pp. 396–479. https://doi.org/10.1016/B978-0-44-453153-7.00105-X

14. Giannakopoulou T., Todorova N., Giannouri M., Yu J., Trapalis C. Optical and photocatalytic properties of composite TiO_2/ZnO thin films. *Catal. Today*, 2014, vol. 230, pp. 174–180. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.10.003

15. Bai N., Liu X., Li Z., Ke X., Zhang K., Wu Q. High-efficiency TiO_2/ZnO nanocomposites photocatalysts by sol–gel and hydrothermal methods. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 2021, vol. 99, iss. 1, pp. 92–100. https://doi.org/10.1007/s10971-021-05552-8

16. Kubiak A., Żółtowska S., Bartkowiak A., Gabała E., Sacharczuk N., Zalas M., Siwińska-Ciesielczyk K., Jesionowski T. The TiO_2-ZnO systems with multifunctional applications in photoactive proceses – Efficient photocatalyst under UV-LED light and electrode materials in DSSCs. *Materials*, 2021, vol. 14, iss. 20, art. no. 6063. https://doi.org/10.3390/ma14206063

17. Huang Y., Li R., Chen D., Hu X., Chen P., Chen Z., Li D. Synthesis and characterization of CNT/TiO_2/ZnO composites with high photocatalytic performance. *Catalysts*, 2018, vol. 8, iss. 4, art. no. 151. https://doi.org/10.3390/catal8040151

18. Cao F., Zhang H., Duan X., Li X., Ding R., Hua K., Rui Zh., Wu Y. et al. Coating porous TiO_2 films on carbon nanotubes to enhance the durability of ultrafine PtCo/CNT nanocatalysts for the oxygen reduction reaction. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, vol. 14, iss. 46, pp. 51975–51982. https://doi.org/10.1021/acsami.2c15517

19. Sampaio M. J., Silva C. G., Marques R. R. N., Silva A. M. T., Faria J. L. Carbon nanotube–TiO_2 thin films for photocatalytic applications. *Catalysis Today*, 2011, vol. 161, iss. 1, pp. 91–96. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.11.081

20. Zhang J., Dai Ming., Zhang S., Dai Meng, Zhang P., Wang S., He Z. Recent progress on carbon-nanotube-based materials for photocatalytic applications: A review. *Sol. RRL*, 2022, vol. 6, iss. 9, art. ID: 2200243. https://doi.org/10.1002/solr.202200243

21. Sorokina L. I., Lebedev E. A., Dubkov S. V., Savitskiy A. I., Maniecki T., Kedziora A., Gromov D. G. Development of TiO_2- and MWCNT based photocatalysts with Au and Cu clusters by electrophoretic deposition. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1954, art. no. 012048. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1954/1/012048

22. Sorokina L. I., Tarasov A. M., Pepelyaeva A. I., Lazarenko P. I., Trifonov A. Yu., Savchuk T. P., Kuzmin A. V., Tregubov A. V. et al. The composite TiO_2–CuO_x layers formed by electrophoretic method for CO_2 gas photoreduction. *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, iss. 14, art. no. 2030. https://doi.org/10.3390/nano13142030

23. Gerasimenko A. Yu., Kitsyuk E. P., Kuksin A. V., Ryazanov R. M., Savitskiy A. I., Savelyev M. S., Pavlov A. A. Influence of laser structuring and barium nitrate treatment on morphology and electrophysical characteristics of vertically aligned carbon nanotube arrays. *Diam. Relat. Mater.*, 2019, vol. 96, pp. 104–111. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.04.035

The article was submitted 29.08.2023; approved after reviewing 07.09.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Kira I. Pak – Student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), 8191272@edu.miet.ru

Larisa I. Sorokina – Engineer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Larasork@gmail.com

Artyom V. Kuzmin – Student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), artem.zel2001@yandex.ru

Roman M. Ryazanov – Engineer of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Junior Scientific Researcher of the Research Laboratory of Advanced Processes, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), r.m.ryazanov@gmail.com

Evgeny P. Kitsyuk – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory of Advanced Processes, SMC "Technological Centre" (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kitsyuk.e@gmail.com

Sergey V. Dubkov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 7), sv.dubkov@gmail.com

Dmitry G. Gromov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Senior Scientific Researcher, I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Russia, 119435, Moscow Bolshaya Pirogovskaya st., 2, bld. 4), gromadima@gmail.com

Научная статья
УДК 537.872 : 621.38.049.77
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-300-309
EDN: AFPVKP

Моделирование источников рентгеновского излучения для станции фотолитографии на технологическом накопительном комплексе «Зеленоград»

Н. В. Смоляков[1], Н. В. Марченков[1], А. М. Лебедев[1], Р. Г. Чумаков[1], М. С. Гончаренко[1], Н. А. Дюжев[2]

[1]Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

smolyakovnv@mail.ru

Аннотация. При изготовлении элементной базы микроэлектроники ключевую роль играет фотолитография. Одним из критически сложных элементов фотолитографа является источник экстремального ультрафиолетового излучения. Таким источником может служить специализированный источник синхротронного излучения – технологический накопительный комплекс (ТНК) «Зеленоград», который в течение нескольких ближайших лет предполагается ввести в эксплуатацию. В работе представлены результаты численных расчетов мощности и потоков фотонов из различных источников электромагнитного излучения ТНК «Зеленоград» в контексте возможности его использования для фотолитографии. Рассмотрено синхротронное излучение из поворотных магнитов накопительного кольца ТНК «Зеленоград» при двух значениях энергий электронного пучка: 1,6 и 2,2 ГэВ. Расчеты проведены для узкого спектрального диапазона с длиной волны 13,5 нм и шириной 0,4 нм, а также для широкого диапазона – от 2 до 3 нм. Для этих энергий электронного пучка рассчитаны параметры ондуляторов для генерации ондуляторного излучения с длиной волны 13,5 нм. Расчеты проведены с учетом реальных ограничений технических возможностей ондуляторов: минимально возможный зазор между полюсами ондулятора, максимально возможная намагниченность его магнитных блоков. Для расчетов написаны специальные компьютерные программы. Результаты расчетов интенсивностей генерируемого в ТНК «Зеленоград» синхротронного и ондуляторного излучений позволяют утверждать, что генерируемое излучение может быть эффективно использовано в качестве источника экстремального ультрафиолетового излучения в фотолитографе.

Ключевые слова: электронные накопительные кольца, синхротронное излучение, ондуляторы, фотолитография

Финансирование работы: работа выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

© Н. В. Смоляков, Н. В. Марченков, А. М. Лебедев, Р. Г. Чумаков, М. С. Гончаренко, Н. А. Дюжев, 2024

Для цитирования: Моделирование источников рентгеновского излучения для станции фотолитографии на технологическом накопительном комплексе «Зеленоград» / Н. В. Смоляков, Н. В. Марченков, А. М. Лебедев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 300–309. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-300-309. – EDN: AFPVKP.

Original article

Modeling of X-ray sources for a photolithography station at technological storage ring complex "Zelenograd"

N. V. Smolyakov[1], N. V. Marchenkov[1], A. M. Lebedev[1], R. G. Chumakov[1], M. S. Goncharenko[1], N. A. Djuzhev[2]

[1]National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

smolyakovnv@mail.ru

Abstract. Photolithography plays a key role in production of microelectronic components. One of critically complex elements of photolithograph is the source of the extreme ultraviolet electromagnetic radiation. Such a source could be a specialized source of synchrotron radiation – the technological storage ring complex (TSR) "Zelenograd" expected to be put into operation within the next few years. In this work, the results of numeric calculations of power and photon fluxes from various electromagnetic emitters of TSR "Zelenograd" are presented in the context of the possibility to use it for photolithography. Synchrotron radiation generated in the bending magnets of the TSR "Zelenograd" storage ring is considered at two electron beam energy values: 1.6 and 2.2 GeV. Calculations were carried out for a narrow spectral range with a wavelength of 13.5 nm and width of 0.4 nm, and for a wide spectral range – from 2 to 3 nm. For these electron beam energies the undulator parameters for generation of undulator radiation with a wavelength of 13.5 nm were calculated. Calculations were carried out with consideration to real limitations of undulators' engineering capabilities: the minimum possible gap between the undulator poles, the maximum magnetization of its magnetic blocks. Special computer codes have been written for such kind of simulations. The results of intensity calculation of synchrotron and undulator radiation generated at TSR "Zelenograd" afford the statement about possibility to effective use its radiation as extreme ultraviolet radiation source in a photolithograph.

Keywords: electron storage rings, synchrotron radiation, undulators, photolithography

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignment of NRC "Kurchatov Institute".

For citation: Smolyakov N. V., Marchenkov N. V., Lebedev A. M., Chumakov R. G., Goncharenko M. S., Djuzhev N. A. Modeling of X-ray sources for a photolithography station at technological storage ring complex "Zelenograd". *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 300–309. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-300-309. – EDN: AFPVKP.

Введение. Для изготовления элементов микроэлектроники в качестве основного метода применяется фотолитография. Данный метод включает в себя нанесение на фоторезисте определенного рисунка при облучении его через фотошаблон ультрафиолетовым излучением. В настоящее время самыми распространенными являются фотолитографы фирмы ASML (Нидерланды) [1], в последнем поколении которых используется излучение с длиной волны $\lambda = 13{,}5$ нм, генерируемое плазмой из ионов олова. Однако такой способ генерации излучения технологически сложен, в его воспроизводстве имеются труднопреодолимые технические проблемы. Источником мощного излучения для фотолитографа может служить синхротронное излучение, генерируемое пучком электронов в поворотных магнитах накопительных колец, или ондуляторах.

Первые эксперименты по литографии с синхротронным излучением из поворотного магнита накопителя, проведенные в Германском исследовательском центре DESY, описаны в работе [2]. В работах [3, 4] приведено описание каналов для фотолитографии на нескольких накопительных кольцах. На кольце NewSUBARU (Япония) с энергией пучка 1–1,5 ГэВ [5] для литографии есть канал синхротронного излучения BL3 [6] и канал ондуляторного излучения BL9 [7]. Длина периода ондулятора 54 мм, число переходов 200, параметр ондуляторности 2,5, длина волны излучения $\lambda = 13{,}5$ нм. На интерференционном литографе достигнуто разрешение 10 нм [7, 8]. На накопителе ALS (США) действует установка MET (Microfield Exposure Tool) [9], используется ондулятор с периодом 80 мм и числом периодов 55, который генерирует излучение с длиной волны $\lambda = 13{,}4$ нм [10].

На сегодняшний день специализированный источник синхротронного излучения – технологический накопительный комплекс (ТНК) «Зеленоград» (г. Москва) – находится на стадии готовности к вводу в эксплуатацию [11]. Его запуск позволит в кратчайшие сроки сформировать научно-производственный комплекс для освоения серийного производства и подготовки кадров в передовых областях техники и технологии. Основные параметры ТНК приведены в работах [12–15].

В настоящей работе анализируется возможность применения накопительного кольца ТНК «Зеленоград» в качестве источника экстремального ультрафиолетового излучения для фотолитографа. Рассматриваются два режима его работы: с энергией пучка электронов 1,6 и 2,2 ГэВ. Рассчитываются характеристики синхротронного излучения из поворотных магнитов, а также ондуляторного излучения. Параметры ондулятора оптимизированы под генерацию излучения в требуемом для фотолитографии спектральном диапазоне.

Параметры накопительного кольца. Магнитная структура накопительного кольца ТНК «Зеленоград» оптимизирована для генерации пучков фотонов высокой интенсивности и яркости как из поворотных магнитов, так и из вставных устройств: ондуляторов, вигглеров, змеек. Периметр основного кольца равен 115,7 м. Магнитная система включает в себя 24 поворотных магнита. Конструкция каждого поворотного магнита такова, что на краю магнита, который примыкает к прямолинейному промежутку, есть короткий участок с полем, равным одной четверти основного поля магнита. Это позволяет разделить синхротронное излучение из основного поля поворотного магнита и из вставного устройства прямолинейного промежутка, понизив при этом тепловые и радиационные нагрузки на оптические элементы каналов вставных устройств.

Расчеты характеристик излучения проводили для двух значений энергии пучка накопителя установки: $E = 1{,}6$ ГэВ и $E = 2{,}2$ ГэВ. Радиус круговой орбиты пучка электронов фиксирован и равен $R = 4{,}905$ м. Поле B поворотных магнитов изменяется с изменением энергии пучка электронов. В общем случае верно соотношение:

$$RB = 3{,}336E.$$

При энергии пучка E = 1,6 ГэВ поле поворотного магнита B = 1,1 Тл, при энергии E = 2,2 ГэВ поле B = 1,5 Тл.

В однобанчевом режиме интервал между импульсами равен 400 нс, а в многосгустковом режиме (70 сгустков) составляет 5,5 нс. Пульсация сигнала с таким малым временным интервалом не должна сказываться на работе установки.

Характеристики синхротронного излучения. Синхротронное излучение, генерируемое релятивистским пучком электронов в однородном магнитном поле поворотного магнита накопительного кольца, характеризуется следующими свойствами. Мощность синхротронного излучения намного выше, чем у других рентгеновских источников, и имеет гладкий спектр в области от инфракрасного диапазона до рентгеновского. В рассматриваемом спектральном диапазоне синхротронное излучение практически полностью линейно поляризовано, распределение его интенсивности однородно в горизонтальном направлении (рис. 1, *а*).

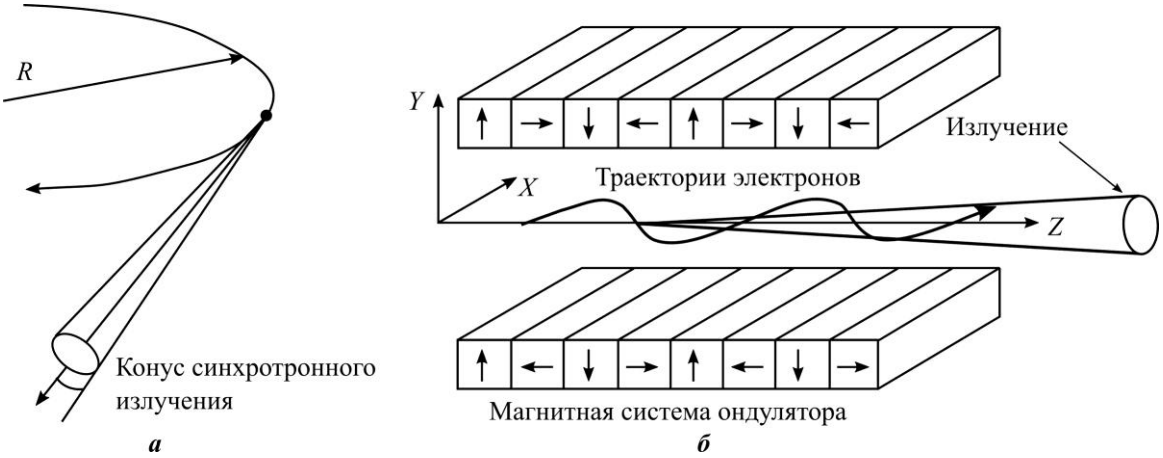


Рис. 1. Принципиальная схема генерации излучения: *а* – синхротронное излучение; *б* – ондуляторное излучение (стрелки на магнитных блоках ондулятора указывают направление их намагниченности)
Fig. 1. Scheme of radiation generation: *a* – synchrotron radiation; *b* – undulator radiation (the arrows on the magnet blocks indicate their magnetization direction)

Спектральные характеристики синхротронного излучения анализировали для двух значений энергии электронов: E = 1,6 ГэВ и E = 2,2 ГэВ. Ток пучка 300 мА. Рассмотрены два спектральных диапазона синхротронного излучения с длиной волны λ = 13,5 нм и шириной 0,4 нм и в диапазоне длин волн λ = 2...3 нм (рис. 2). Излучение с длиной волны λ = 13,5 нм сосредоточено в узком вертикальном угле ±1,2 мрад от плоскости орбиты пучка как при E = 1,6 ГэВ, так и при E = 2,2 ГэВ. Излучение с длиной волны λ = 2...3 нм сосредоточено в узком вертикальном угле примерно ±0,7 мрад относительно медианной плоскости и одинаково при E = 1,6 ГэВ и E = 2,2 ГэВ. Это позволяет использовать оптику с малой апертурой. Детальные расчеты показывают, что наличие углового и пространственного разбросов электронов в пучке (эмиттанс пучка) практически не сказывается на пространственных параметрах излучения.

Из графиков на рис. 2 следует, что при E = 1,6 ГэВ в полный вертикальный угол и горизонтальный угол 1 мрад в секунду в относительной спектральной полосе 0,1 % генерируется $8{,}2 \cdot 10^{12}$ фотонов с длиной волны λ = 13,5 нм и $8{,}7 \cdot 10^{12}$ фотонов при E = 2,2 ГэВ. Относительная разница в интенсивностях мала и составляет 6 %. Для диапазона длин волн λ = 2...3 нм при разных энергиях пучка электронов разница в интенсивностях синхротронного излучения также невелика (см. рис. 2).

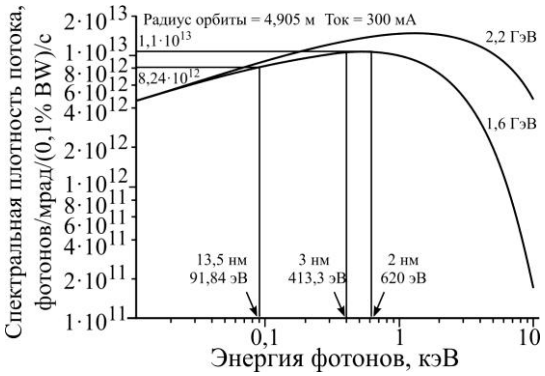


Рис. 2. Спектр синхротронного излучения, проинтегрированный по вертикальному углу
Fig. 2. Spectral flux of synchrotron radiation integrated over vertical angle

Облучаемая пластина обычно имеет диаметр 200–300 мм. Ее экспозиция производится по отдельным кадрам (области экспозиции, размер поля изображения). В работе [1] размеры кадра 26 × 32 мм, в работе [7] – 10 × 10 мм. В Зеленоградском нанотехнологическом центре (г. Москва) разрабатывается отечественный литограф с размером поля изображения 22 × 22 мм. Поэтому для оценки горизонтальный размер кадра равен 25 мм. Значения потоков фотонов при такой геометрии (горизонтальный угол 5 Мрад) приведены в таблице. При этом между источником излучения и маской расположен объектив, что дает возможность согласовать размеры входного пучка и области экспозиции.

Потоки фотонов синхротронного излучения, фотонов/с, при разных режимах работы накопителя электронов
Photon fluxes of synchrotron radiation, photons/s, at different modes of operation of the electron storage device

Энергия электронов E, ГэВ	λ = (13,5 ± 0,2) нм	λ = 2...3 нм
	Требования по потоку	
	10^{13} фотонов/с	10^{14} фотонов/с
1,6	$1{,}2\cdot10^{15}$	$2{,}2\cdot10^{16}$
2,2	$1{,}3\cdot10^{15}$	$2{,}7\cdot10^{16}$

Таким образом видно, что синхротронное излучение, генерируемое в накопителе электронов ТНК «Зеленоград», обеспечивает необходимый поток фотонов в требуемых спектральных областях при E = 1,6 ГэВ и E = 2,2 ГэВ.

Характеристики ондуляторного излучения. Ондулятор представляет собой цепочку магнитных полюсов, создающих на оси ондулятора вертикальное магнитное поле синусоидального вида. В настоящее время наибольшее распространение получили редкоземельные ондуляторы, состоящие из редкоземельных магнитных блоков (постоянных магнитов) с высокой остаточной намагниченностью 1,1–1,3 Тл. Практически всегда используется приведенная на рис. 1, *б* схема [16]. В ней каждый период ондулятора состоит из восьми магнитных блоков (по четыре сверху и снизу). Ондуляторное излучение есть результат интерференции излучения, сгенерированного на каждом периоде. Оно представляет собой набор узких спектральных линий, сосредоточенных в узких конусах вдоль оси ондулятора.

Длина волны λ первой гармоники ондуляторного излучения, генерируемой вдоль оси плоского ондулятора, определяется формулой

$$\lambda = \frac{l}{2\gamma^2}\left(1+0{,}5K^2\right), \qquad (1)$$

где l – длина периода ондулятора, см; γ – приведенная энергия электрона; K – параметр ондуляторности.

Численно приведенная энергия электрона $\gamma = 1957E(\text{ГэВ})$. Так, $\gamma = 3131$ при E = 1,6 ГэВ и $\gamma = 4305$ при E = 2,2 ГэВ. Безразмерный параметр ондуляторности K численно равен:

$$K = 0{,}934lB. \qquad (2)$$

Видно, что при заданных значениях приведенной энергии пучка γ и длины волны излучения λ всегда можно подобрать такие значения длины периода ондулятора l и амплитуды его магнитного поля B, чтобы соотношения (1) и (2) выполнялись. Амплитуда магнитного поля ондулятора зависит сложным образом как от параметров магнитных блоков (их размеров и намагниченности), так и от зазора между полюсами ондулятора. Поэтому она может быть рассчитана только численно. Зная амплитуду магнитного поля ондулятора, длину его периода и их число, а также энергию и ток электронного пучка накопителя, можно рассчитать спектрально-угловые характеристики ондуляторного излучения. Но даже в случае идеального плоского ондулятора с синусоидальным магнитным полем расчет спектрально-угловых распределений его излучения требует применения специализированных компьютерных программ.

При расчетах параметров ондулятора с конструкцией, показанной на рис. 1, *б*, использовали следующие данные накопителя электронов ТНК «Зеленоград»:

Ток пучка электронов накопителя ..... 300 мА
Энергия пучка электронов накопителя ..... 1,6 и 2,2 ГэВ
Остаточная намагниченность магнитного блока ..... 1,1 Тл
Максимально достижимое значение остаточной намагниченности ..... 1,3 Тл
Минимально возможный зазор между полюсами ..... 32 мм
Полная длина ондулятора ..... ~ 1300 мм
Длина волны первой гармоники ондуляторного излучения ..... 13,5 нм

Значение минимального возможного зазора между полюсами определяется размерами вакуумной камеры накопителя. Полная длина ондулятора равна длине ондулятора и многополюсного вигглера, которые были предложены в [14] для накопительного кольца ТНК «Зеленоград». Она определяется длиной прямолинейного промежутка накопителя и ограничивает число периодов ондулятора N.

Параметры ондулятора оптимизировали так, чтобы он излучал максимально большой поток фотонов с длиной волны λ = 13,5 нм. В процессе дальнейшей разработки конструкции ондулятора в приложении к ТНК «Зеленоград» рассчитанные оптимальные параметры могут быть незначительно изменены. Так, реальный ондулятор на своих краях всегда включает в себя специальные полюса, обеспечивающие правильный вход и выход электронного пучка в регулярную часть магнитного поля ондулятора, для которых требуется место. В результате реальное число основных периодов ондулятора немного уменьшится.

Детальный анализ показывает, что при E = 1,6 ГэВ оптимальный период ондулятора l = 65,2 мм. При числе периодом N = 20 полная длина регулярного магнитного поля ондулятора равна 1304 мм. В таком ондуляторе с зазором между полюсами 32 мм амплитуда магнитного поля B = 0,406 Тл. Параметр ондуляторности K = 2,47. При этом полная мощность излучения, генерируемая ондулятором в полный телесный угол в полный спектральный диапазон, равна 105 Вт. Угловая плотность мощности излучения вдоль оси ондулятора равна 173 Вт/мрад^2. Поток фотонов, излученный на первой гармонике ондуляторного излучения в полный телесный угол с длиной волны 13,5 нм в

спектральном диапазоне шириной ±0,2 нм, равен $1{,}2 \cdot 10^{16}$ фотонов/с. Это в десять раз больше соответствующего потока синхротронного излучения (см. таблицу).

При E = 2,2 ГэВ оптимальный период ондулятора l = 74,2 мм. При N = 18 длина регулярного магнитного поля ондулятора равна 1335,6 мм. При зазоре между полюсами 32 мм B = 0,49 Тл. Параметр ондуляторности K = 3,39. Генерируемая полная мощность в полный телесный угол в полный спектральный диапазон равна 294 Вт. Угловая плотность мощности излучения вдоль оси ондулятора составляет 672 Вт/мрад^2. Поток фотонов, излученный на первой гармонике ондуляторного излучения в полный телесный угол с длиной волны 13,5 нм в спектральном диапазоне шириной ±0,2 нм, равен $1{,}1 \cdot 10^{16}$ фотонов/с. Это в восемь раз больше соответствующего потока синхротронного излучения (см. таблицу).

На рис. 3 показана спектральная плотность первой гармоники ондуляторного излучения, генерируемого вдоль оси ондулятора в единицу телесного угла (мрад^2). Видно, что максимум интенсивности приходится на энергию фотонов 91,85 эВ, что соответствует длине волны λ = 13,5 нм. Используемые для засветки фоторезиста фотоны с энергетической шириной ±1,36 эВ около максимума интенсивности соответствуют диапазону длин волн ±0,2 нм (см. таблицу). Спектральная линия шире диапазона ±1,36 эВ. Однако интенсивность линии сильно неоднородная (даже в рамках этого узкого спектрального диапазона).

На рис. 4 показана спектральная плотность первой гармоники ондуляторного излучения с длиной волны 13,5 нм в зависимости от горизонтального угла наблюдения. Без учета эмиттанса электронного пучка распределение интенсивности излучения в вертикальном направлении имеет такой же вид, как и по горизонтали. Первая гармоника ондуляторного излучения имеет цилиндрическую симметрию. Осью этой симметрии является ось ондулятора. Излучение с такой длиной волны сосредоточено в узком конусе с углом порядка ±0,1 мрад.

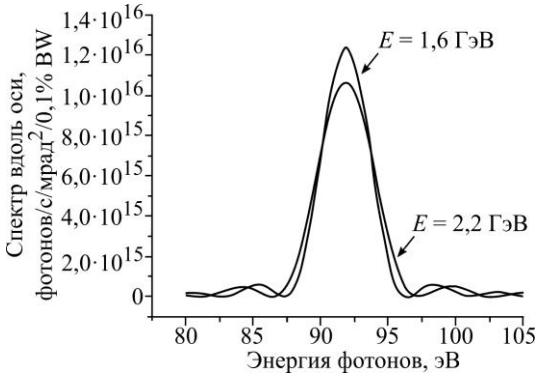


Рис. 3. Спектральная плотность первой гармоники ондуляторного излучения, генерируемого вдоль оси ондулятора

Fig. 3. Spectral density of the undulator radiation first harmonic generated along the undulator axis

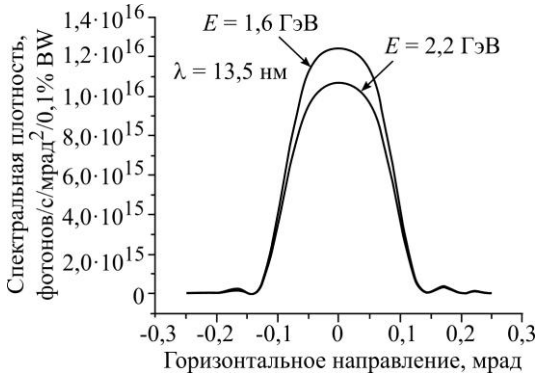


Рис. 4. Распределение спектральной плотности ондуляторного излучения с длиной волны 13,5 нм в горизонтальном направлении

Fig. 4. Distribution of the 13.5 nm wavelength undulator radiation spectral density in the horizontal direction

Сравнение вариантов генерации ондуляторного излучения с длиной волны λ = 13,5 нм при E = 1,6 и 2,2 ГэВ показало, что вариант с энергией E = 1,6 ГэВ предпочтительнее. Геометрические и спектральные параметры пучка фотонов в обоих случаях соответствуют друг другу. Генерируемые потоки фотонов ондуляторного излучения тоже близки по величине. Генерируемая ондулятором полная энергия при E = 2,2 ГэВ

равна 294 Вт, при E = 1,6 ГэВ составляет 105 Вт. Это может дать паразитные тепловые и радиационные нагрузки на элементы оптического канала. При этом, как видно из рис. 3 и 4, спектрально-угловая плотность ондуляторного излучения с длиной волны λ = 13,5 нм при E = 1,6 ГэВ выше, чем при E = 2,2 ГэВ. Это происходит потому, что для генерации излучения с длиной волны λ = 13,5 нм требуемая длина периода l = 67,2 мм меньше длины периода (l = 76,7 мм) при E = 2,2 ГэВ. Соответственно, если длина ондулятора фиксирована, то ондулятор с меньшей длиной периода содержит большее число этих периодов.

Заключение. Полученные результаты расчетов характеристик синхротронного и ондуляторного излучений, которые возможно генерировать на ТНК «Зеленоград», показывают, что это излучение может быть эффективно использовано для литографических установок. Окончательный выбор генератора излучения (синхротронное, или ондуляторное, или оба одновременно) необходимо проводить совместно с разработкой конструкций канала рентгеновского излучения, его оптических элементов, а также литографической станции.

Литература

1. EUV lithography at chipmakers has started: Performance validation of ASML's NXE:3100 / ***C. Wagner, J. Bacelar, N. Harned et al.*** // Proc. SPIE. Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography II. 2011. Vol. 7969. Art. ID: 79691F. https://doi.org/10.1117/12.878603

2. Application of synchrotron radiation to X-ray lithography / ***E. Spiller, D. E. Eastman, R. Feder et al.*** // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. P. 5450–5459. https://doi.org/10.1063/1.322577

3. ***Haelbich R. P., Silverman J. P., Warlaumont J. M.*** Synchrotron radiation X-ray lithography // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1984. Vol. 222. Iss. 1-2. P. 291–301. https://doi.org/10.1016/0167-5087(84)90547-7

4. ***Naulleau P.*** EUV lithography // Synchrotron Radiat. News. 2019. Vol. 32. Iss. 4. Art. No. 2. https://doi.org/10.1080/08940886.2019.1634429

5. Present status of the synchrotron radiation facility NewSUBARU / ***S. Hashimoto, Y. Shoji, Y. Fukuda et al.*** // PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 01CH37268). Chicago, IL: IEEE, 2001. P. 2692–2694. https://doi.org/10.1109/PAC.2001.987875

6. Mask observation results using a coherent extreme ultraviolet scattering microscope at NewSUBARU / ***T. Harada, J. Kishimoto, T. Watanabe et al.*** // J. Vac. Sci. Technol. B. 2009. Vol. 27. Iss. 6. P. 3203–3207. https://doi.org/10.1116/1.3258633

7. ***Watanabe T., Harada T.*** Research activities of extreme ultraviolet lithography at the University of Hyogo // Synchrotron Radiat. News. 2019. Vol. 32. Iss. 4. P. 28–35. https://doi.org/10.1080/08940886.2019.1634435

8. EUV interference lithography for 1X nm / ***T. Urayama, T. Watanabe, Y. Yamaguchi et al.*** // J. Photopolym. Sci. Technol. 2011. Vol. 24. Iss. 2. P. 153–157. https://doi.org/10.2494/photopolymer.24.153

9. Status of EUV micro-exposure capabilities at the ALS using the 0.3-NA MET optic / ***P. Naulleau, K. A. Goldberg, E. H. Anderson et al.*** // Proc. SPIE. Emerging Lithographic Technologies VIII. 2004. Vol. 5374. Art. ID: 556538. https://doi.org/10.1117/12.556538

10. ***Chang C., Robinson A.*** Quantitative measurements of undulator spatial coherence at the ALS // Synchrotron Radiat. News. 2001. Vol. 14. Iss. 2. P. 32–33. https://doi.org/10.1080/08940880108261135

11. ***Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Занавескин М. Л.*** Технологический накопительный комплекс «Зеленоград» как основа создания инжинирингового центра перспективных материалов, микроэлектроники и биомедицинских технологий // Кристаллография. 2022. Т. 67. № 5. С. 766–770. https://doi.org/10.31857/S0023476122050149. – EDN: QBQMSW.

12. TNK – synchrotron radiation source for submicron technology applications / ***V. V. Anashin, E. I. Gorniker, N. G. Gavrilov et al.*** // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1991. Vol. 308. Iss. 1-2. P. 45–49. https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90584-D

13. Beam lines at the TNK SR source / ***V. V. Anashin, L. G. Isaeva, E. P. Kollerov et al.*** // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1991. Vol. 308. Iss. 1-2. P. 50–53. https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90585-E

14. Multipole wiggler and undulator for the TNK SR source / ***G. I. Erg, V. N. Korchuganov, G. N. Kulipanov et al.*** // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1991. Vol. 308. Iss. 1-2. P. 57–60. https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90587-G

15. Status of the ‘‘Zelenograd’’ storage ring / ***O. Anchugov, V. Arbuzov, O. Belikov et al.*** // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2009. Vol. 603. Iss. 1-2. P. 4–6. https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.111

16. ***Halbach K.*** Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1981. Vol. 187. Iss. 1. P. 109–117. https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)90477-8

Статья поступила в редакцию 14.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 28.12.2023 г.; принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Смоляков Николай Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1), smolyakovnv@mail.ru

Марченков Никита Владимирович – кандидат физико-математических наук, руководитель Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1), Marchenkov_NV@nrcki.ru

Лебедев Алексей Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1), lebedev.alex.m@gmail.com

Чумаков Ратибор Григорьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1), ratibor.chumakov@gmail.com

Гончаренко Михаил Сергеевич – заместитель начальника отдела управления проектами Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1), Goncharenco_MS@nrcki.ru

Дюжев Николай Алексеевич – кандидат физико-математических наук, директор ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dyuzhev@ckp-miet.ru

References

1. Wagner C., Bacelar J., Harned N., Loopstra E., Hendriks S., Jong I. de, Kuerz P., Levasier L. et al. EUV lithography at chipmakers has started: Performance validation of ASML’s NXE:3100. *Proc. SPIE. Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography II,* 2011, vol. 7969, art. ID: 79691F. https://doi.org/10.1117/12.878603

2. Spiller E., Eastman D. E., Feder R., Grobman W. D., Gudat W., Topalian J. Application of synchrotron radiation to X-ray lithography. *J. Appl. Phys.*, 1976, vol. 47, pp. 5450–5459. https://doi.org/10.1063/1.322577

3. Haelbich R. P., Silverman J. P., Warlaumont J. M. Synchrotron radiation X-ray lithography. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 1984, vol. 222, iss. 1-2, pp. 291–301. https://doi.org/10.1016/0167-5087(84)90547-7

4. Naulleau P. EUV Lithography. *Synchrotron Radiat. News,* 2019, vol. 32, iss. 4, art. no. 2. https://doi.org/10.1080/08940886.2019.1634429

5. Hashimoto S., Shoji Y., Fukuda Y., Miyamoto S., Niibe M., Ando A. C. Present status of the synchrotron radiation facility NewSUBARU. *PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (Cat. No. 01CH37268).* Chicago, IL, IEEE, 2001, pp. 2692–2694. https://doi.org/10.1109/PAC.2001.987875

6. Harada T., Kishimoto J., Watanabe T., Kinoshita H., Lee D. G. Mask observation results using a coherent extreme ultraviolet scattering microscope at NewSUBARU. *J. Vac. Sci. Technol. B,* 2009, vol. 27, iss. 6, pp. 3203–3207. https://doi.org/10.1116/1.3258633

7. Watanabe T., Harada T. Research activities of extreme ultraviolet lithography at the University of Hyogo. *Synchrotron Radiat. News,* 2019, vol. 32, iss. 4, pp. 28–35. https://doi.org/10.1080/08940886.2019.1634435

8. Urayama T., Watanabe T., Yamaguchi Y., Matsuda N., Fukushima Y., Iguchi T., Harada T., Kinoshita H. EUV interference lithography for 1X nm. *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 2011, vol. 24, iss. 2, pp. 153–157. https://doi.org/10.2494/photopolymer.24.153

9. Naulleau P., Goldberg K. A., Anderson E. H., Bradley K., Delano R., Denham P., Gunion B., Harteneck B. et al. Status of EUV micro-exposure capabilities at the ALS using the 0.3-NA MET optic. *Proc. SPIE. Emerging Lithographic Technologies VIII,* 2004, vol. 5374, art. ID: 556538. https://doi.org/10.1117/12.556538

10. Chang C., Robinson A. Quantitative measurements of undulator spatial coherence at the ALS. *Synchrotron Radiat. News,* 2001, vol. 14, iss. 2, pp. 32–33. https://doi.org/10.1080/08940880108261135

11. Kovalchuk M. V., Naraikin O. S., Zanaveskin M. L. Technical storage ring complex "Zelenograd" as a base for an engineering center of advanced materials, microelectronics, and biomedical technologies. *Crystallogr. Rep.*, 2022, vol. 67, pp. 712–716. https://doi.org/10.1134/S1063774522050145

12. Anashin V. V., Gorniker E. I., Gavrilov N. G., Korchuganov V. N., Kulipanov G. N., Kuper E. A., Kirkin G. Ya., Kuzminykh V. S. et al. TNK – synchrotron radiation source for submicron technology applications. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A,* 1991, vol. 308, iss. 1-2, pp. 45–49. https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90584-D

13. Anashin V. V., Isaeva L. G., Kollerov E. P., Korchuganov V. N., Kulipanov G. N., Mnev V. N., Panchenko V. E., Trakhtenberg E. M., Ushakov V. A. Beam lines at the TNK SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A,* 1991, vol. 308, iss. 1-2, pp. 50–53. https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90585-E

14. Erg G. I., Korchuganov V. N., Kulipanov G. N., Levichev E. B., Trakhtenberg E. M., Ushakov V. A., Valentinov A. G. Multipole wiggler and undulator for the TNK SR source. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A,* 1991, vol. 308, iss. 1-2, pp. 57–60. https://doi.org/10.1016/0168-9002(91)90587-G

15. Anchugov O., Arbuzov V., Belikov O., Chernov K., Chernyakin A., Dovzhenko B., Gorniker E., Grachev N. et al. Status of the ''Zelenograd'' storage ring. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A,* 2009, vol. 603, iss. 1-2, pp. 4–6. https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.12.111

16. Halbach K. Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.,* 1981, vol. 187, iss. 1, pp. 109–117. https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)90477-8

The article was submitted 14.12.2023; approved after reviewing 28.12.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Nikolay V. Smolyakov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher, National Research Center "Kurchatov Institute" (Russia, 123182, Moscow, Academician Kurchatov sq., 1), smolyakovnv@mail.ru

Nikita V. Marchenkov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Kurchatov Complex of Synchrotron-Neutron Research, National Research Center "Kurchatov Institute" (Russia, 123182, Moscow, Academician Kurchatov sq., 1), Marchenkov_NV@nrcki.ru

Alexey M. Lebedev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher, National Research Center "Kurchatov Institute" (Russia, 123182, Moscow, Academician Kurchatov sq., 1), lebedev.alex.m@gmail.com

Ratibor G. Chumakov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientific Researcher, National Research Center "Kurchatov Institute" (Russia, 123182, Moscow, Academician Kurchatov sq., 1), ratibor.chumakov@gmail.com

Mikhail S. Goncharenko – Deputy Head of the Project Management Department of the Kurchatov Complex of Synchrotron-Neutron Research, National Research Center "Kurchatov Institute" (Russia, 123182, Moscow, Academician Kurchatov sq., 1), Goncharenco_MS@nrcki.ru

Nikolay A. Dyuzhev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Director of the Center for Collective Use "Microsystem Technology and Electronic Component Base", National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dyuzhev@ckp-miet.ru

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья
УДК 621.3.049.774.3
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-310-318
EDN: AASYHU

Исследование влияния оптического излучения на интегральную микросхему ТТЛ-типа

***С. Ш. Рехвиашвили*[1,2], *Д. С. Гаев*[2]**

[1]*Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук, г. Нальчик, Россия*
[2]*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия*

rsergo@mail.ru

Аннотация. Задача повышения быстродействия полупроводниковых интегральных микросхем цифровых устройств решается схемотехническими и конструктивно-технологическими методами. К схемотехническим методам относятся форсирование динамического режима с помощью корректирующих цепей, использование фиксирующих и шунтирующих диодов, нелинейной обратной связи и токовых переключателей. Конструктивно-технологические методы включают в себя миниатюризацию активных и пассивных компонентов на чипе, уменьшение паразитных емкостей, работу в режимах с высокими значениями плотностей токов базы и коллектора или тока стока, снижение перепадов напряжений между низкими и высокими уровнями в сигналах. Повышение быстродействия возможно также за счет применения принципов оптоэлектроники. В работе представлены результаты исследований функционирования интегральной микросхемы транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ-типа) при воздействии на нее немодулированного излучения, создаваемого красным лазером. Измерены статические и динамические характеристики микросхемы при различных интенсивностях воздействия. Показано, что изменение характеристик при оптическом воздействии обусловлено увеличением времени жизни неравновесных носителей заряда и фотовольтаическим эффектом в *p*–*n*-переходах. Разработана SPICE-модель сложного инвертора ТТЛ-типа, учитывающая указанные физические эффекты. Результаты схемотехнического моделирования качественно воспроизводят полученные экспериментальные результаты. Проведенные исследования могут быть применены для создания быстродействующих интегральных микросхем на биполярных транзисторах принципиально нового типа.

© С. Ш. Рехвиашвили, Д. С. Гаев, 2024

Ключевые слова: интегральная микросхема ТТЛ-типа, статические и динамические характеристики, оптическое излучение, быстродействие, схемотехническое моделирование

Финансирование работы: работа выполнена в рамках госзаданий ИПМА КБНЦ РАН и КБГУ.

Для цитирования: Рехвиашвили С. Ш., Гаев Д. С. Исследование влияния оптического излучения на интегральную микросхему ТТЛ-типа // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 310–318. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-310-318. – EDN: AASYHU.

Original article

Investigation of the effect of optical radiation on the TTL integrated circuit

S. Sh. Rekhviashvili[1,2], D. S. Gaev[2]

[1]Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia
[2]Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russia

rsergo@mail.ru

Abstract. The problem of increasing the performance of semiconductor integrated circuits of digital devices is solved by circuit engineering and structural and technological methods. Circuit engineering methods include forcing the dynamic mode with the help of corrective circuits, the use of locking and shunt diodes, nonlinear feedback and current switches. Constructive and technological methods include miniaturization of active and passive components on a chip, reduction of parasitic capacitances, operation in modes with high values of the base and collector current densities or drain current, reduction of voltage differences between low and high levels in signals. An increase in performance is also possible due to the application of the optoelectronics principles. In this work, the results of investigation of the operation of a transistor-transistor logic (TTL) integrated circuit when exposed to unmodulated radiation generated by a red laser are presented. The static and dynamic characteristics of the chip were measured at different exposure intensities. It was demonstrated that the change in characteristics under optical influence is due to an increase in the lifetime of nonequilibrium charge carriers and the photovoltaic effect in *p*–*n* junctions. A SPICE model of a complex TTL type inverter considering these physical effects has been developed. The results of circuit simulation qualitatively reproduce the experimental results obtained. The conducted research can be applied to create high-speed integrated circuits on bipolar transistors of a fundamentally new type.

Keywords: TTL integrated circuit, static and dynamic characteristics, optical radiation, operating speed, circuit simulation

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignments of IAMA KBSC RAS and KBSU.

For citation: Rekhviashvili S. Sh., Gaev D. S. Investigation of the effect of optical radiation on the TTL integrated circuit. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 310–318. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-310-318. – EDN: AASYHU.

Введение. Интегральные микросхемы транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) характеризуются надежностью, высоким быстродействием (десятки мегагерц), устойчивостью к статическим зарядам. Микросхемы ТТЛ-типа изготавливаются по планарной технологии на биполярных транзисторах. К недостаткам микросхем данного типа можно отнести невысокую степень интеграции (небольшое количество логических элементов на кристалле), чувствительность к напряжению питания и высокий ток потребления (от 10 до 120 мА в зависимости от типа микросхемы). Кроме того, микросхемы ТТЛ-типа по уровням токов и напряжений несовместимы с распространенными МОП-микросхемами и микросхемами эмиттерно-связанной логики. Для их совместного использования требуются специальные микросхемы – преобразователи уровня. Для микросхем ТТЛ-типа напряжение логической единицы находится в интервале от 2,4 В до напряжения питания, т. е. до значения не более 5 В, напряжение логического нуля, как правило, не превышает 0,5 В.

Несмотря на недостатки, микросхемы ТТЛ-типа активно используются. В частности, микросхема К155ЛА3 (зарубежный аналог – SN7400N) применяется в несложных электронно-вычислительных системах, средствах автоматики и контрольно-измерительных приборах. На основе этой цифровой микросхемы изготавливаются аналоговые усилители с отрицательной обратной связью. На микросхемах ТТЛ-типа серии 7400 со средней степенью интеграции реализован центральный процессор 8-битного компьютера Gigatron TTL. Таким образом, простая и сбалансированная конструкция, состоящая из пассивных и активных компонентов, отработанная технология изготовления микросхем ТТЛ-типа [1] делают их удобными объектами для исследования различных физических процессов, протекающих в кремниевых интегральных структурах.

В настоящей работе исследуется воздействие на стандартную микросхему ТТЛ-типа немодулированного оптического излучения. Отметим, что использовать постоянное оптическое воздействие впервые предложено в [2] для повышения быстродействия транзисторов и транзисторных интегральных микросхем. Главное отличие такого подхода от известных технических решений в оптоэлектронике заключается в отсутствии физических и конструктивных ограничений, порождаемых гальванической развязкой в управляющих цепях. Традиционная структура интегральной микросхемы сохраняется, но дополняется внешним источником непрерывного оптического излучения.

Методы исследования. Исследовали микросхему К155ЛА3 (рис. 1). Корпус микросхемы DIP сошлифовывали с лицевой стороны так, чтобы оставался тонкий защитный полимерный слой, но через него излучение могло проникать в кристалл. В качестве источника излучения применяли красный маломощный полупроводниковый лазер с длиной волны 650 нм. Интенсивность засветки фиксировали, когда на осциллограмме выходного сигнала стабилизировались максимальные изменения. Измерены осциллограммы сигналов и передаточные характеристики по напряжению при работе микросхемы в качестве инвертора. Амплитуду входного переменного сигнала выбирали вблизи порога срабатывания. Напряжение питания микросхемы составляло 4,3 В, т. е. ниже номинального значения. Результаты измерений представлены на рис. 2 и 3.

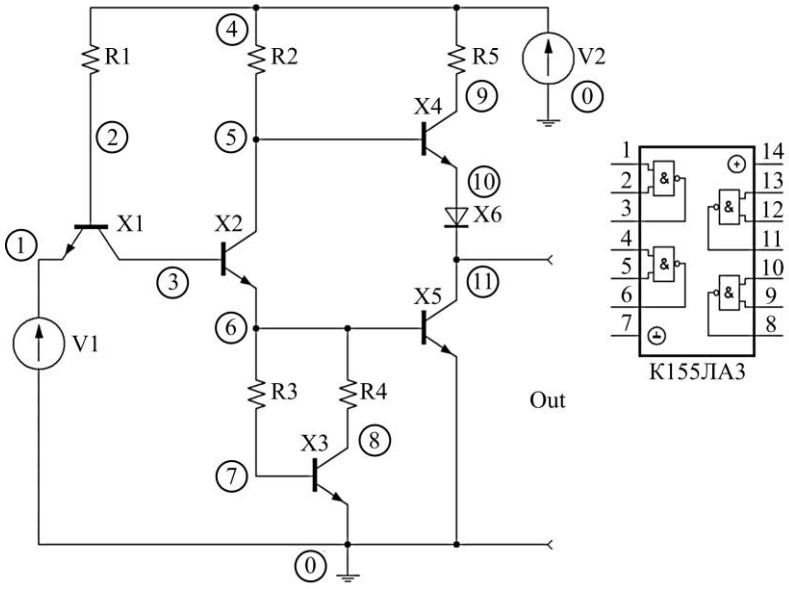
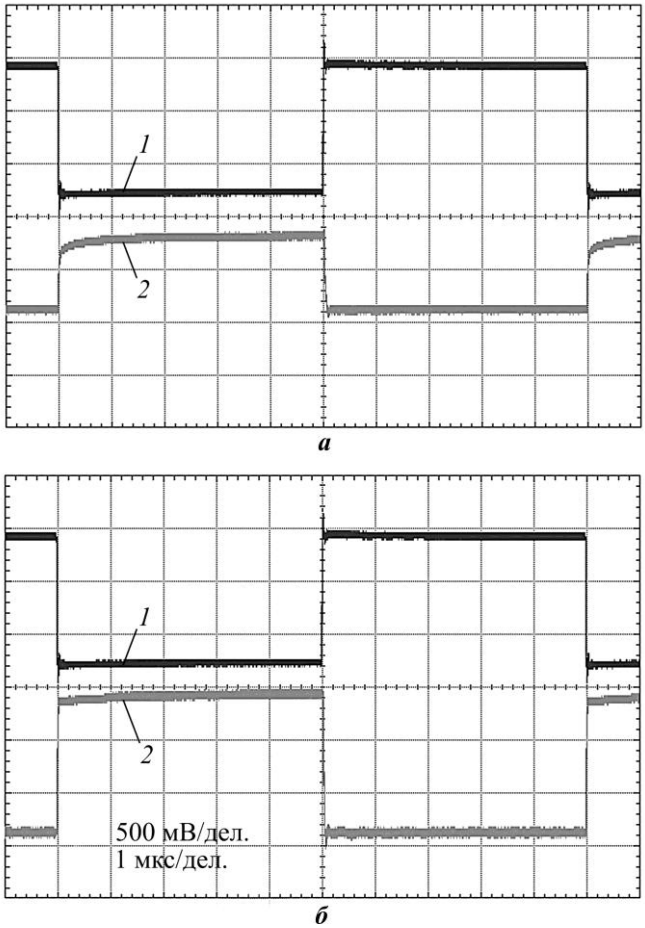


Рис. 1. Базовый элемент микросхемы К155ЛА3
Fig. 1. The basic element of the K155LA3 chip



а

б

Рис. 2. Осциллограммы сигналов: *а* – без оптического воздействия; *б* – с оптическим воздействием (*1* – входной сигнал; *2* – выходной сигнал)
Fig. 2. Waveforms of signals: *a* – without optical effect; *b* – with optical effect (*1* – input signal; *2* – output signal)

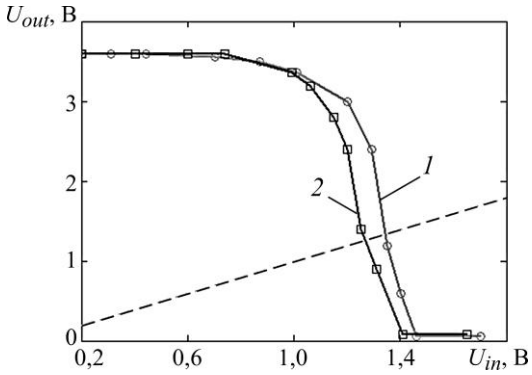


Рис. 3. Передаточные характеристики по напряжению: *1* – без оптического воздействия; *2* – с оптическим воздействием; – – – линия равных потенциалов

Fig. 3. Voltage transfer characteristics: *1* – without optical effect; *2* – with optical effect; – – – a line of equal potentials

Напряжения переключения находятся на пересечении передаточной характеристики и линии равных потенциалов. Для исследованной микросхемы с оптическим воздействием и без него эти напряжения составляют 1,25 и 1,35 В соответственно. Кроме красного лазера тестировали зеленый (длина волны 532 нм) и синий (длина волны 450 нм) маломощные полупроводниковые лазеры. Выявлено, что с уменьшением длины волны излучения наблюдаемые в микросхеме эффекты снижаются. Таким образом, наиболее предпочтительным оказался красный лазер.

Схемотехническое моделирование осуществляли с помощью программы LTspice, которая имеет все необходимые вычислительные возможности [3] и находится в свободном доступе.

Результаты и их обсуждение. Фоновое оптическое воздействие на микросхему ТТЛ-типа приводит к снижению порога срабатывания и уменьшению времени переходных процессов. При этом обеспечивается ее устойчивая работа при пониженных значениях логического перепада. Если облучать непосредственно поверхность кристалла без слоя полимера, то вместо лазера можно использовать светодиод [2]. Эффективность применения красного лазера, вероятно, обусловлена двумя факторами, связанными с особенностями оптического поглощения полимерного материала корпуса и кремниевого чипа приборной структуры. С одной стороны, с увеличением длины волны внешнего излучения полимерный материал становится более прозрачным, что ведет к увеличению относительной доли внешнего излучения, попадающего на кремниевый чип. С другой стороны, воздействие излучением с длинами волн меньше, чем длина волны, при которой наблюдается максимум фотопроводимости кремния, приводит к росту поглощения в приповерхностном слое кремниевого чипа за счет активации процессов поверхностной рекомбинации, это также уменьшает долю воздействующего излучения в объеме кристалла.

Интерпретацию полученных экспериментальных результатов проводили с помощью схемотехнического моделирования сложного инвертора ТТЛ-типа (см. рис. 1), на основе которого построена микросхема К155ЛА3. В качестве исходных данных для моделирования взяты типовые значения токов и напряжений, номиналов резисторов и параметров полупроводниковых приборов. Фотовольтаический эффект на *p*–*n*-переходах транзисторов и диода учитывали посредством подключения к их выводам идеальных источников тока с учетом требуемой полярности. Значения токов этих источников, а также значения внутренних параметров транзисторов и диода определяли эмпирически в машинном эксперименте. Предполагалось также, что фототоки на эмиттерных переходах в полтора раза превышают фототоки на коллекторных переходах. Для того чтобы учесть уменьшение сопротивлений резисторов и базовых областей в результате облучения, все номиналы умножали на один и тот же осредненный коэффициент, равный 0,85. Оценка данного коэффициента проведена отдельно при лазер-

ном облучении с различными интенсивностями образца *p*-кремния, имеющего свойства базовой области микросхемы. SPICE-модель инвертора имеет вид

```
* TTL INVERTER
V1 1 0 PULSE(0 1.3 0 1n 1n 5u 10u)
V2 4 0 DC 4.3
R1 4 2 4k
R2 5 4 1.6k
R3 7 6 500
R4 8 6 250
R5 9 4 130
X1 3 2 1 DEVICE1
X2 5 3 6 DEVICE1
X3 8 7 0 DEVICE1
X4 9 5 10 DEVICE1
X5 11 6 0 DEVICE1
X6 10 11 DEVICE2
.SUBCKT DEVICE1 COLLECTOR BASE EMITTER
QTTL COLLECTOR BASE EMITTER TRANSISTOR
.MODEL TRANSISTOR NPN(BF=30 BR=0.05 IS=0.1f RB=100
+ CJE=0.5p CJC=0.1p TF=2n TR=200n)
IE EMITTER BASE 45p
IC COLLECTOR BASE 30p
.ENDS
.SUBCKT DEVICE2 ANODE CATHODE
DTTL ANODE CATHODE DIODE
.MODEL DIODE D(IS=0.1f RS=100 CJO=0.5p TT=2n)
IAC CATHODE ANODE 45p
.ENDS
.TRAN 0.01u 20u
.PRINT TRAN V(1) V(11)
.DC V1 0 2 0.01
.PRINT DC V(11)
.END
```

Моделирование показывает, что увеличение фототоков *p*–*n*-переходов при прочих одинаковых условиях уменьшает напряжение высокого уровня. Но в реальных экспериментах наблюдается также и выравнивание фронтов выходного сигнала и уменьшение напряжения переключения микросхемы (см. рис. 2 и 3). Отсюда следует, что в расчетах необходимо принимать во внимание возможные изменения параметров пассивных и активных компонентов.

При повышении интенсивности оптического воздействия происходит линейное увеличение коэффициентов передачи транзисторов в активном β_F и инверсном β_R режимах в зависимости от электрической мощности накачки в широком диапазоне [2]. Причем β_F, как правило, изменяется значительнее, чем β_R. По всей вероятности, в случае с элементами ТТЛ-типа параметр β_R может оставаться почти неизменным, что связано со сложной и многослойной конструкцией коллектора в планарной биполярной структуре. Большое влияние на статические и динамические характеристики оказывает увеличение сквозного тока насыщения транзистора I_S, т. е. тока, протекающего между коллектором и эмиттером через оба *p*–*n*-перехода при разомкнутой цепи базы. Это объясняется тем, что в биполярных транзисторах определяющую роль играют неосновные

носители заряда, концентрация которых в базовых областях при оптическом воздействии может увеличиваться на порядки. Кроме того, нельзя пренебрегать уменьшением встроенных сопротивлений базовых областей транзисторов и диода. Встроенные сопротивления эмиттера и коллектора всегда малы, поэтому при моделировании их можно не учитывать. На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования. Видно, что теоретические расчеты качественно воспроизводят экспериментальные результаты, которые показаны на рис. 2 и 3.

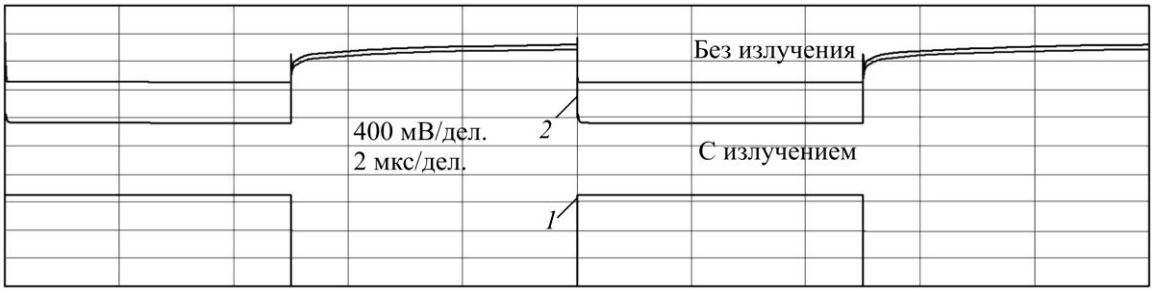


Рис. 4. Модельные осциллограммы сигналов: *1* – входной сигнал; *2* – выходной сигнал
Fig. 4. Model waveforms of signals: *1* – input signal; *2* – output signal

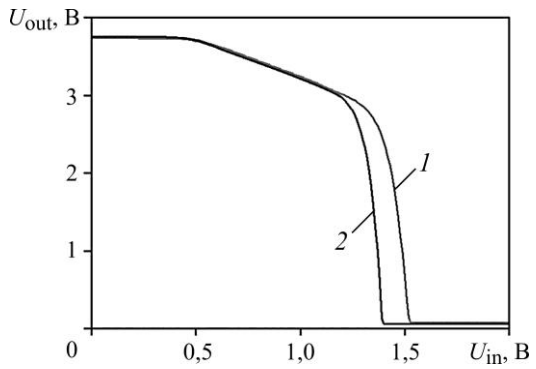


Рис. 5. Модельные передаточные характеристики по напряжению: *1* – без оптического воздействия; *2* – с оптическим воздействием
Fig. 5. Model voltage transfer characteristics: *1* – without optical effect; *2* – with optical effect

Для повышения быстродействия элементов ТТЛ-типа номиналы всех резисторов можно до некоторой степени понижать, что приведет к сокращению времени задержки распространения сигнала и увеличению максимальной рабочей частоты [4–6]. Скорость переключения биполярного транзистора лимитируется временем рассасывания зарядов в базе. Поэтому другой эффективный способ повышения быстродействия микросхем ТТЛ-типа основан на применении транзисторов с диодами Шоттки [4–6], которые предотвращают накопление неосновных носителей зарядов в базовых областях, устраняют режим насыщения транзисторов и тем самым уменьшают результирующее время переключения. Эти механизмы в рассматриваемом случае совокупно отрабатываются за счет внешнего оптического воздействия на микросхему. Таким образом, моделирование позволяет сделать следующий вывод: одновременное увеличение эмиттерных и коллекторных фототоков и сквозных токов насыщения транзисторов приводит к снижению порога переключения микросхемы, уменьшению влияния барьерных емкостей и, как следствие, к уменьшению времени установления переходного процесса.

В планарной биполярной структуре при постоянном внешнем оптическом воздействии возникают следующие физические процессы. При высоких значениях концентраций генерируемых электронов и дырок роль ловушек снижается и диффузионные длины и времена жизни электронов и дырок возрастают. Это, в свою очередь, вызывает рост коэффициентов передачи транзисторов. Увеличение времени жизни неравновесных носителей заряда в условиях фоновой засветки подтверждается измерениями фотопроводимости [7, с. 417–437]. Отметим, что аналогичные результаты получены в ра-

ботах [8, 9] при измерении СВЧ-проводимости в кремнии и объяснены образованием экситонов. В зависимости от напряжения смещения и длины волны внешнего излучения электрическая емкость фотодиодов может увеличиваться до двух раз по сравнению с темновым режимом [10]. В случае с микросхемой этот эффект не сказывается на осциллограммах выходного сигнала вследствие возрастания сквозных токов насыщения транзисторов. В *p*–*n*-переходах возникает фотовольтаический эффект, который является причиной появления добавочных токов в транзисторной структуре. Наличие данных токов способствует быстрому рассасыванию неосновных носителей заряда в базовых областях и снижению логических уровней, что в некоторой степени аналогично работе диода с резким восстановлением (Step Recovery Diode, SRD).

Заключение. Изучение особенностей функционирования микросхемы К155ЛА3 ТТЛ-типа при воздействии на нее постоянного оптического излучения, создаваемого красным маломощным полупроводниковым лазером, показало следующее. Непрерывная фоновая засветка позволяет снизить порог переключения микросхемы, уменьшить влияние барьерных емкостей и сократить время установления переходного процесса. Проведенное схемотехническое моделирование сложного инвертора ТТЛ-типа дало возможность объяснить экспериментальные результаты. В кристалле микросхемы имеют место по меньшей мере два физических явления: при высоких значениях концентраций генерируемых электронов и дырок роль ловушек снижается и диффузионные длины и времена жизни электронов и дырок возрастают; в *p*–*n*-переходах возникает фотовольтаический эффект, который приводит к появлению добавочных токов в транзисторных структурах микросхемы.

Литература

1. ***Тилл У., Лаксон Дж.*** Интегральные схемы: Материалы, приборы, изготовление / пер. с англ. М. Б. Левина, В. Г. Микуцкого. М.: Мир, 1985. 504 с.

2. Пат. 2799113 РФ. Способ повышения быстродействия транзисторов и транзисторных интегральных схем / ***С. Ш. Рехвиашвили, В. В. Нарожнов***; заявл. 18.03.2022; опубл. 04.07.2023, Бюл. № 19. 9 с. EDN: LBNUKU.

3. ***Володин В. Я.*** LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 389 с.

4. TTL Logic data book: Standard TTL, Schottky, low-power Schottky circuits. Rev. ed. Dallas: Texas Instruments, 1988. 1100 p.

5. ***Степаненко И. П.*** Основы микроэлектроники. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Лаб. базовых знаний, 2003. 488 с.

6. ***Гусев В. Г., Гусев Ю. М.*** Электроника и микропроцессорная техника. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2005. 790 с.

7. Полупроводники / пер. с англ.; под ред. ***Н. Б. Хеннея***. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 667 с.

8. ***Бородовский П. А., Булдыгин А. Ф., Токарев А. С.*** О некоторых эффектах, наблюдаемых при СВЧ-измерениях времени жизни в слитках кремния // Микроэлектроника. 2006. Т. 35. № 6. С. 403–408. EDN: HZFTHV.

9. ***Бородовский П. А., Булдыгин А. Ф., Голод С. В.*** Аномальная релаксация фотопроводимости в кремнии при высоких уровнях инжекции // ФТП. 2009. Т. 43. № 3. С. 329–331. EDN: RCPWYT.

10. Measurement of photo capacitance in amorphous silicon photodiodes / ***D. Gonçalves, L. M. Fernandes, P. Louro et al.*** // Technological innovation for the Internet of Things: 4th IFIP WG 5.5/SOCOLNET doctoral conference on computing, electrical and industrial systems (DoCEIS 2013). Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. P. 547–554. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37291-9_59

Статья поступила в редакцию 28.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 03.10.2023 г.;
принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Рехвиашвили Серго Шотович – доктор физико-математических наук, заведующий отделом теоретической и математической физики Института прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, 360000, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89А), rsergo@mail.ru

Гаев Дахир Сайдулахович – кандидат химических наук, директор Научно-технологического центра микроэлектроники и нанотехнологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, 360004, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), dahir@mail.ru

References

1. Till W. C., Luxon J. T. *Integrated circuits: Materials, devices, and fabrication.* Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1982. x, 452 p.

2. Rekhviashvili S. Sh., Narozhnov V. V. *Method for increasing speed of transistors and transistor integrated circuits.* Patent 2799113 RF, publ. 04.07.2023, Bull. no. 19. 9 p. (In Russian). EDN: LBNUKU.

3. Volodin V. Ya. *LTspice: Computer simulation of electronic circuits.* St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2010. 389 p. (In Russian).

4. *TTL Logic data book: Standard TTL, Schottky, low-power Schottky circuits.* Rev. ed. Dallas, Texas Instruments, 1988. 1100 p.

5. Stepanenko I. P. *Fundamentals of microelectronics.* 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Lab. bazovykh znaniy Publ., 2003. 488 p. (In Russian).

6. Gusev V. G., Gusev Yu. M. *Electronics and microprocessor technology.* 3rd ed., rev. and upd. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2005. 790 p. (In Russian).

7. Hannay N. B., ed. *Semiconductors.* N. Y., Reinhold, 1959. xxiii, 767 p.

8. Borodovskii P. A., Buldygin A. F., Tokarev A. S. Anomalous photoconductivity decay observed in microwave measurements of carrier lifetime in silicon ingots. *Russ. Microelectron.*, 2006, vol. 35, iss. 6, pp. 345–349. https://doi.org/10.1134/S1063739706060011

9. Borodovskii P. A., Buldygin A. F., Golod S. V. Anomalous relaxation of photoconductivity in silicon at high excitation levels. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, iss. 3, pp. 310–312. https://doi.org/10.1134/S1063782609030099

10. Gonçalves D., Fernandes L. M., Louro P., Vieira M., Fantoni A. Measurement of photo capacitance in amorphous silicon photodiodes. *Technological innovation for the Internet of Things:* 4th IFIP WG 5.5/SOCOLNET doctoral conference on computing, electrical and industrial systems (DoCEIS 2013). Berlin, Heidelberg, Springer, 2013, pp. 547–554. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37291-9_59

The article was submitted 28.08.2023; approved after reviewing 03.10.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Sergo Sh. Rekhviashvili – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of the of Theoretical and Mathematical Physics Department, Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Russia, 360000, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Shortanov st., 89A), rsergo@mail.ru

Dakhir S. Gaev – Cand. Sci. (Chem.), Director of the Scientific and Technological Center of Microelectronics and Nanotechnology, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, 360004, Kabardino-Balkarian Republic, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), dahir@mail.ru

Научная статья
УДК 621.318.433
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-319-330
EDN: AHOKOP

Алгоритм проектирования *LC*-контуров с параллельной компенсацией в приемном контуре для систем индуктивного питания

Р. Р. Аубакиров, К. О. Гуров, А. А. Данилов

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

aubakirov@bms.zone

Аннотация. Алгоритмы, основанные на методах оптимизации геометрии катушек, позволяют повышать устойчивость к смещениям без усложнения конструкции, как это происходит при использовании разных форм обратной связи. Существенной особенностью таких алгоритмов является необходимость учета схемы параллельной или последовательной компенсации реактивной мощности в передающем и принимающем *LC*-контурах. В работе на основе предложенного ранее алгоритма для систем с последовательной компенсацией в приемном и передающем контурах разработан алгоритм для систем с последовательной компенсацией в передающей части и параллельной компенсацией в приемной части. Данный алгоритм учитывает допустимое значение индуктивности катушки в принимающем контуре при заданных рабочей частоте и компенсирующей емкости. Преимущество представленного алгоритма проектирования заключается в разрабатываемых с его помощью системах индуктивной передачи энергии с высокой устойчивостью к смещениям катушечной пары с помощью оптимальной геометрии катушек без усложнения конструкции системы индуктивной передачи энергии. Разработанная система работает на резонансной частоте и в области сверхкритической связи, что обеспечивает высокие эффективность передачи энергии и уровень выходной мощности. Выполнено проектирование систем с номинальной мощностью 0,1 Вт и рабочими частотами 6,78 МГц и 880 кГц. Требования по устойчивости к обеим система сформулированы так: ΔP_L не более 0,01 Вт (10 % от номинала) для боковых смещений в пределах 0–30 мм, т. е. при боковых смещениях, достигающих радиуса принимающей катушки. Осевое расстояние между катушками принято постоянным и равно 10 мм. Показано, что разработанный алгоритм позволяет проектировать передающий и принимающий *LC*-контуры так, что перепад выходной мощности не превышает 10 % от номинала для смещений, достигающих радиуса приемной катуш-

© Р. Р. Аубакиров, К. О. Гуров, А. А. Данилов, 2024

ки индуктивности. Паразитные эффекты, которые не учитываются в алгоритме, могут приводить к уменьшению выходной мощности системы на 3–7 %, что можно компенсировать увеличением напряжения питания или увеличением заданной номинальной мощности на 2–4 % при использовании алгоритма для проектирования системы.

Ключевые слова: индуктивная передача энергии, алгоритм проектирования, катушечная пара, геометрическая оптимизация, биомедицинская электроника

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (Соглашение № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.).

Для цитирования: Аубакиров Р. Р., Гуров К. О., Данилов А. А. Алгоритм проектирования *LC*-контуров с параллельной компенсацией в приемном контуре для систем индуктивного питания // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 319–330. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-319-330. – EDN: AHOKOP.

Original article

Algorithm for designing *LC* circuits with parallel compensation in the receiving circuit for inductive power systems

R. R. Aubakirov, K. O. Gurov, A. A. Danilov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

aubakirov@bms.zone

Abstract. Algorithms based on coil geometry optimization allow increasing the displacement resistance without complicating the design, as happens when using various forms of feedback. An essential feature of such algorithms is the need to consider the scheme of parallel or tandem compensation of reactive power in the transmitting and receiving *LC* circuits. In this work, based on previously proposed algorithm for systems with tandem compensation in the receiving and transmitting circuits a new algorithm is developed for systems with tandem compensation in the transmitting circuit and parallel compensation in the receiving circuit. The algorithm being proposed considers the allowable value of coil inductance in the receiving circuit at specified values of operating frequency and balancing capacity. The advantage of the presented design algorithm lies in the systems of inductive energy transfer developed with its help that have high resistance to coil pair displacement due to optimal coil geometry without complicating the design of inductive energy transfer system. The developed system operates at the resonant frequency and in the region of supercritical coupling, which ensures high energy transfer efficiency and output power level. Systems design with a nominal power of 0.1 W and operating frequencies of 6.78 MHz and 880 kHz is implemented. The stability requirements for both systems have been formulated as follows: ΔP_L not more than 0.01 W (10 % of the nominal value) for lateral displacements within 0–30 mm, i. e. at lateral displacements reaching the radius of the receiving coil. The axial distance between coils is constant and equal to 10 mm. It was demonstrated that the developed algorithm makes it possible to design the transmitting and receiving *LC* circuits so that the output power drop does not exceed 10 % of the nominal value for

displacements reaching the radius of the receiving coil. Parasitic effects not considered in the algorithm can lead to a decrease in the output power of the system by 3–7 %, which can be compensated by increasing the supply voltage or by increasing the specified rated power by 2–4 % when using the algorithm for system design.

Keywords: inductive energy transfer, design algorithm, coil pair, geometric optimization, biomedical electronics

Funding: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-555 of 04/25/2024).

For citation: Aubakirov R. R., Gurov K. O., Danilov A. A. Algorithm for designing *LC* circuits with parallel compensation in the receiving circuit for inductive power systems. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 319–330. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-319-330. – EDN: AHOKOP.

Введение. Индуктивная передача энергии используется для питания бытовых приборов, мобильных устройств, сенсоров и датчиков [1–3], а также для имплантируемых медицинских приборов [4–7]. Развитие данной технологии во многом связано с совершенствованием методов автоматизации проектирования с применением формальных алгоритмов [8–16].

В начале разработки алгоритма необходимо задать целевую функцию. Среди целевых функций можно выделить группу функций, описывающих устойчивость системы к смещениям. К таким функциям относится мера однородности магнитного поля, генерируемого передающей катушкой [12]. Однако большая однородность магнитного поля не всегда соответствует меньшему перепаду выходной мощности при заданных смещениях [17]. Это делает предпочтительными алгоритмы, построенные с использованием в качестве целевой функции непосредственно выходной мощности и ее перепада при смещениях катушек. Следует отметить, что для достижения заданной устойчивости к смещениям возможно использование различных вариантов систем с подстройкой параметров, например алгоритм проектирования систем с переменным индуктором [10]. Недостатком таких систем является снижение надежности и увеличение стоимости устройства, в связи с чем предпочтение следует отдавать алгоритмам, обеспечивающим заданную устойчивость к смещениям за счет простой оптимизации геометрии катушечной пары.

В работе [18] описан разработанный алгоритм проектирования систем индуктивной передачи энергии (ИПЭ) с SS-компенсационной схемой к имплантатам, позволяющий обеспечить требуемый диапазон выходной мощности на протяжении всего заданного значения смещения катушек путем оптимизации параметров катушек, таких как число витков, внутренний радиус, внешний радиус передающей катушки. Алгоритм успешно прошел экспериментальную верификацию, показал большой потенциал и может быть применен и к другим компенсационным схемам. Однако использование того же алгоритма недопустимо. Кроме того, установлено, что для каждого типа компенсации необходим отдельный алгоритм проектирования [19].

Цель настоящей работы – создание алгоритма проектирования систем индуктивного питания имплантируемой биомедицинской электроники с последовательной компенсационной схемой в передающей плате и параллельной компенсационной схемой в приемной плате, устойчивых к боковым смещениям.

Материалы и методы исследования. Эквивалентная схема моделируемой системы ИПЭ с параллельной компенсационной схемой в приемном контуре представлена на рис. 1.

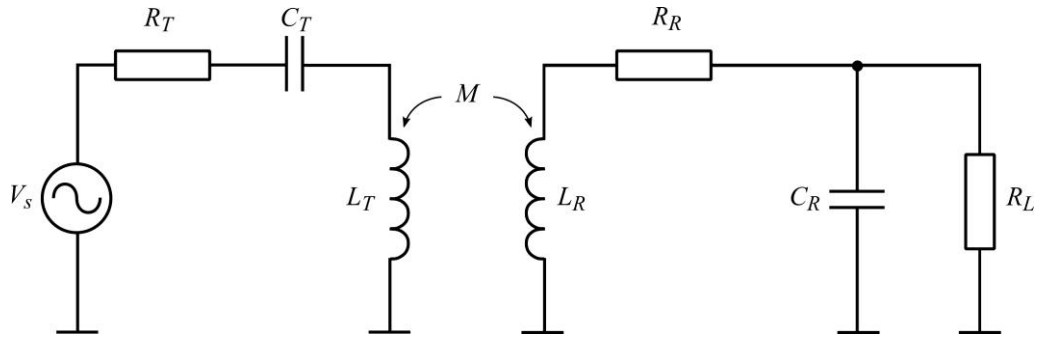


Рис. 1. Эквивалентная схема системы индуктивной передачи энергии с параллельной компенсацией в принимающей плате
Fig. 1. Equivalent circuit of the inductive power transmission system with parallel compensation in the receiving circuit

Выходную мощность P_L системы можно рассчитать по следующей формуле:

$$P_L = \frac{\omega^2 M^2 V_S^2 R_L}{(Z_T Z_R + \omega^2 M^2)^2 (1 + j\omega C_R R_L)^2},$$

где ω – угловая рабочая частота; M – взаимная индуктивность; V_S – напряжение питания; R_L – нагрузочное сопротивление; Z_T и Z_R – импедансы; C_R – емкость конденсатора.

Взаимная индуктивность M рассчитывается как

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oiint \frac{\overline{dl_t}\,\overline{dl_r}}{r_{tr}},$$

где μ – магнитная постоянная; r_{tr} – расстояние между элементами витков катушек dl_t и dl_r.

Импедансы равны:

$$Z_T = j\omega L_T + \frac{1}{j\omega C_T} + R_T,$$

$$Z_R = j\omega L_R + \frac{R_L}{1 + j\omega C_R R_L}.$$

В основу алгоритма проектирования положено задание требуемой устойчивости к смещениям, определяемой как заданный перепад мощности ΔP_L для заданного диапазона допустимых смещений катушек относительно друг друга:

$$\Delta P_L = \frac{P_{L\max}}{P_L} - 1 = 1 - \frac{P_{L\min}}{P_L}.$$

Алгоритм проектирования *LC*-контуров основан на подборе геометрических параметров катушек (внутреннего радиуса, числа витков приемной и передающей катушек, внешнего радиуса передающей катушки) и номиналов конденсаторов в передающем и принимающем контурах. Геометрические параметры подбирали при следующих

условиях: взаимная индуктивность M находится в диапазоне, соответствующем допустимому перепаду мощности на всем диапазоне допустимых смещений; внутренние радиусы катушек ($r_{in} = r_{inT} = r_{inR}$) обеспечивают нахождение максимальной взаимной индуктивности $M_{\max}$ в требуемом диапазоне. Если внутренние радиусы катушек достигают физических минимумов (меньше радиуса сечения провода) и при этом $M_{\max}$ находится вне требуемого диапазона, то число витков K в приемной катушке уменьшается на единицу. Если число витков достигает единицы, то оптимизация при заданных требованиях невозможна. Для того чтобы увеличить минимальное значение взаимной индуктивности $M_{\min}$ до требуемого диапазона, увеличивали внешний радиус r_{outT} передающей катушки и число ее витков.



Рис. 2. График допустимых значений собственной индуктивности принимающей катушки системы ИПЭ с SP-компенсацией на рабочей резонансной частоте 6,78 МГц

Fig. 2. Graph of the permissible values of the self-inductance of the receiving coil of the inductive power transmission system with SP-compensation with operating resonant frequency of 6.78 MHz

Системы ИПЭ работают на резонансной частоте, общей для двух контуров. Для систем с SP-компенсацией резонансная частота рассчитывается по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_T C_T}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} \sqrt{\frac{L_R/C_R - R_L^2}{L_R/C_R - R_R^2}}.$$

Как видно из данной формулы, соотношение L_R/C_R должно быть больше R_L^2 (сопротивление приемной катушки R_R в рассматриваемом случае принято равным нулю). Это условие ограничивает диапазон допустимых значений собственной индуктивности принимающей катушки (рис. 2).

Параллельная компенсационная схема налагает следующие ограничения: наращивание витков приемной катушки ограничено; сопротивление нагрузки должно быть намного больше сопротивления на передающем контуре.

Разработка и верификация алгоритма проектирования систем ИПЭ. На основе разработанного ранее алгоритма проектирования для последовательной компенсации предлагается новый алгоритм для представленного в работе *LC*-контура (рис. 3). Решением для ограничений компенсационной схемы стало уменьшение оптимизационной нагрузки на принимающую катушку путем дополнительного вычитания витка из передающей катушки ($N - 1$).

С помощью разработанного алгоритма спроектированы две системы ИПЭ с номинальной выходной мощность 0,1 Вт и рабочими частотами 880 кГц и 6,78 МГц. Требования по устойчивости к обеим система сформулированы так: ΔP_L не более 0,01 Вт (10 % от номинала) для боковых смещений ρ в пределах 0–30 мм, т. е. при боковых смещениях, достигающих значения радиуса принимающей катушки r_{outR}. Осевое расстояние между катушками d постоянно и равно 10 мм. Остальные константы и начальные значения представлены в табл. 1.

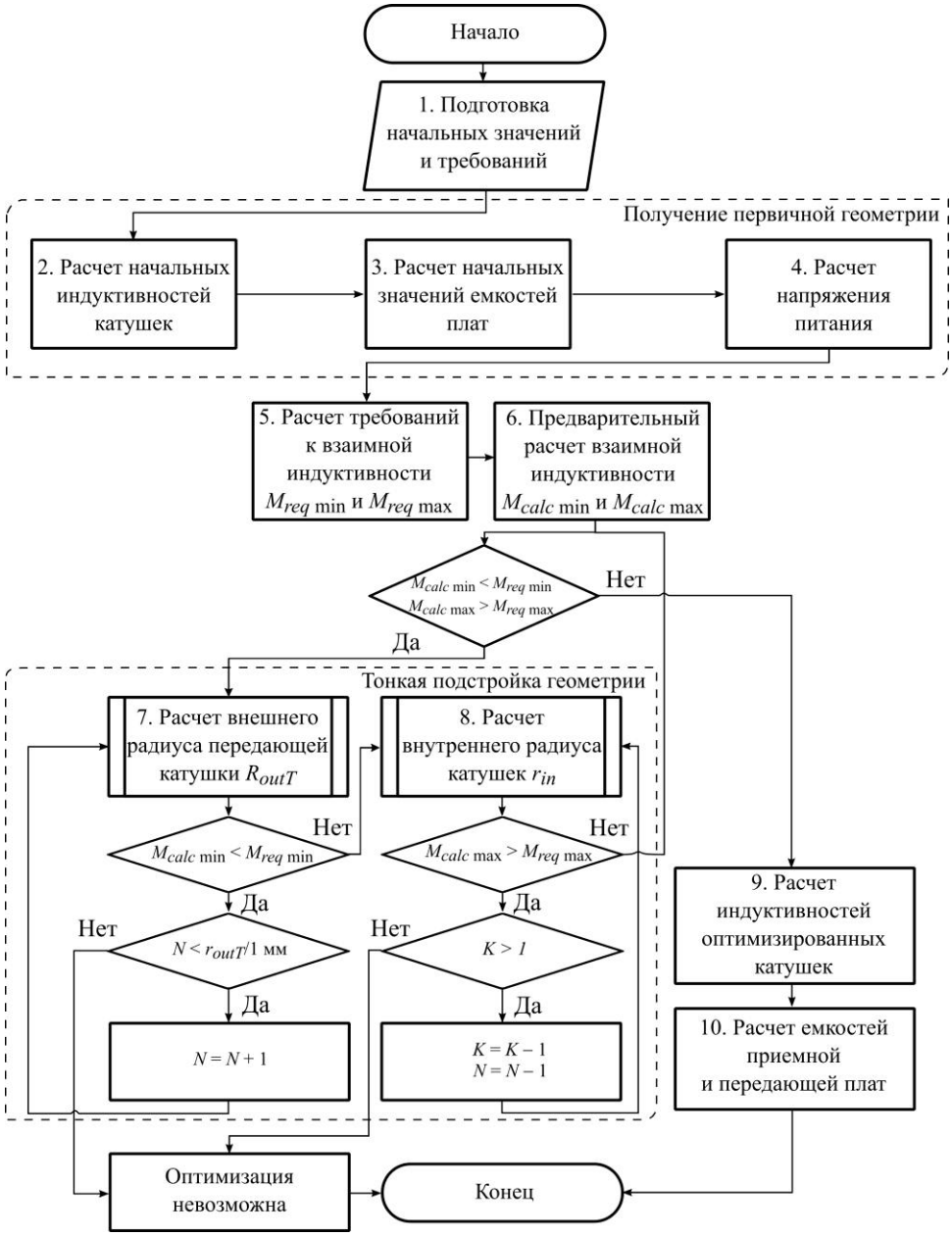


Рис. 3. Блок-схема алгоритма проектирования систем ИПЭ с параллельной компенсационной схемой в принимающем контуре
Fig. 3. Block diagram of the algorithm for designing an inductive power transmission systems with a parallel compensation circuit in the receiving circuit

Таблица 1

Начальные значения проектируемых систем ИПЭ

Table 1

Initial values of the inductive power transfer systems being designed

Параметр	Рабочая частота системы ИПЭ	
	6,78 МГц	880 кГц
Начальная емкость конденсаторов $C_T = C_R$, нФ	1	20
Сопротивление нагрузки R_L, Ом	100	100
Сопротивление передающего контура R_T, Ом	10	10

Результаты и их обсуждение. Результаты проектирования представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Основные параметры спроектированной системы ИПЭ с рабочей частотой 6,78 МГц

Table 2

Main parameters of the designed inductive power transfer system with an operating frequency 6.78 MHz

Параметр	Контур	
	передающий	принимающий
Внешний радиус r_{out}, мм	42,7	30
Внутренний радиус r_{in}, мм	27,6	27,6
Число витков N	3	2
Собственная индуктивность L, мкГн	1,02	0,52
Емкость C, нФ	0,54	1
Сопротивление R, Ом	10	100
Выходная мощность P, Вт	0,1	
Перепад мощности ΔP, %	8,1	
Напряжение питания V_S, В	2,1	

Таблица 3

Основные параметры спроектированной системы ИПЭ с рабочей частотой 880 кГц

Table 3

Main parameters of the designed inductive power transfer system with an operating frequency 880 kHz

Параметр	Контур	
	передающий	принимающий
Внешний радиус r_{out}, мм	45	30
Внутренний радиус r_{in}, мм	23,6	23,6
Число витков N	5	4
Собственная индуктивность L, мкГн	2,26	1,51
Емкость C, нФ	14,5	21,5
Сопротивление R, Ом	10	100
Выходная мощность P, Вт	0,1	
Перепад мощности ΔP, %	8,4	
Напряжение питания V_S, В	2,1	

Поскольку существенным ограничением разработанного алгоритма является использование математического аппарата, разработанного для идеальных компонентов, выполнены верификации результатов и оценка отклонения результатов для идеальной системы от результатов с учетом влияния паразитных эффектов на основе численного эксперимента.

Паразитные эффекты учитывали с помощью моделирования работы разработанных систем в среде проектирования LTSpice, а также дополнительно с помощью такого же моделирования, но для индуктивности катушек, полученной с помощью расчетов в симуляторе COMSOL. Верификацию и оценку отклонения результатов осуществляли путем сопоставления зависимости выходной мощности от бокового смещения. Полученные результаты для системы с рабочей частотой 6,78 МГц представлены на рис. 4, *а*.

Максимальное значение выходной мощности для моделей с учетом паразитных эффектов меньше значения этого параметра для идеальной системы примерно на 4 % (0,11 Вт для идеальной системы; 0,106 Вт для моделирования в LTSpice и моделирования в LTSpice и COMSOL). Аналогичные отклонения получены и для минимальных значений. При этом характерные формы кривых подобны, что указывает на достоверность полученных результатов. Снижение максимальной выходной мощности может быть компенсировано за счет увеличения напряжения источника. На рис. 4, *б* показаны результаты моделирования с увеличенным напряжением питания: увеличение на 2 % (с 2,1 до 2,14 В) позволяет добиться совпадения максимальной выходной мощности.

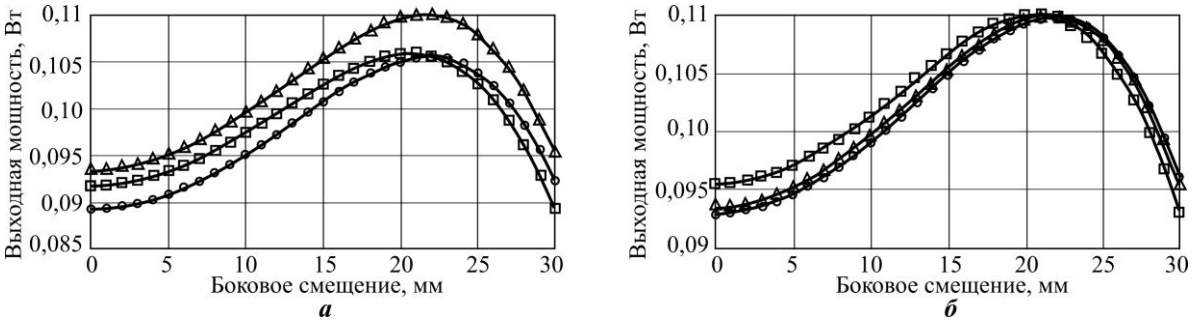


Рис. 4. Зависимости выходной мощности от бокового смещения для систем ИПЭ с рабочей частотой 6,78 МГц до корректировки питания (*а*) и с корректировкой (*б*): Δ – Matlab; ○ – LTSpice; □ – LTSpice и COMSOL

Fig. 4. Dependences of output power on lateral displacement for the inductive power transmission systems with operating resonant frequency of 6.78 MHz before power adjustment (*a*) and with adjustment (*b*): Δ – Matlab; ○ – LTSpice; □ – LTSpice and COMSOL

Для системы с рабочей частотой 880 кГц результаты в основном аналогичны результатам, полученным для системы с рабочей частотой 6,78 МГц, но отклонение максимальной выходной мощности несколько ниже для моделирования в LTSpice (3 мВт, или 3 %) и выше для моделирования в LTSpice и COMSOL (7 мВт, или 7 %) (рис. 5, *а*). Эти отклонения также могут быть скомпенсированы путем увеличения напряжения питания (рис. 5, *б*).

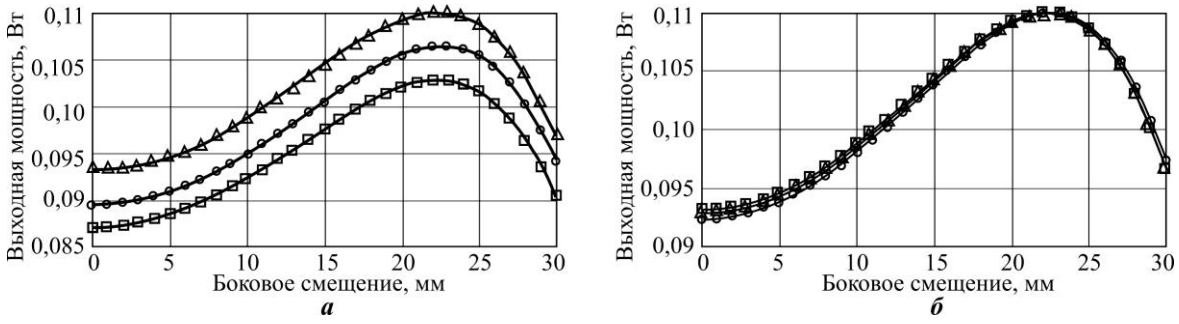


Рис. 5. Зависимости выходной мощности от бокового смещения для системы ИПЭ с рабочей частотой 880 кГц до корректировки питания (*а*) и с корректировкой (*б*): Δ – Matlab; ○ – LTSpice; □ – LTSpice и COMSOL

Fig. 5. Dependences of output power on lateral displacement for the inductive power transmission systems with operating resonant frequency of 880 kHz before power adjustment (*a*) and with adjustment (*b*): Δ – Matlab; ○ – LTSpice; □ – LTSpice and COMSOL

Заключение. Особенность разработанного алгоритма для систем с последовательной компенсацией в передающей части и параллельной компенсацией в приемной части (такие системы обычно используют для потребителей мощность 0,1–0,5 Вт) – учет допустимого значения индуктивности катушки в принимающем контуре при заданных рабочей частоте и компенсирующей емкости. Преимущество разработанного алгоритма – возможность его использования для проектирования систем ИПЭ с высокой устойчивостью к смещениям катушечной пары с помощью подстройки геометрии катушек без усложнения конструкции системы ИПЭ. Разработанная система также будет работать на резонансной частоте и в области сверхкритической связи, что обеспечивает высокий уровень выходной мощности и эффективности.

Проектирование систем с номинальной мощностью 0,1 Вт и рабочими частотами 6,78 МГц и 880 кГц с передающим и принимающим *LC*-контурами с помощью разработанного алгоритма показало, что перепад выходной мощности не превышает 10 % от номинала для смещений, достигающих значений радиуса приемной катушки индуктивности. При сравнении результатов моделирования для идеальной системы и результатов моделирования с учетом паразитных эффектов установлено, что в последнем случае выходная мощность снижается на 3–7 %. Такое снижение может быть компенсировано увеличением напряжения питания или заранее учтено при проектировании систем путем задания для алгоритма номинальной выходной мощности на 3–7 % выше требуемой по техническому заданию.

Литература

1. ***Triviño A., González-González J. M., Aguado J. A.*** Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: A review // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 6. Art. No. 1547. https://doi.org/10.3390/en14061547

2. ***Feng J., Li Q., Lee F. C., Fu M.*** Transmitter coils design for free-positioning omnidirectional wireless power transfer system // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15. Iss. 8. P. 4656–4664. https://doi.org/10.1109/TII.2019.2908217

3. Wireless power transfer for future networks: Signal processing, machine learning, computing, and sensing / ***B. Clerckx, K. Huang, L. R. Varshney et al.*** // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2021. Vol. 15. Iss. 5. P. 1060–1094. https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3098478

4. Battery-free and wireless technologies for cardiovascular implantable medical devices / ***J. Zhang, R. Das, J. Zhao et al.*** // Adv. Mater. Technol. 2022. Vol. 7. Iss. 6. Art. ID: 2101086. https://doi.org/10.1002/admt.202101086

5. ***Khan S. R., Pavuluri S. K., Cummins G., Desmulliez M. P. Y.*** Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review // Sensors. 2020. Vol. 20. Iss. 12. Art. No. 3487. https://doi.org/10.3390/s20123487

6. ***Nelson B. D., Karipott S. S., Wang Y., Ong K. G.*** Wireless technologies for implantable devices // Sensors. 2020. Vol. 20. Iss. 16. Art. No. 4604. https://doi.org/10.3390/s20164604

7. ***Das R., Moradi F., Heidari H.*** Biointegrated and wirelessly powered implantable brain devices: A review // IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems. 2020. Vol. 14. Iss. 2. P. 343–358. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2020.2966920

8. ***Zhao W., Peng Y., Zhan S., Wang H.*** Design and optimization of litz-wire planar spiral coil for inductive power transfer application: preprint // TechRxiv [Электронный ресурс]. 07.04.2023. https://doi.org/10.36227/techrxiv.22491235.v1 (дата обращения: 04.03.2024).

9. An automatic coil design method with modified AC resistance evaluation for achieving maximum coil–coil efficiency in WPT systems / ***G. Wei, X. Jin, C. Wang et al.*** // IEEE Transactions on Power Electronics. 2020. Vol. 35. Iss. 6. P. 6114–6126. https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2952120

10. An integrated inductive power transfer system design with a variable inductor for misalignment tolerance and battery charging applications / ***Z. Zhang, F. Zhu, D. Xu et al.*** // IEEE Transactions on Power Electronics. 2020. Vol. 35. Iss. 11. P. 11544–11556. https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2987906

11. ***Simonazzi M., Campanini A., Sandrolini L., Rossi C.*** Design procedure based on maximum efficiency for wireless power transfer battery chargers with lightweight vehicle assembly // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 1. Art. No. 70. https://doi.org/10.3390/en15010070

12. Optimization design of resonance coils with high misalignment tolerance for drone wireless charging based on genetic algorithm / ***C. Rong, X. He, Y. Wu et al.*** // IEEE Transactions on Industry Applications. 2022. Vol. 58. Iss. 1. P. 1242–1253. https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3057574

13. ***Zhou W., Ma H.*** Design considerations of compensation topologies ICPT system // APEC 07 – Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Anaheim, CA: IEEE, 2007. P. 985–990. https://doi.org/10.1109/APEX.2007.357634

14. ***Sallán J., Villa J. L., Llombart A., Sanz J. F.*** Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56. Iss. 6. P. 2140–2149. https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015359

15. ***Wang Y., Yao Y., Liu X., Xu D.*** S/CLC compensation topology analysis and circular coil design for wireless power transfer // IEEE Transactions on Transportation Electrification. 2017. Vol. 3. Iss. 2. P. 496–507. https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2651067

16. A review of compensation topologies and control techniques of bidirectional wireless power transfer systems for electric vehicle applications / ***M. Venkatesan, N. Rajamanickam, P. Vishnuram et al.*** // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 20. Art. No. 7816. https://doi.org/10.3390/en15207816

17. ***Aubakirov R., Danilov A.*** Magnetic and coupling approach to optimizing inductive power transfer systems // 2022 Wireless Power Week (WPW). Bordeaux: IEEE, 2022. P. 788–791. https://doi.org/10.1109/WPW54272.2022.9901361

18. An algorithm for the computer aided design of coil couple for a misalignment tolerant biomedical inductive powering unit / ***A. A. Danilov, R. R. Aubakirov, E. A. Mindubaev et al.*** // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 70755–70769. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919259

19. ***Aubakirov R., Danilov A. A.*** Difference in geometrically optimized wireless power transmission systems with SS and SP compensations // 2021 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). San Diego, CA: IEEE, 2021. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/WoW51332.2021.9462884

Статья поступила в редакцию 11.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 06.09.2023 г.;
принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Аубакиров Рафаэль Рафаэльевич – аспирант Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aubakirov@bms.zone

Гуров Константин Олегович – аспирант Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), constantinegurov@yandex.ru

Данилов Арсений Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), arseny.danilov@gmail.com

References

1. Triviño A., González-González J. M., Aguado J. A. Wireless power transfer technologies applied to electric vehicles: A review. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 6, art. no. 1547. https://doi.org/10.3390/en14061547

2. Feng J., Li Q., Lee F. C., Fu M. Transmitter coils design for free-positioning omnidirectional wireless power transfer system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, iss. 8, pp. 4656–4664. https://doi.org/10.1109/TII.2019.2908217

3. Clerckx B., Huang K., Varshney L. R., Ulukus S., Alouini M.-S. Wireless power transfer for future networks: Signal processing, machine learning, computing, and sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, vol. 15, iss. 5, pp. 1060–1094. https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3098478

4. Zhang J., Das R., Zhao J., Mirzai N., Mercer J., Heidari H. Battery-free and wireless technologies for cardiovascular implantable medical devices. *Adv. Mater. Technol.*, 2022, vol. 7, iss. 6, art. ID: 2101086. https://doi.org/10.1002/admt.202101086

5. Khan S. R., Pavuluri S. K., Cummins G., Desmulliez M. P. Y. Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 12, art. no. 3487. https://doi.org/10.3390/s20123487

6. Nelson B. D., Karipott S. S., Wang Y., Ong K. G. Wireless technologies for implantable devices. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 16, art. no. 4604. https://doi.org/10.3390/s20164604

7. Das R., Moradi F., Heidari H. Biointegrated and wirelessly powered implantable brain devices: A review. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2020, vol. 14, iss. 2, pp. 343–358. https://doi.org/10.1109/TBCAS.2020.2966920

8. Zhao W., Peng Y., Zhan S., Wang H. Design and optimization of litz-wire planar spiral coil for inductive power transfer application, preprint. *TechRxiv*. 07.04.2023. Available at: https://doi.org/10.36227/techrxiv.22491235.v1 (accessed: 04.03.2024).

9. Wei G., Jin X., Wang C., Feng J., Zhu C., Milyaev I. M. An automatic coil design method with modified AC resistance evaluation for achieving maximum coil–coil efficiency in WPT systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, iss. 6, pp. 6114–6126. https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2952120

10. Zhang Z., Zhu F., Xu D., Krein P. T., Ma H. An integrated inductive power transfer system design with a variable inductor for misalignment tolerance and battery charging applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, vol. 35, iss. 11, pp. 11544–11556. https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2987906

11. Simonazzi M., Campanini A., Sandrolini L., Rossi C. Design procedure based on maximum efficiency for wireless power transfer battery chargers with lightweight vehicle assembly. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 1, art. no. 70. https://doi.org/10.3390/en15010070

12. Rong C., He X., Wu Y., Qi Y., Wang R., Sun Y., Liu M. Optimization design of resonance coils with high misalignment tolerance for drone wireless charging based on genetic algorithm. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, vol. 58, iss. 1, pp. 1242–1253. https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3057574

13. Zhou W., Ma H. Design considerations of compensation topologies ICPT system. *APEC 07 – Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition.* Anaheim, CA, IEEE, 2007, pp. 985–990. https://doi.org/10.1109/APEX.2007.357634

14. Sallán J., Villa J. L., Llombart A., Sanz J. F. Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, iss. 6, pp. 2140–2149. https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015359

15. Wang Y., Yao Y., Liu X., Xu D. S/CLC compensation topology analysis and circular coil design for wireless power transfer. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2017, vol. 3, iss. 2, pp. 496–507. https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2651067

16. Venkatesan M., Rajamanickam N., Vishnuram P., Bajaj M., Blazek V., Prokop L., Misak S. A review of compensation topologies and control techniques of bidirectional wireless power transfer systems for electric vehicle applications. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 20, art. no. 7816. https://doi.org/10.3390/en15207816

17. Aubakirov R., Danilov A. Magnetic and coupling approach to optimizing inductive power transfer systems. *2022 Wireless Power Week (WPW).* Bordeaux, IEEE, 2022, pp. 788–791. https://doi.org/10.1109/WPW54272.2022.9901361

18. Danilov A. A., Aubakirov R. R., Mindubaev E. A., Gurov K. O., Telyshev D. V., Selishchev S. V. An algorithm for the computer aided design of coil couple for a misalignment tolerant biomedical inductive powering unit. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 70755–70769. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919259

19. Aubakirov R., Danilov A. A. Difference in geometrically optimized wireless power transmission systems with SS and SP compensations. *2021 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW).* San Diego, CA, IEEE, 2021, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/WoW51332.2021.9462884

The article was submitted 11.07.2023; approved after reviewing 06.09.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Rafael R. Aubakirov – PhD student of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aubakirov@bms.zone

Konstantin O. Gurov – PhD student of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), constantinegurov@yandex.ru

Arseny A. Danilov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), arseny.danilov@gmail.com

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



RUSSIAN MICROELECTRONICS
Vol. 52, *No.* 7, 2023. – ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,
в котором опубликованы избранные статьи
журнала «Известия вузов. Электроника».

http://pleiades.online
http://link.springer.com

Научная статья
УДК 681.586.72
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-331-345
EDN: AHUVXS

Применение инерциальных МЭМС-модулей в сканирующей LiDAR-системе

А. А. Галкин[1,2], П. В. Еркин[1,2], В. П. Захаров[1,2], Н. А. Соломкина[1,2], А. С. Тимошенков[2], С. П. Тимошенков[1]

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*ООО «Лаборатория Микроприборов», г. Москва, Россия*

at@mp-lab.ru

Аннотация. Технология LiDAR (Ligt Detection and Ranging) позволяет определять расстояние до объектов за счет измерения времени отражения импульса излучения и таким образом воссоздает виртуальную карту (облако точек). Однако LiDAR-система без инерциально-спутниковой навигационной системы, которая позволяет вычислить положение и ориентацию LiDAR-системы в пространстве, не может корректно построить облако точек, поскольку определяет только расстояние до объектов. Интегрированная система синхронизирует во времени данные LiDAR-системы и инерциально-спутниковой навигационной системы, после чего переводит данные LiDAR-системы в глобальную систему координат UTM и формирует облако точек. В работе представлены интегрированная система лазерного сканирования, включающая в себя инерциально-спутниковую навигационную систему на МЭМС-датчиках и LiDAR-систему, а также алгоритм построения облака точек. Спроектирована интегрированная сканирующая система на инерциальных МЭМС-датчиках с применением глобальной навигационной спутниковой системы и LiDAR-системы, по данным которой с помощью специализированного программного обеспечения построено облако точек. Опытный образец данной системы успешно протестирован на наземном носителе. По данным испытаний оценена практическая и теоретическая погрешности системы. Расхождение погрешностей обусловлено несоответствием практической погрешности определения координат сканирующей системы теоретической. Дальнейшие исследования заключаются в разработке автоматического алгоритма минимизации погрешностей путем подбора углов доворота инерциально-спутниковой навигационной системы и LiDAR-системы.

© А. А. Галкин, П. В. Еркин, В. П. Захаров, Н. А. Соломкина, А. С. Тимошенков, С. П. Тимошенков, 2024

Ключевые слова: МЭМС, глобальная навигационная спутниковая система, инерциальная навигация, LiDAR-система, картография, автономный транспорт

Для цитирования: Применение инерциальных МЭМС-модулей в сканирующей LiDAR-системе / А. А. Галкин, П. В. Еркин, В. П. Захаров и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 331–345. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-331-345. – EDN: AHUVXS.

Original article

Application of inertial MEMS modules in a scanning LiDAR system

A. A. Galkin[1,2], P. V. Erkin[1,2], V. P. Zaharov[1,2], N. A. Solomkina[1,2], A. S. Timoshenkov[2], S. P. Timoshenkov[1]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]"Laboratory of Microdevices" LLC, Moscow, Russia

at@mp-lab.ru

Abstract. The LiDAR technology allows determining the distance to objects by measuring radiation pulse reflection time and therefore recreates a virtual map (point cloud). However, LiDAR system without inertial satellite navigation system allowing calculation of its position and spatial orientation cannot construct point cloud correctly because LiDAR system determines only the distance to objects. Integrated system synchronizes in time the LiDAR system and inertial satellite navigation system data upon which it converts LiDAR system data to the global coordinate system UTM and creates point cloud. In this work, an integrated laser scanning system including inertial satellite navigation system based on MEMS sensors and LiDAR system, and a point cloud construction algorithm are presented. An integrated scanning system was designed using inertial MEMS sensors, global navigation satellite system and LiDAR system, on data from which a point cloud was constructed using specialized software. A prototype of this system was successfully tested on a ground-mounted carrier. Based on the test data, the practical and theoretical errors of the system were estimated. The errors' mismatch is due to discrepancy between the scanning system's practical positioning error and theoretical error. Further research of this topic is to develop an automatic algorithm for minimizing errors by selecting the rotation angles of the inertial satellite navigation system and LiDAR system.

Keywords: MEMS, global navigation satellite system, inertial navigation, LiDAR system, mapping, autonomous transport

For citation: Galkin A. A., Erkin P. V., Zaharov V. P., Solomkina N. A., Timoshenkov A. S., Timoshenkov S. P. Application of inertial MEMS modules in a scanning LiDAR system. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 331–345. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-331-345. – EDN: AHUVXS.

Введение. Технология LiDAR (Light Detection and Ranging) основывается на определении расстояния до объектов за счет передачи импульса видимого, инфракрасного или ультрафиолетового излучений и приема импульса, отраженного от объекта. Данная технология применяется в климатологии для изучения состава атмосферы, облаков, испарений и глобального потепления; океанографии для исследования береговой эрозии; ботанике для измерения изменяющейся структуры лесов; оборудовании для измерения скорости автомобилей; картографии для создания виртуальной трехмерной карты из облака точек, полученных при сканировании, например, города; транспортных средствах для распознавания препятствий и вычисления расстояния до них [1–3]. Кроме того, в некоторых смартфонах LiDAR-система встроена в камеру и используется для 3D-сканирования и создания дополненной реальности, например «воссоздания» на экране смартфона архитектурных сооружений, которые по каким-либо причинам были уничтожены [4, 5].

Однако построение облака точек для создания трехмерной карты с использованием технологии LiDAR невозможно без глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и инерциальных датчиков [6]. Эти устройства выполняют роль географической привязки за счет определения координат и ориентации LiDAR-системы. Приемник сигнала ГНСС определяет координаты сканирующей системы, но этого недостаточно, поскольку нет информации об ориентации системы. Такая информация может быть получена с помощью инерциальных датчиков.

Сканирующая система генерирует более 1 млн импульсов в секунду. В идеальном случае для точного определения координат каждой точки необходимо вычислять координаты и ориентацию сканирующей системы с частотой не менее 1 МГц. Поскольку полоса пропускания инерциальных датчиков чаще всего составляет от десятков гигагерц до единиц килогерц, а частота обновления данных ГНСС не превышает 10–20 Гц, такое определение координат и ориентации не представляется возможным. При комплексировании данных ГНСС и инерциальных данных с помощью фильтра Калмана можно получить частоту обновления навигационных данных порядка 1 кГц [7], а на микросекундном масштабе для уточнения координат и ориентации применить линейную или полиномиальную интерполяцию.

Цель настоящей работы – создание интегрированной системы с инерциальными МЭМС-датчиками, ГНСС и LiDAR-системой, а также алгоритма обработки данных и построения облака точек.

Разработка конструкции и изготовление системы. Для разработки конструкции подобрана необходимая аппаратура и составлена схема подключения этой аппаратуры (рис. 1). Система содержит следующие основные блоки аппаратуры:

– система управления. Блок реализован на одноплатном компьютере Raspberry Pi, он отвечает за взаимодействие всех блоков между собой и осуществляет контроль работы системы;

– система позиционирования и ориентации. Блок выполнен на интегрированной системе инерциальных датчиков (датчика угловой скорости, акселерометра, магнитометра) с приемниками ГНСС – инерциальный модуль ГКВ-6 [9] и ГНСС-антенна Ublox [10], подключаемая к нему;

– система измерения расстояний. Блоком является подсистема LiDAR (Velodyne, США) [11], которая измеряет расстояние до объектов на дистанциях до 100 м;

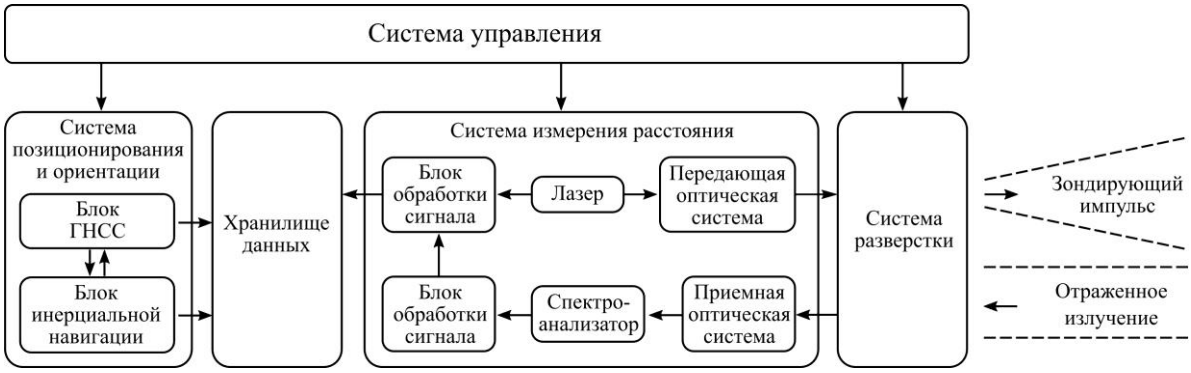


Рис. 1. Схема LiDAR-системы [8]
Fig. 1. Scheme of the LiDAR system [8]

– система разверстки. Блоком является подсистема LiDAR, которая позволяет направлять и фокусировать исходящие и поступающие световые волны;

– хранилище данных. Блок реализован с помощью памяти компьютера Raspberry Pi и нужен для приема и хранения выходных данных систем позиционирования и измерения расстояний.

Автономную работу системы поддерживает внешний источник питания.

Разработана модель конструкции, в которой учтены особенности крепления составных частей и их оптимальное расположение (рис. 2). Например, важно располагать LiDAR-систему под углом 45°, поскольку конструктивно ее лучи расходятся на угол 2°, и если система будет расположена вертикально, а расстояние до объекта близко к предельному, это может привести к малой плотности точек в облаке, также ГНСС-антенны должны располагаться под открытым небом, а электроника должна быть закрыта от внешних воздействий. При проектировании учтены способы крепления к рейлингам автомобиля для динамических тестов. Модель конструкции размером 1000 × 250 × 400 мм представляет собой кожух из листов фанеры толщиной 10 мм. Фанера выбрана для облегчения конструкции и уменьшения стоимости изготовления. На рис. 3 показана модель конструкции LiDAR-системы с размещенными составными частями.

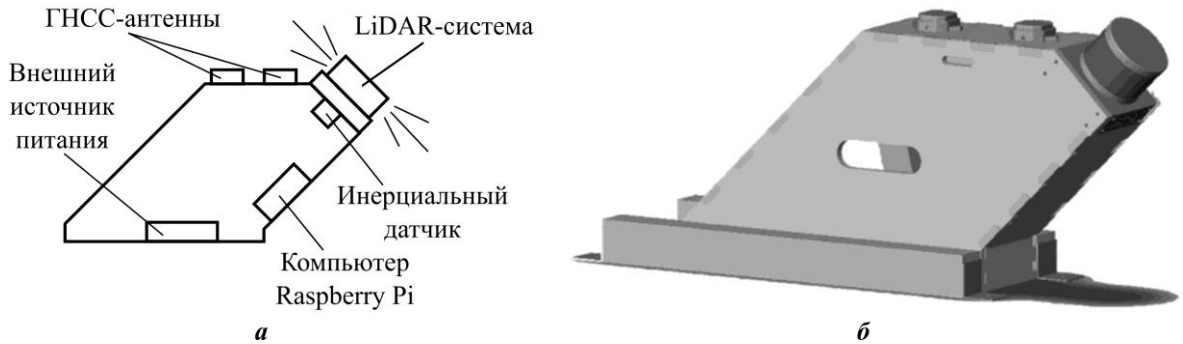


Рис. 2. Система на базе LiDAR, инерциальных датчиков и ГНСС: *а* – схема конструкции; *б* – модель
Fig. 2. System based on LiDAR, inertial sensors and GNSS: *a* – scheme of the design; *b* – model



Рис. 3. Модель конструкции LiDAR-системы
Fig. 3. LiDAR system design model

Разработка алгоритма. Задача, выполняемая алгоритмом, заключается в сборе данных от блоков позиционирования и ориентации, измерении расстояний и развертки, обработке полученных данных и их «преобразовании» в комплексное решение, а именно построение облака точек. Схема работы алгоритма построения облака точек представлена на рис. 4.

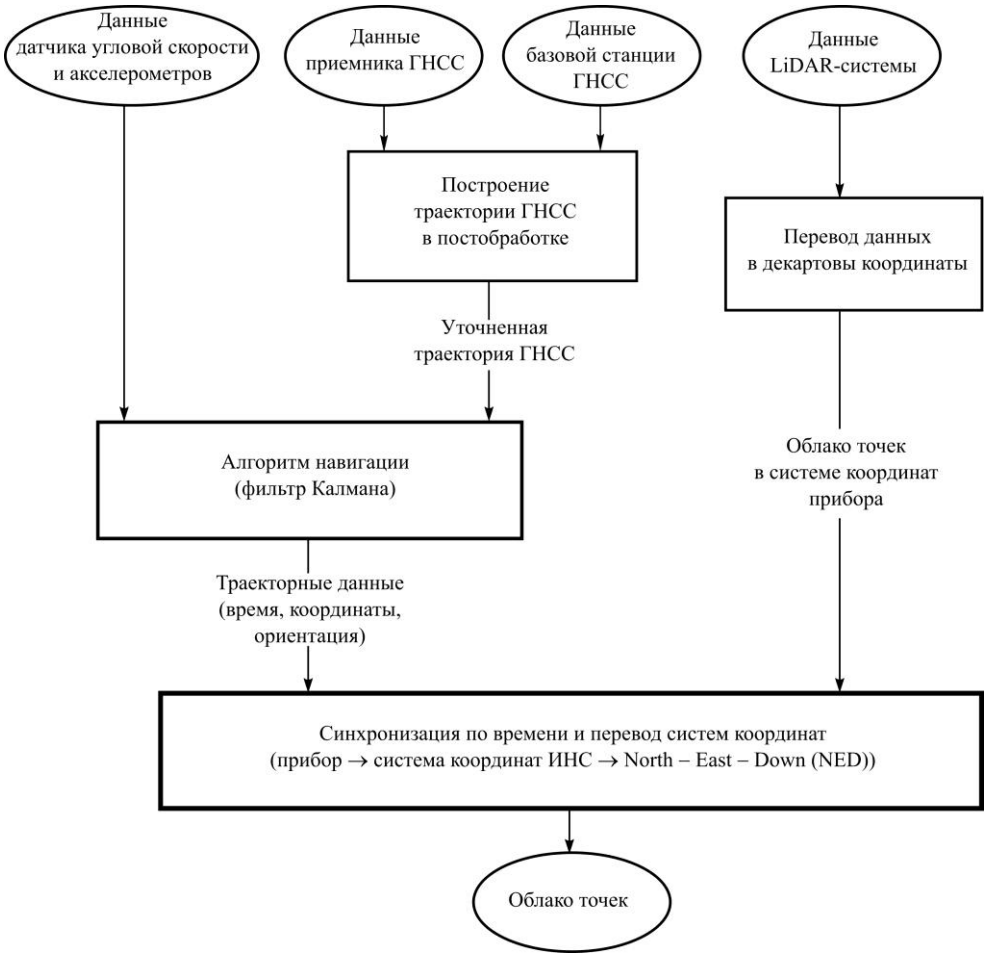


Рис. 4. Схема работы алгоритма построения облака точек
Fig. 4. Scheme of the algorithm for constructing point cloud

Перед работой с данными, полученными от всех подсистем, необходимо привести систему координат LiDAR к системе координат инерциального датчика. Для этого данные от LiDAR-системы следует умножить на матрицу 4 × 4:

$$\begin{vmatrix} & & & X_{sh} \\ & |R| & & Y_{sh} \\ & & & Z_{sh} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} X_{data} \\ Y_{data} \\ Z_{data} \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X_{new} \\ Y_{new} \\ Z_{new} \\ 1 \end{vmatrix},$$

где R – матрица поворота, переводящая данные из координат LiDAR-системы в координаты инерциальной навигационной системы (ИНС); X_{sh}, Y_{sh}, Z_{sh} – плечи между системами координат LiDAR и ИНС.

Матрица поворота R имеет вид

$$\begin{matrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33}. \end{matrix}$$

Тогда новые координаты LiDAR-системы следующие:

$$X_{new} = R_{11} \cdot X_{data} + R_{12} \cdot Y_{data} + R_{13} \cdot Z_{data} + X_{sh} \cdot 1,$$
$$Y_{new} = R_{21} \cdot X_{data} + R_{22} \cdot Y_{data} + R_{23} \cdot Z_{data} + Y_{sh} \cdot 1,$$
$$Z_{new} = R_{31} \cdot X_{data} + R_{32} \cdot Y_{data} + R_{33} \cdot Z_{data} + Z_{sh} \cdot 1.$$

Матрица R образуется из углов крена (Roll), курса (Yaw) и тангажа (Pitch). Графически поворот можно представить согласно рис. 5.

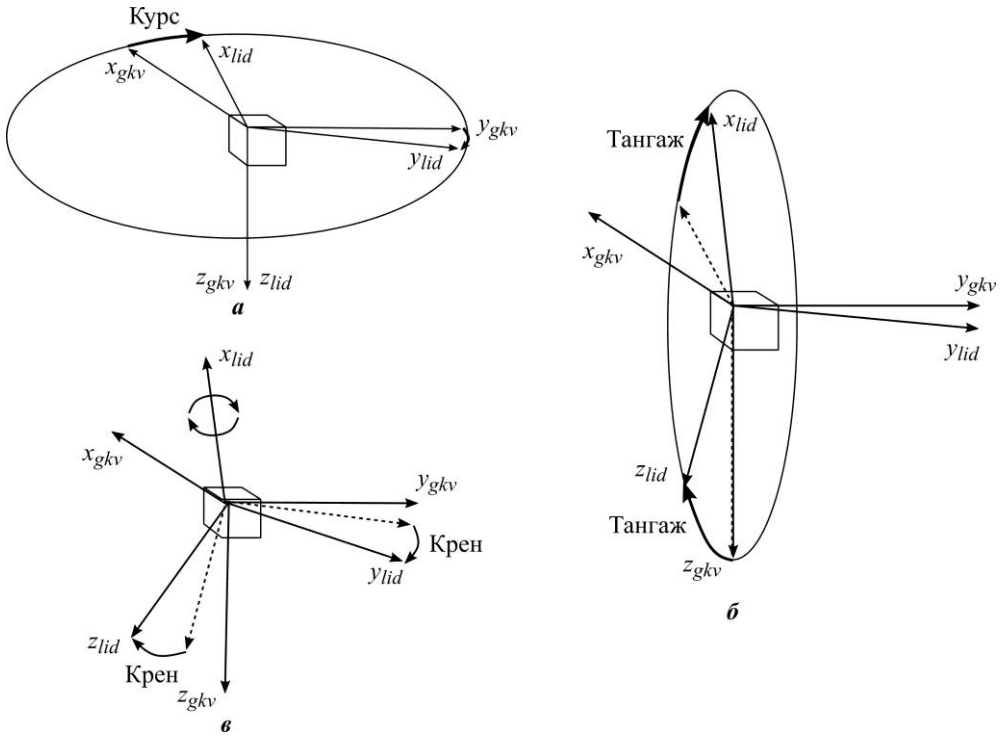


Рис. 5. Графическое представление доворота осей LiDAR-системы к осям инерциального модуля ГКВ-6: положительный поворот вокруг осей Z (*а*), Y (*б*), X (*в*)

Fig. 5. Graphical representation of the rotation of the LiDAR system axes to the inertial module GKV-6 axes: positive rotation around the axes Z (*a*), Y (*b*), X (*c*)

Углы доворота инерциального модуля ГКВ-6 можно определить по формулам

$$\text{Yaw} = \text{arctg2}(Y_{gkvXlid}, X_{gkvXlid}), \quad L = \sqrt{X^2_{gkvXlid} + Y^2_{gkvXlid}},$$

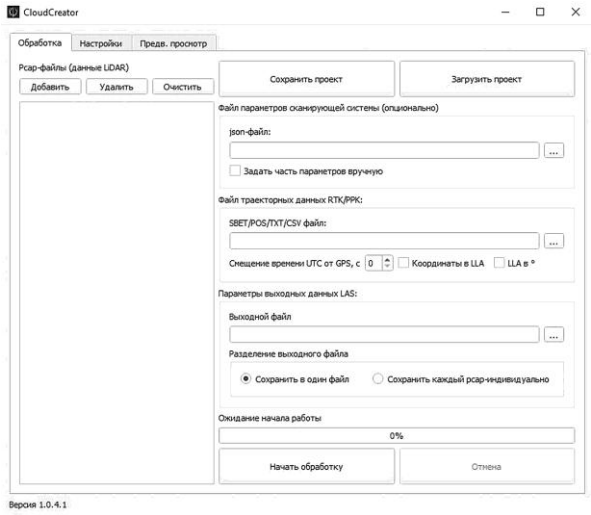
$$\text{Pitch} = \text{arctg2}(-Z_{gkvXlid}, L), \quad \text{Roll} = \arcsin(Z_{gkvYlid} / L),$$

где $X_{gkvXlid}$, $Y_{gkvXlid}$ – проекции осей X LiDAR-системы на оси X и Y соответственно; L – длина проекции оси X LiDAR-системы на плоскость XY ГКВ-6; $Z_{gkvXlid}$, $Z_{gkvYlid}$ – проекции осей X и Y LiDAR-системы на ось Z соответственно.

Для получения облака точек необходимо выполнить обработку исходных данных. Вначале строится уточненная траектория ГНСС с сантиметровой точностью с использованием данных приемника и базовой станции. Затем эти данные комплексируются с данными инерциальных датчиков для получения точной траектории и ориентации. Используя полученную траекторию движения и исходные данные LiDAR-системы путем преобразований систем координат и интерполяции данных, получаем облако точек. Для выполнения описанных преобразований разработаны две утилиты (рис. 6): Sigma, осуществляющая построение траектории, и CloudCreator, позволяющая построить облако точек. Результат (облако точек), полученный после обработки данных от системы с помощью утилит, показан на рис. 7.



а



б

Рис. 6. Программные утилиты для преобразования данных: *а* – Sigma; *б* – CloudCreator
Fig. 6. Software utilities for data transformation: *a* – Sigma; *b* – CloudCreator

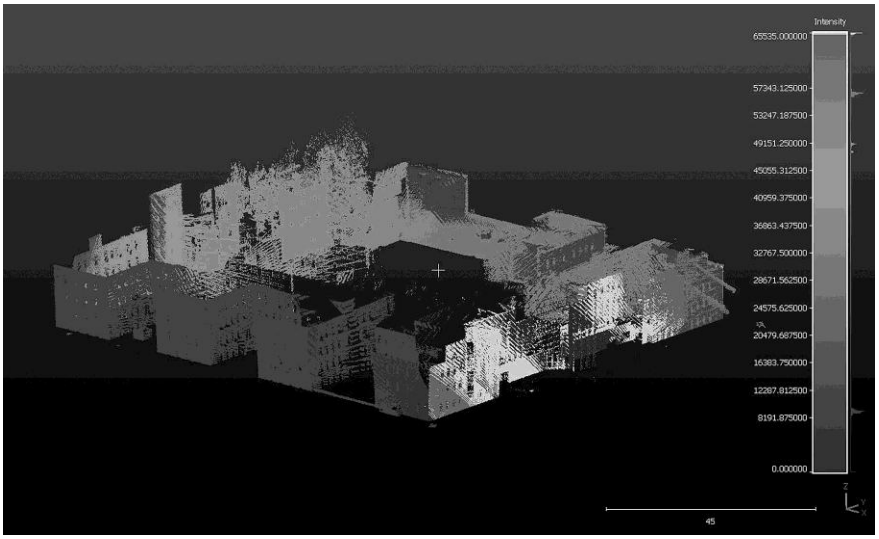


Рис. 7. Облако точек после обработки данных в CloudCreator
Fig. 7. Point cloud after data transformation in CloudCreator

Оценка погрешности координат точек в облаке. ***Теоретическая погрешность.*** Погрешность координат точек в облаке складывается из следующих компонентов: погрешностей определения ориентации ИНС, координат ГНСС, расстояния сканирующей системой, перевода системы координат ИНС и сканирующей системы. Зная типовую погрешность ИНС в определении координат и ориентации, погрешности сканирующей системы и совмещения систем координат, теоретическую погрешность координат точек в облаке можно рассчитать по формуле

$$\Delta_{cloud} = \sqrt{\Delta^2_{\text{ИНС}} + \Delta^2_{\text{ГНСС}} + \Delta^2_{\text{LiDAR}} + \Delta^2_{\text{ИНС}\to\text{LiDAR}}}\,, \qquad (1)$$

где $\Delta_{\text{ИНС}} = 0{,}1°$ – погрешность определения ориентации [9] (для предельного расстояния сканирующей подсистемы, равного 100 м, погрешность координат точки составит 18 см); $\Delta_{\text{ГНСС}} = 1$ см – погрешность определения координат системы [10]; $\Delta_{\text{LiDAR}} = 3$ см – погрешность определения расстояния сканирующей системой [11]; $\Delta_{\text{ИНС}\to\text{LiDAR}}$ – погрешность определения перевода системы координат ИНС и сканирующей системы.

Погрешность $\Delta_{\text{ИНС}\to\text{LiDAR}}$ можно минимизировать с помощью калибровки. Так, погрешность перевода до калибровки составляет 1°, после калибровки равна 0,3° (на максимальном расстоянии сканирования, составляющем 100 м, погрешность определения координат точек составляет 175 и 53 см соответственно). В формуле (1) не учитывается погрешность, возникающая вследствие ошибки синхронизации во времени данных ИНС и LiDAR-системы, поскольку максимальная ошибка синхронизации составляет 10 мкс, что соответствует ошибке координат ≈ 0,5 мм для точки на расстоянии 100 м при движении сканирующей системы со скоростью 30 км/ч и поворотом со скоростью 180 °/с (максимальные значения в ходе эксперимента). Суть калибровки заключается в установке сканирующей системы и ИНС на неподвижное основание и сканировании горизонтальной поверхности пола помещения в статическом положении (рис. 8). В процессе сканирования записываются данные о соотношении вектора ускорения свободного падения g от ИНС и нормали к поверхности пола.

В идеальном случае нормаль к поверхности пола и вектор **g** должны быть коллинеарными, когда устройство находится в статическом положении. Нарушения этой коллинеарности могут свидетельствовать о систематических ошибках ИНС или рас-

хождении осей ИНС и LiDAR-системы. По разнице между нормалью к поверхности пола и вектором **g** проводится приведение системы координат LiDAR к системе координат ИНС. На практике данный метод реализован за счет установки устройства в 15 статических положениях в диапазоне ±90° по осям *X* и *Y* сканирующей системы. Шаг угла составляет 45° для оси *X* и 90° для оси *Y*. По усредненным данным акселерометров вычисляются значения вектора **g**, а из данных LiDAR-системы с помощью алгоритма MSAC [12] находятся уравнения сканируемой плоскости и нормали к ней. Затем методом наименьших квадратов рассчитываются довороты системы координат LiDAR к системе координат ИНС в каждом из положений.

*Нахождение вектора **g** в системе координат ИНС.* Для каждого из 15 положений имеется статическая запись данных ИНС длиной 30 с, записанная с частотой 1 кГц. Для получения значения вектора **g** в каждом положении вычисляются средние значения показаний акселерометра по каждой оси. Для оси *X*

$$a_X = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} a_{Xj},$$

где a_{Xj} – значение показания акселерометра по оси *X* для каждого сэмпла; n – количество сэмплов (n = 30 000).

Аналогично вычисляются значения показаний акселерометра по осям *Y* и *Z*. Для нахождения вектора **g** в трехмерном пространстве необходимо списать смещение нулей акселерометров и найти сумму векторов по каждой оси:

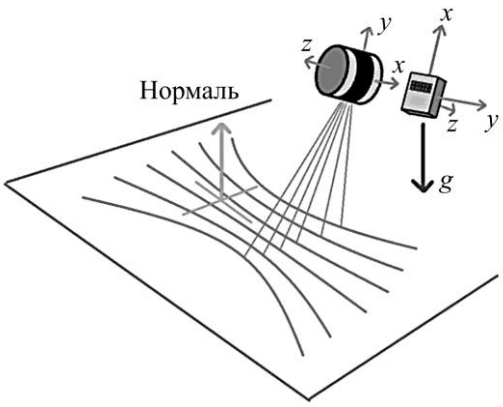


Рис. 8. Графическое представление эксперимента
Fig. 8. Graphical representation of the experiment

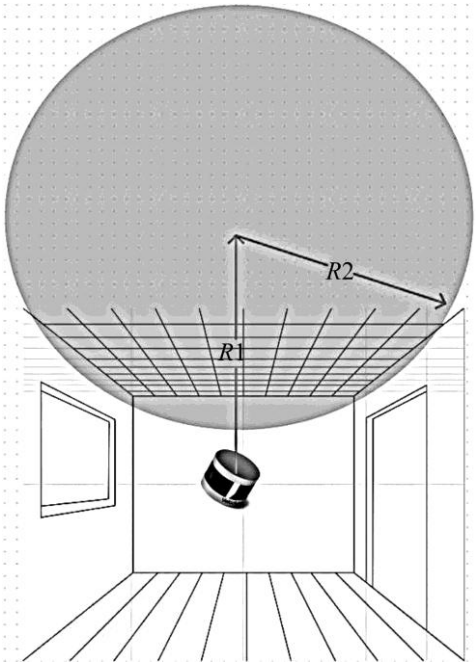


Рис. 9. Графическое представление избавления от плоскости потолка
Fig. 9. Graphical representation of getting rid of a ceiling plane

$$\mathbf{g} = \left(a_X - b_X\right) + \left(a_Y - b_Y\right) + \left(a_Z - b_Z\right),$$

где b_X, b_Y, b_Z – значения смещения нулей акселерометров.

Определение нормали к горизонтальной плоскости пола в системе координат LiDAR. Для упрощения обработки данных в рамках анализа сцен можно применить разреживание облака точек. Исходные данные LiDAR-системы могут содержать множество точек. Для удобства обработки и уменьшения объема данных их следует разреживать, объединяя точки, которые находятся близко друг к другу в пространстве. Для анализа

сцен, связанных с наземной частью окружающей среды, важно выделить точки, относящиеся к поверхности пола. Это можно сделать, исключив точки, находящиеся вне радиуса, меньшего, чем радиус сферы, касательной к плоскости пола, что позволит избежать шума и сосредоточиться на анализе области пола. Кроме того, важно удалить точки потолка, так как они обычно не предоставляют полезной информации при анализе наземных сцен. Для этого можно поднять начальную точку (0, 0, 0) координат LiDAR-системы на определенное расстояние (например, 10 м) в направлении вектора гравитации **g** от точки установки системы и затем исключить все точки, находящиеся в радиусе, например, 11,6 м от новой начальной точки. Важно подбирать все числовые параметры, такие как радиусы и расстояния, с учетом конкретных геометрических характеристик сцены и требований задачи. Эти шаги помогут оптимизировать обработку данных LiDAR-системы и сделать их более подходящими для анализа сцен.

Далее нужно обратиться к алгоритму MSAC (M-estimator Sample and Consensus) для поиска плоскости пола в облаке точек. Алгоритм MSAC [12] может использоваться для поиска плоскости в облаке точек, таких как данные LiDAR-системы, и является надежным способом оценки параметров плоскости с учетом возможных выбросов и шумов в данных. Шаги алгоритма MSAC для поиска плоскости:

Шаг 1. Инициализация. Выбирается случайным образом начальное подмножество точек из облака данных, которые будут использоваться для оценки параметров плоскости. Обычно это требует выбора как минимум трех точек, чтобы определить плоскость.

Шаг 2. Оценка модели. С использованием выбранных точек оцениваются параметры плоскости. Как правило, плоскость задается уравнением $Ax + By + Cz + D = 0$, где A, B, C, D – параметры модели, которые нужно оценить.

Шаг 3. Оценка согласия. Для каждой точки в облаке данных вычисляется расстояние от этой точки до оцененной плоскости. Точки, расстояния от которых меньше определенного порога, считаются согласными с моделью.

Шаг 4. Выбор наилучшей модели. Выбирается модель, которая имеет наибольшее количество согласных точек. Таким образом, алгоритм стремится к выбору плоскости, которая лучше всего соответствует данным.

Шаг 5. Обновление параметров модели. После выбора наилучшей модели параметры модели переоцениваются с использованием всех согласных точек.

Шаг 6. Проверка условия завершения. Алгоритм проверяет, выполнились ли условия завершения, такие как достижение минимального количества итераций или достижение заданного порога согласия.

Шаг 7. Итерации. Если условие завершения не выполнено, алгоритм повторяет шаги снова, начиная с выбора нового случайного начального подмножества точек.

Шаг 8. Завершение. После завершения итераций алгоритм возвращает наилучшую оценку параметров плоскости, которая имеет наибольшее количество согласных точек. Эта оценка параметров плоскости будет наиболее устойчивой к выбросам в данных.

Далее исходя из полученных параметров плоскости находится нормаль к ней по формуле

$$\begin{cases} Ax + By + Cz + D = 0, \\ \text{r} \\ n(A; B; C). \end{cases}$$

Нахождение матрицы направляющих косинусов. Выбрав необходимые пары векторов от ИНС и LiDAR-системы, которые соответствуют каждому из положений, нужно найти матрицы направляющих косинусов методом наименьших квадратов, что можно математически описать формулой

$$\min_R \|N - RA\|^2 = \min_R \sum_i^n |N_1 - RA_i|^2 ,$$

где N – вектор нормали; R – матрица поворота (матрица направляющих косинусов); A – вектор **g**.

Оценка полученных результатов. Первое, что нужно оценить, правильно ли были найдены отрезки статики в данных. Для этого строится график данных датчика угловой скорости и выделяются на нем моменты, которые алгоритм посчитал статикой, и визуально проверяется наличие выбросов. Оценка полученных матриц направляющих косинусов происходит путем поиска разницы между довернутым вектором нормали и вектором **g** ИНС: $Err_i = RN_i - A_i$. Исключая из эксперимента отдельные пары векторов (четные или нечетные), можно увидеть изменение в качестве калибровки.

Результат калибровки. На рис. 10 показаны ошибки, полученные для каждого отдельного случая. Видно, что максимальное расхождение векторов в положении 13 примерно 1°, а минимальное – в положении 2 и составляет менее 0,1°. Средняя точность полученной калибровки 0,3°.

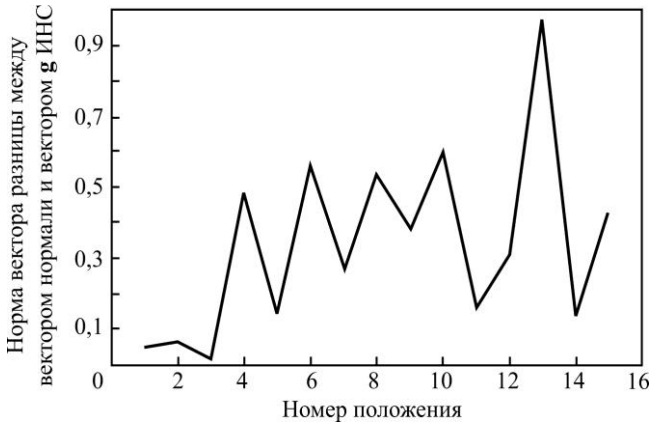
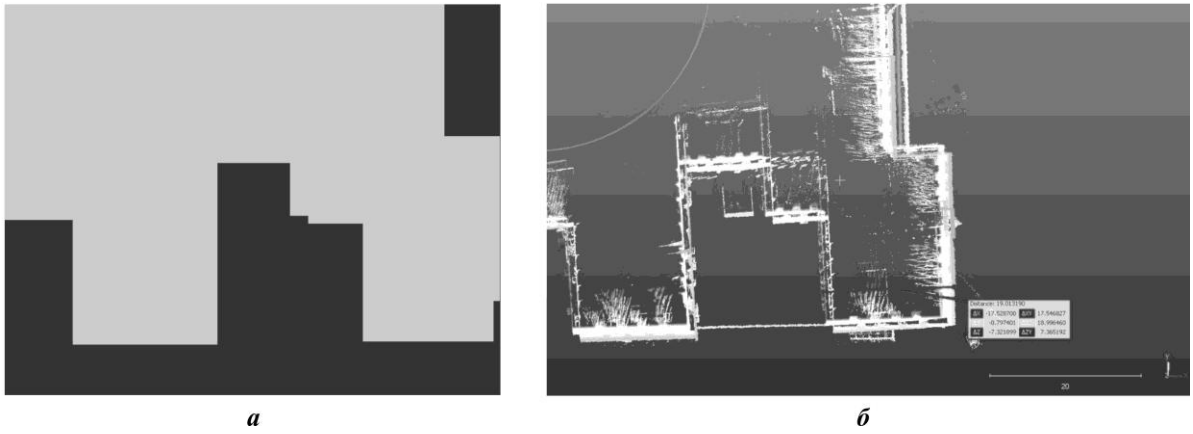


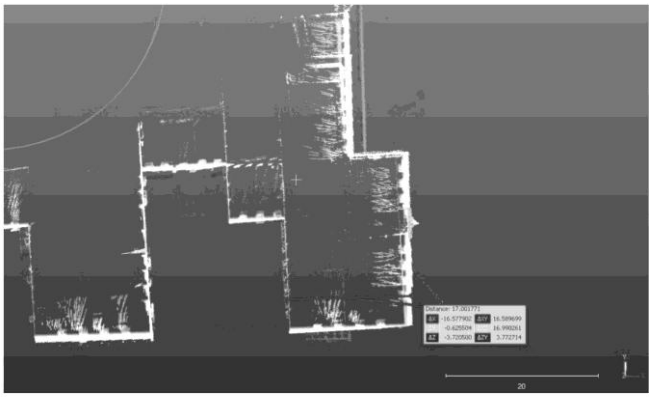
Рис. 10. Разница между вектором нормали и вектором **g** ИНС
Fig. 10. Difference between normal vector and inertial navigation system **g** vector

Таким образом, по формуле (1) определяется теоретическая погрешность координат в облаке точек. Для некалиброванной системы это значение равно 1,76 м, для калиброванной – 0,56 м.

Практическая погрешность координат в облаке точек. Практическая погрешность координат в облаке точек оценивается по разности известных координат и полученных в облаке (рис. 11). В результате практическая погрешность без учета калибровки составила 3 м, с учетом – 1 м. В итоге разница между теоретической и практической погрешностями без учета калибровки составила 1,24 м, а с учетом – 0,44 м.



а *б*



в

Рис. 11. Оценка практической погрешности: *а* – реальные координаты; *б* – координаты, полученные без учета калибровки; *в* – координаты, полученные с учетом калибровки

Fig. 11. Estimation of practical error: *a* – real coordinates; *b* – coordinates obtained without considering calibration; *c* – coordinates obtained considering calibration

Анализ составляющих погрешностей показал, что основную ошибку в результат эксперимента вносит погрешность определения координат сканирующей системы, а именно: на шаге построения траектории с сантиметровой точностью выявлена погрешность определения координат до 0,4 м. При вычислении ориентации с помощью фильтра Калмана с коррекцией от этих координат в определение ориентации вносится дополнительная погрешность до 0,35°. Таким образом, теоретическая погрешность некалиброванной системы при учете этих погрешностей может составлять 3,2 м, калиброванной – 1,3 м. В этом случае погрешность эксперимента в обоих случаях (для калиброванной и некалиброванной систем) соответствует теоретическому расчету.

Заключение. Разработанная интегрированная система, состоящая из инерциальных МЭМС-датчиков, ГНСС и LiDAR-системы, позволяет с применением специализированного программного обеспечения построить облако точек. Оценка погрешностей определения координат в облаке точек с калибровкой ИНС и LiDAR-системы и без нее показала превышение практической погрешности над теоретической: без калибровки на 1,24 м, с калибровкой на 0,44 м по причине несоответствия практической погрешности определения координат сканирующей системы теоретической.

Дальнейшее развитие данной темы заключается в разработке автоматического алгоритма минимизации погрешностей путем подбора углов доворота ИНС и LiDAR-системы.

Материалы статьи доложены на Российском форуме «Микроэлектроника 2022» (2–8 октября 2022 г., г. Сочи).

Литература

1. The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement / ***X. Wang, H. Pan, K. Guo et al.*** // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 502. Art. No. 012008. https://doi.org/10.1088/1755-1315/502/1/012008

2. ***Wang Z., Menenti M.*** Challenges and opportunities in lidar remote sensing // Front. Remote Sens. 2021. Vol. 2. Art. ID: 641723. https://doi.org/10.3389/frsen.2021.641723

3. ***Антонов А.*** Сканирующие лазерные дальномеры (LIDAR) // Современная электроника. 2016. № 1. С. 10–15.

4. Лидар: Полное руководство по работе, использованию и обработке данных LiDAR // Gistroy [Электронный ресурс]. URL: https://gistroy.ru/article/lidar/ (дата обращения: 04.03.2024).

5. Машинное зрение и 3D-камеры глубины / Vidau Systems // Системы безопасности [Электронный ресурс]. 16.09.2022. URL: https://www.secuteck.ru/articles/mashinnoe-zrenie-i-3d-kamery-glubiny (дата обращения: 04.03.2024).

6. A LiDAR and IMU integrated indoor navigation system for UAVs and its application in real-time pipeline classification / ***G. A. Kumar, A. K. Patil, R. Patil et al.*** // Sensors. 2017. Vol. 17. Iss. 6. Art. No. 1268. https://doi.org/10.3390/s17061268

7. ***Михеев А., Родин А.*** Лаборатория Микроприборов – разработка инерциальной навигации для беспилотников // Беспилот [Электронный ресурс]. 13.01.2021. URL: https://bespilot.com/news/991-mp-lab (дата обращения: 04.03.2024).

8. Инерциальные модули в лидарных системах // ООО Лаборатория Микроприборов [Электронный ресурс]. URL: https://mp-lab.ru/lidar-system/ (дата обращения: 04.03.2024).

9. Руководство по эксплуатации ГКВ-6 // Документация ООО Лаборатория Микроприборов [Электронный ресурс]. 2022. URL: https://mp-lab.ru/docs/ Режим доступа: по запросу (дата обращения: 04.03.2024).

10. ANN-MB series. Multi-band, high precision GNSS antennas: data sheet // U-blox [Электронный ресурс]. URL: https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/ANN-MB_DataSheet_UBX-18049862.pdf (дата обращения: 04.03.2024).

11. Velodyne’s Puck lidar sensor (VLP-16) // Velodyne Lidar [Электронный ресурс]. URL: https://velodynelidar.com/products/puck/#downloads (дата обращения: 04.03.2024).

12. EstimateEssentialMatrix description // MathWorks [Электронный ресурс]. 2016. URL: https://www.mathworks.com/help/vision/ref/estimateessentialmatrix.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_MSAC (дата обращения: 04.03.2024).

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 05.02.2024 г.;
принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Галкин Александр Александрович – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), alexgalkin.jr@gmail.com

Еркин Павел Владимирович – магистрант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), pashaerkin@yandex.ru

Захаров Валерий Петрович – студент Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), valerazaha1@yandex.ru

Соломкина Надежда Алексеевна – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-конструктор ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), nadezhda.its@gmail.com

Тимошенков Алексей Сергеевич – доктор технических наук, генеральный директор ООО «Лаборатория Микроприборов» (Россия, 124527, г. Москва, г. Зеленоград, Солнечная аллея, 6), at@mp-lab.ru

Тимошенков Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), spt111@mail.ru

References

1. Wang X., Pan H., Guo K., Yang X., Luo Sh. The evolution of LiDAR and its application in high precision measurement. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 502, art. no. 012008. https://doi.org/10.1088/1755-1315/502/1/012008

2. Wang Z., Menenti M. Challenges and opportunities in lidar remote sensing. *Front. Remote Sens.*, 2021, vol. 2, art. ID: 641723. https://doi.org/10.3389/frsen.2021.641723

3. Antonov A. Light detection and ranging. *Sovremennaya elektronika*, 2016, no. 1, pp. 10–15. (In Russian).

4. Lidar: Full guideline for LiDAR working, using and data processing. *Gistroy*. (In Russian). Available at: https://gistroy.ru/article/lidar/ (accessed: 04.03.2024).

5. Machine vision and 3D depth cameras, by Vidau Systems. *Sistemy bezopasnosti = Security and Safety*. 16.09.2022. (In Russian). Available at: https://www.secuteck.ru/articles/mashinnoe-zrenie-i-3d-kamery-glubiny (accessed: 04.03.2024).

6. Kumar G. A., Patil A. K, Patil R., Park S. S., Chai Y. H. A LiDAR and IMU integrated indoor navigation system for UAVs and its application in real-time pipeline classification. *Sensors*, 2017, vol. 17, iss. 6, art. no. 1268. https://doi.org/10.3390/s17061268

7. Mikheev A., Rodin A. Laboratoriya Mikropriborov – development of inertial navigation for unmanned aircrafts. *Bespilot.* 13.01.2021. (In Russian). Available at: https://bespilot.com/news/991-mp-lab (accessed: 04.03.2024).

8. Inertial modules in lidar systems. *OOO Laboratoriya Mikropriborov*. (In Russian). Available at: https://mp-lab.ru/lidar-system/ (accessed: 04.03.2024).

9. GKV-6 operation manual. *Dokumentatsiya OOO Laboratoriya Mikropriborov*. 2022. (In Russian). Available at: https://mp-lab.ru/docs/ Access mode: on demand (accessed: 04.03.2024).

10. ANN-MB series. Multi-band, high precision GNSS antennas, data sheet. *U-blox*. Available at: https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/ANN-MB_DataSheet_UBX-18049862.pdf (accessed: 04.03.2024).

11. Velodyne's Puck lidar sensor (VLP-16). *Velodyne Lidar*. Available at: https://velodynelidar.com/products/puck/#downloads (accessed: 04.03.2024).

12. EstimateEssentialMatrix description. *MathWorks*. 2016. Available at: https://www.mathworks.com/help/vision/ref/estimateessentialmatrix.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_MSAC (accessed: 04.03.2024).

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 05.02.2024;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Alexander A. Galkin – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, "Laboratory of Microdevices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), alexgalkin.jr@gmail.com

Pavel V. Erkin – Master's degree student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, "Laboratory of Microdevices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), pashaerkin@yandex.ru

Valerii P. Zaharov – Student, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, "Laboratory of Microdevices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), valerazaha1@yandex.ru

Nadezhda A. Solomkina – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer-Designer, "Laboratory of Microdevices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), nadezhda.its@gmail.com

Alexey S. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), General Manager, "Laboratory of Microdevices" LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley), at@mp-lab.ru

Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), spt111@mail.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

- **Научной электронной библиотеки:** https://www.elibrary.ru
- **ООО «Агентство «Книга-Сервис»:** https://www.rucont.ru; https://www.akc.ru; https://www.pressa-rf.ru
- **ООО «Урал-Пресс Округ»:** https://www.ural-press.ru/catalog
- **ООО «ИВИС»:** https://www.ivis.ru

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА
INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

Обзорная статья
УДК 621.3.049.779
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-346-361
EDN: AJYVID

Варианты реализации устройств восстановления тактовых сигналов и данных в составе КМОП высокоскоростных приемопередатчиков последовательных каналов. Обзор

Н. Ю. Раннев, С. В. Кондратенко, В. Д. Байков, А. В. Дубинский, Н. М. Горшкова, Д. В. Скок

АО НПЦ «ЭЛВИС», г. Москва, Россия

ngorshkova@elvees.com

Аннотация. Возрастающие требования к скоростям высокоскоростных приемопередатчиков обусловливают многочисленные варианты реализации входящих в их состав критичных устройств. К таким устройствам относятся, в частности, устройства восстановления тактовых сигналов и данных (ВТСД) в составе высокоскоростных приемников. Для уменьшения числа вариантов построения устройств ВТСД целесообразно провести анализ доступной информации с учетом прежде всего прототипов со скоростями не ниже 10 Гбит/с, выполненных по субмикронной объемной КМОП-технологии и наиболее востребованных на практике. Это позволит выявить основные тенденции развития устройств ВТСД и облегчит решение задачи их проектирования. В работе на основании анализа публикаций последних лет выполнены обзор и классификация вариантов реализации устройств ВТСД. Приведены примеры конкретных вариантов реализации устройств ВТСД на архитектурном и схемотехническом уровнях согласно сформулированным критериям. Проанализирован состав основных функциональных блоков, достаточный для построения наиболее сложных архитектур устройств ВТСД. Приведено детальное описание принципов функционирования одного из перспективных прототипов устройств ВТСД и предложены альтернативные варианты реализации его отдельных узлов, направленные на улучшение параметров устройств ВТСД. Определена тенденция перевода блоков устройств ВТСД в цифровую часть, что дает очевидные преимущества с точки зрения несложной их реализации по технологии с низким напряжением питания ядра и проектирования с возможностью автоматизированного синтеза схемы и топологии по высокоуровневому представлению.

© Н. Ю. Раннев, С. В. Кондратенко, В. Д. Байков, А. В. Дубинский, Н. М. Горшкова, Д. В. Скок, 2024

Ключевые слова: приемопередатчик, тактовый сигнал, фазовый детектор, интегральная микросхема

Для цитирования: Варианты реализации устройств восстановления тактовых сигналов и данных в составе КМОП высокоскоростных приемопередатчиков последовательных каналов. Обзор / Н. Ю. Раннев, С. В. Кондратенко, В. Д. Байков и др. // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 346–361. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-346-361. – EDN: AJYVID.

Review article

Implementation options for clock signal and data recovery devices as part of CMOS high-speed serial channel transceivers. Review

N. Yu. Rannev, S. V. Kondratenko, V. D. Baykov, A. V. Dubinsky, N. M. Gorshkova, D. V. Skok

JSC SPC "ELVEES", Moscow, Russia

ngorshkova@elvees.com

Abstract. The increasing demands on the speeds of high-speed transceivers give rise to numerous options for the implementation of critical devices included in their composition. Such devices include, in particular, clock and data recovery (CDR) devices as part of high-speed receivers. In order to reduce the number of alternative promising options for the construction of CDR devices, it is advisable to analyze the available information, focusing primarily on prototypes with speeds of at least 10 Gbit/s and made according to modern versions of submicron CMOS technology, as the most popular in practice, which will identify the main trends in the development of CDR devices and facilitate the solution of the problem of their design. In this work, based on the analysis of publications of recent years, a review and classification of options for the implementation of CDR devices have been carried out. The examples of specific options for the implementation of CDR devices at the architectural and circuit level, selected according to the criteria formulated above, are given. The composition of the main functional blocks, sufficient for the construction of the most complex CDR device architectures, is analyzed. A detailed description of the principles of functioning of one of the promising prototypes of the CDR devices is given and alternative options for implementing its individual nodes aimed at improving the parameters of the CDR devices are proposed. The trend of converting CDR device blocks to the digital part has been defined, which gives obvious advantages in terms of simplicity of their implementation using technology with low core supply voltage and the design with possibility of automated synthesis of the circuit and topology according to a high-level representation.

Keywords: transceiver, clock signal, phase detector, integrated circuit

For citation: Rannev N. Yu., Kondratenko S. V., Baykov V. D., Dubinsky A. V., Gorshkova N. M., Skok D. V. Implementation options for clock signal and data recovery devices as part of CMOS high-speed serial channel transceivers. Review. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 346–361. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-346-361. – EDN: AJYVID.

Введение. Передатчик и приемник осуществляют передачу и прием данных по последовательным каналам. В составе приемника важную роль играет устройство восстановления тактовых сигналов и данных (ВТСД, CDR). От качества проектирования устройств ВТСД во многом зависят ключевые параметры передачи, в том числе достижимая скорость и относительное число битовых ошибок (BER). Существует множество вариантов построения устройств ВТСД, что затрудняет их проектирование. Многие разработки представляют собой результаты заказного проектирования с отличиями от аналогичных разработок. В то же время длительное (более четверти века) и активное развитие разработок устройств ВТСД позволило накопить и обобщить опыт их проектирования, что выразилось, в частности, в появлении «именных» вариантов построения фазовых детекторов в составе устройств ВТСД. Изначально канонические архитектуры устройств ВТСД также подвергаются коррекции для достижения улучшений различного характера. Суммарно введенные коррекции могут порождать новые комбинированные варианты как архитектур устройств ВТСД в целом, так и способов реализации их отдельных частей, прежде всего фазового детектора (ФД, PD), которые не имеют жесткой классификации.

В настоящей работе проводится обзор основных архитектур устройств ВТСД, выявляются тенденции их развития и анализируются варианты построения основных функциональных блоков, достаточных для реализации наиболее сложных по архитектуре устройств ВТСД. Рассматриваются преимущественно варианты устройств ВТСД, работающих на скоростях не ниже 10 Гбит/с, выполненных по современным вариантам субмикронной или нанометровой объемной КМОП-технологии и наиболее востребованных на практике.

Типовые архитектуры устройств ВТСД и анализ тенденций их развития. Типовая архитектура приемника со встроенным устройством ВТСД приведена на рис. 1 [1]. Приемник состоит из внутренней и периферийной (ПЧ) частей. В типовом случае внутренняя часть содержит устройство ВТСД, десериализатор и блок программирования частотного режима Prog. Структура устройства ВТСД уже на этом уровне имеет варианты, различающиеся наличием или отсутствием внешнего опорного сигнала RefCLK.

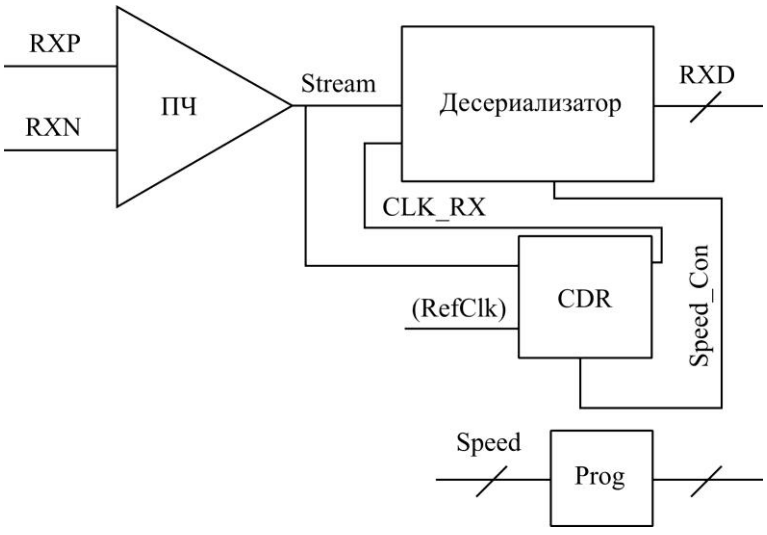


Рис. 1. Типовая архитектура приемника со встроенным устройством ВТСД
Fig. 1. Typical receiver architecture with integrated CDR device

Следует отметить, что в передатчике аналог устройства ВТСД – система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ, PLL) – использует внешний опорный сигнал. Варианты устройств ВТСД без внешнего опорного сигнала обозначаются referenceless и имеют, по крайней мере, два преимущества по сравнению с вариантами, использующими такой сигнал [2]. Во-первых, устройства ВТСД типа referenceless способствуют более гибкой перестройке скоростей передачи: вместо нескольких фиксированных значений обеспечивается расширенный диапазон скоростей, ограниченный только диапазоном перестройки частоты встроенного генератора, управляемого напряжением (ГУН, VCO). Во-вторых, отсутствие внешнего опорного генератора позволяет сократить число выводов устройств ВТСД и при массовом изготовлении приемопередатчиков уменьшить их стоимость. Кроме ГУН в состав устройства ВТСД входят такие блоки, как ФД, зарядно-разрядный блок (ЗРБ, CP) и простой RC-фильтр нижних частот (ФНЧ, LPF). Комбинация этих блоков на примере одного из возможных вариантов устройства ВТСД типа referenceless, PLL_based показана на рис. 2 [3]. В работе [3] представлена классификация архитектур устройств ВТСД:

– со следящей обратной связью (ОС), устанавливающей фазу тактового сигнала в оптимальное положение в середине битового интервала передаваемых данных (PLL-based, DLL-based, CDR with combination of PLL and DLL, PI-based CDR);

– без следящей ОС с использованием собственного тактового сигнала (blind oversampling CDR);

– прочие архитектуры без обратной связи (gated oscillator, high-Q bandpass filter architecture).

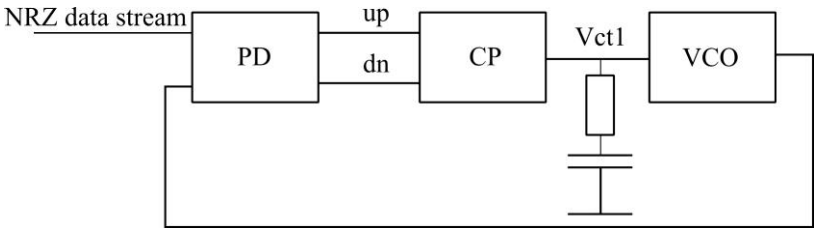


Рис. 2. Вариант архитектуры устройства ВТСД
Fig. 2. A variant of the CDR device architecture

Подробное описание принципов работы и сравнение устройств ВТСД с разной архитектурой (без деталей реализации отдельных блоков) приведено в работе [4].

Результаты анализа патентной базы США [5] показали, что начиная с 2000 г. по настоящее время наибольшее число патентов (134) связано с модификациями фазовых детекторов, значительно меньше возможных модификаций предложено для ЗРБ (46) и еще меньше – для ГУН (20). Таким образом, следующий уровень расширения классификации устройств ВТСД должен быть связан в основном с раскрытием деталей возможной реализации фазовых детекторов.

Для уменьшения числа альтернативных перспективных вариантов построения устройств ВТСД целесообразно учитывать основные тенденции их развития. В работе [6] на основании анализа содержания докладов, представленных на конференциях Solid State Circuits Conference, и в работе [7] сделаны выводы о том, что наиболее перспективные с точки зрения достижимой частоты (скорости) работы для выбранной технологии варианты блоков ФАПЧ и ВТСД на их основе используют преимущественно циф-

ровую вместо аналоговой реализацию ФД (так называемые bang-bang PD). Перевод блоков ФАПЧ и ВТСД в цифровую часть имеет очевидные преимущества, в частности это простота их реализации по технологии с низким напряжением питания ядра и несложность проектирования с возможностью автоматизированного синтеза схемы и топологии по высокоуровневому представлению. Полностью автоматический синтез топологии, ограниченный для наиболее высокоскоростных приложений, может быть восстановлен при использовании многофазных блоков ФАПЧ и ВТСД с их разбиением на каналы с пониженной рабочей частотой (half-rate, quarter-rate и т. д.) и других подобных решений. Использование многоуровневых (по выходу) цифровых ФД вместо простейших двухуровневых позволяет существенно снизить фазовый шум и, как следствие, снизить джиттер восстановленного в устройстве ВТСД тактового сигнала.

Анализ литературных источников показывает, что в состав устройств ВТСД входят основные блоки (ФД, ЗРБ, ФНЧ, ГУН) и в зависимости от модификации устройств ВТСД – дополнительные блоки (частотный детектор (FD) [8, 9], цифровая реализация ФНЧ (PI-DLF) [9], многочисленные неспецифические функциональные блоки, например дециматоры, интеграторы, делители частоты, линии задержки и др., не считая простейших логических элементов и триггеров).

Примеры реализации отдельных функциональных блоков и устройств ВТСД. Проектировщик устройств ВТСД (и ФАПЧ) кроме выбора сбалансированной архитектуры должен выбрать конкретные схемотехнические решения основных функциональных блоков. Традиционно исходными являются решения, принятые в заранее определенных прототипах. Для рассматриваемого класса устройств такой подход затруднителен, так как в доступных источниках информации преобладает описание разработок именно на архитектурном уровне.

Рассмотрим примеры наиболее эффективных архитектур устройств ВТСД и схемотехнических вариантов построения отдельных функциональных блоков ВТСД, взятые из технических обзоров либо отобранные исходя из совокупности достигнутых высоких технических показателей изготовленных образцов устройств ВТСД. Эти примеры взяты в предположении возможности использования современных разновидностей субмикронной КМОП-технологии с напряжением питания ядра не более 1–1,2 В.

Общепринятая классификация вариантов построения цифровых синхронных ФД на схемотехническом уровне представлена в работе [8]. На рис. 3 показаны схемы ФД Хуга (Hogge), Александера (Alexander) и двухканального ФД, работающего на половинной частоте (half-rate PD). Принцип работы двухканального ФД иллюстрируют приведенные временные диаграммы. Показано промежуточное состояние, при котором положение активных фронта и среза восстановленного тактового сигнала (СК) сдвинуты относительно оптимального положения – вблизи середины битового интервала передаваемых данных Din. Это приводит к выработке большего по длительности выходного сигнала V_{out2} по сравнению с сигналом V_{out1}, подаваемым на последующий ЗРБ в составе устройства ВТСД (см. рис. 2) и компенсирующим это несоответствие за счет глобальной ОС. В работе [8] также приведены архитектуры устройств ВТСД типа full-rate referenceless и типа reference (с внешним источником опорного сигнала) с раскрытыми реализациями ФД.

Пример модифицированного ФД Александера приведен в работе [6] (рис. 4). За счет логического анализа сигналов A, B, T, UP, DOWN появляется возможность более корректной выработки на следующем такте сигналов UP, DOWN управления ЗРБ.

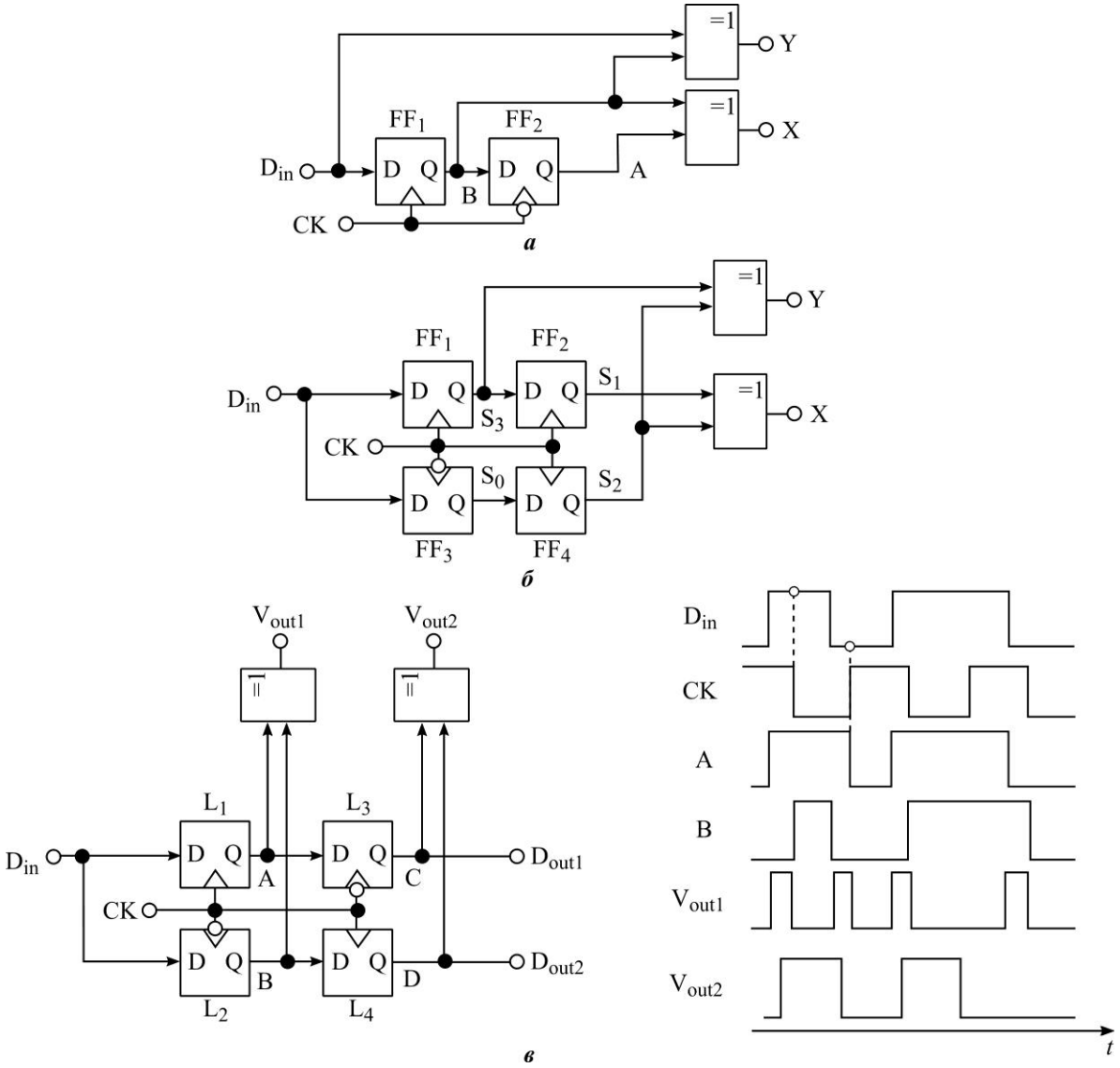


Рис. 3. Варианты построения цифровых синхронных ФД Хуга (*а*), Александера (*б*) и двухканального ФД, работающего на половинной частоте (*в*)
Fig. 3. Options for building digital synchronous Hogge (*a*), Alexander (*b*) phase detectors and dual-channel half-rate phase detector (*c*)

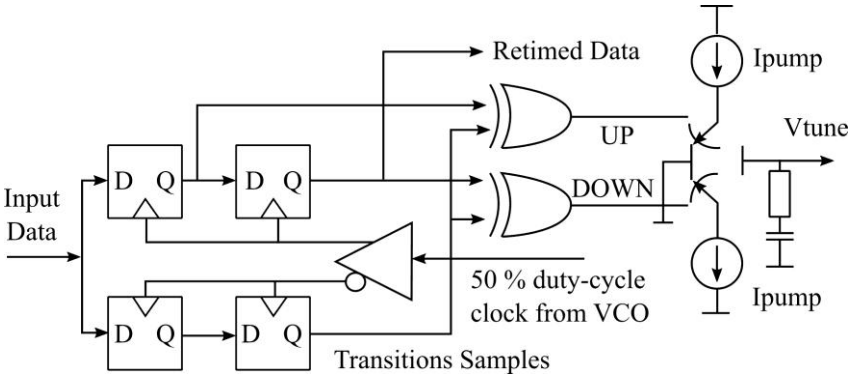


Рис. 4. Схема модифицированного ФД Александера [4, 6]
Fig. 4. Scheme of the modified Alexander PD [4, 6]

В работе [10] предложенная архитектура устройств ВТСД содержит многоуровневый блок ФД, включающий в себя несколько ФД Александера, и специальный монитор джиттера (jitter monitor), улучшающие работу блока ФД и устройства в целом. В работе [2] приведена архитектура разработанного и изготовленного по 28-нм КМОП-технологии устройства ВТСД со скоростью передачи, регулируемой в диапазоне 9–11 Гбит/с, и измеренным суммарным джиттером не более 0,35/UI (UI – длительность передачи одного бита). Структура ФД в составе данного устройства ВТСД, названного авторами asymmetric phase detector, не раскрыта, а архитектура устройства ВТСД (рис. 5) отличается от архитектуры на рис. 1 наличием двух каналов передачи многоразрядных данных с выбором одного из них по результатам анализа в блоке Lock Detector. Важно отметить, что цифровая часть устройства ВТСД, включающая в себя три центральных блока с выходом на ГУН, синтезирована автоматизированным образом.

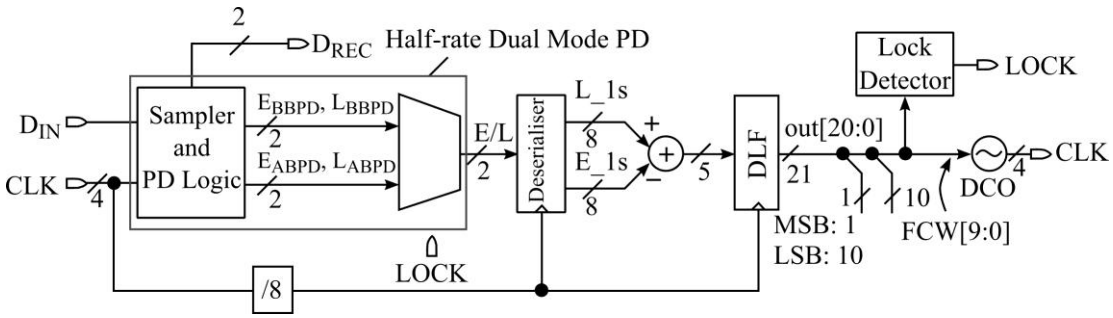


Рис. 5. Вариант архитектуры устройства ВТСД типа referenceless [2]
Fig. 5. A variant of the CDR device architecture of the referenceless type [2]

В работе [9] приведены результаты разработки устройства ВТСД, изготовленного по 65-нм КМОП-технологии, имеющего рабочий диапазон скоростей 4–10,5 Гбит/с и джиттер выходного сигнала 2,2 пс (rms), 24 пс (pp). Архитектура устройства ВТСД с автоматическим выравниванием частоты (automatic frequency acquisition) показана на рис. 6. Она содержит три петли обратной связи, в одну из которых входит блок детектора частоты (FDL). Другие блоки – это аккумуляторы (ACC), линия задержки с цифровым управлением (DCDL) и обычный цифровой ФД типа bang-bang (BBPD).

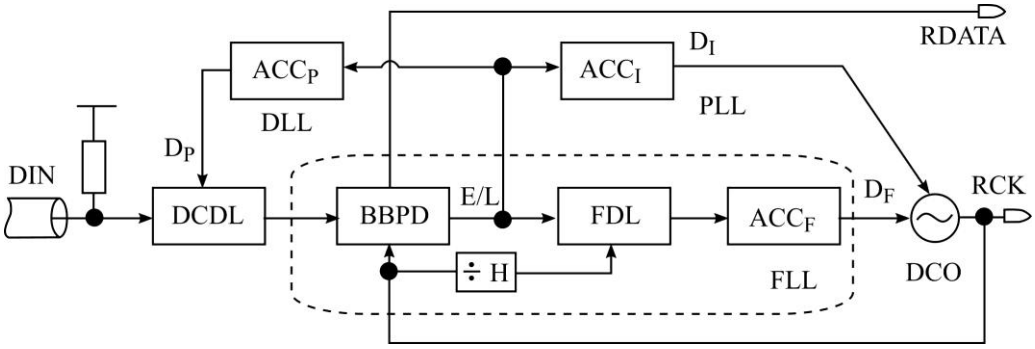


Рис. 6. Архитектура устройства ВТСД с автоматическим выравниванием частоты (automatic frequency acquisition) [9]
Fig. 6. CDR device architecture with automatic frequency equalization (automatic frequency acquisition) [9]

На схемотехническом уровне раскрыты реализация линии задержки с цифровым управлением (DCDL), используемой на входе тракта передачи сигнала в одном из представленных вариантов реализации устройства ВТСД, а также реализация ЗРБ (рис. 7). В работе [11] описано устройство ВТСД, разработанное и изготовленное по 28-нм КМОП-FDSOI-технологии, и приведен другой вариант реализации ЗРБ (рис. 8).

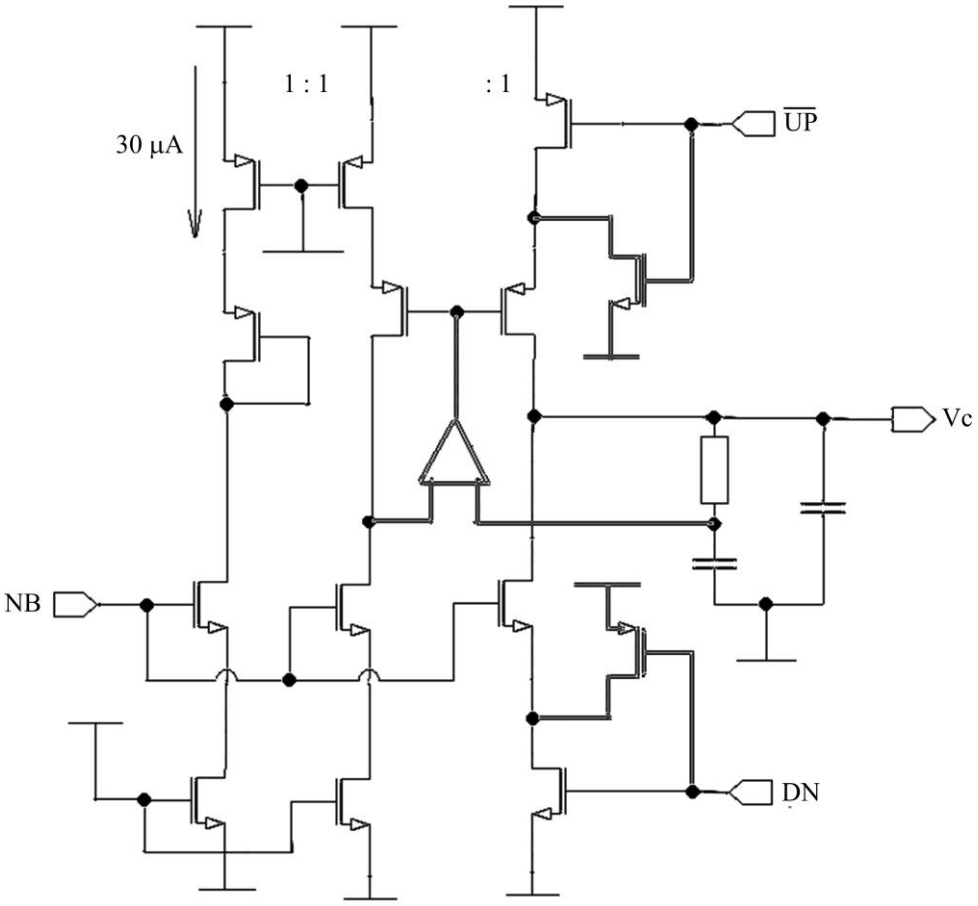


Рис. 7. Вариант реализации ЗРБ с ФНЧ [9]
Fig. 7. A variant of the implementation of the CP with the LPF [9]

В работе [12] представлены результаты разработки цифрового устройства ВТСД типа referenceless с половинной (half-rate) частотой работы и с многоуровневым ФД. Приведены подробные сведения об архитектурных и схемотехнических решениях отдельных блоков. Блок ВТСД изготовлен по 28-нм КМОП-технологии и имеет высокие технические показатели. Так, показатели джиттера восстанавливаемого сигнала CLK на скорости передачи 10 Гбит/с составляют 3 пс (rms), 20 пс (pp). Представлены архитектура, принцип действия, характеристики блока ВТСД, а также принципиальные схемы основных блоков с отдельными предлагаемыми улучшениями. Архитектура рассматриваемого устройства ВТСД (D-CDR) приведена на рис. 9.

Двухконтурная схема цифрового управления генератором DCO реализует два режима:

1) FLL (Frequency Locked Loop) – контур управления замыкается через частотный детектор FD (Frequency Detector), Integrator, контроллер – цифровой управляющий сигнал Course[4:0] «грубой» настройки генератора;

2) PLL (Phase Locked Loop) – контур управления замыкается через фазовый детектор PD (Phase Detector), Decimator, НЧ-фильтр PI-DLF (proportional-integral digital loop filter) – цифровой управляющий сигнал Fine[4:0] «тонкой» настройки генератора. Настроенный генератор (захвачена частота и фаза) работает в этом режиме.

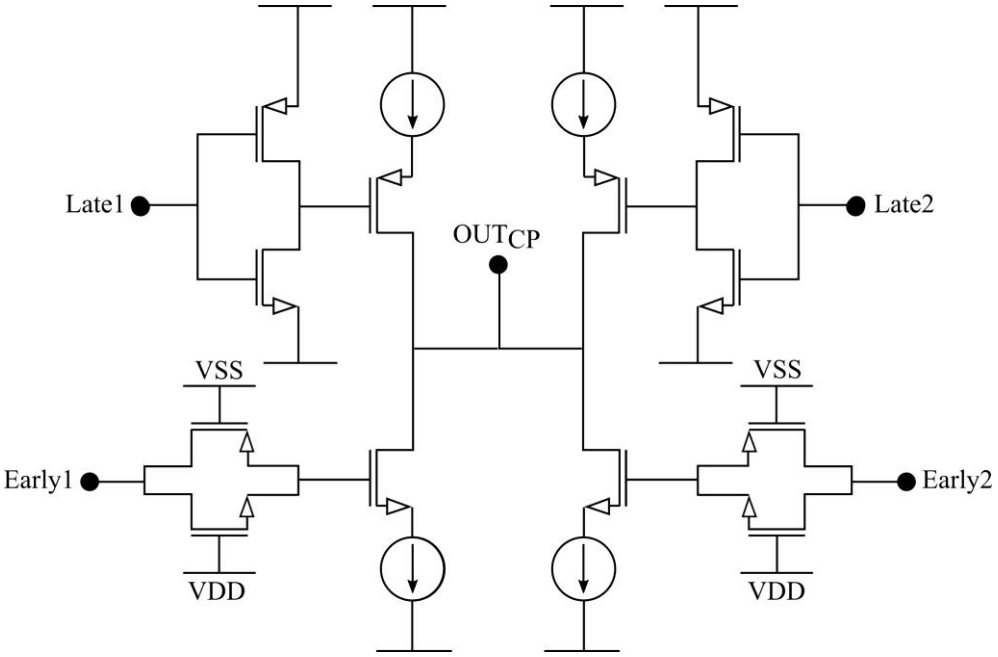


Рис. 8. Вариант реализации ЗРБ [11]
Fig. 8. A variant of the CP implementation [11]

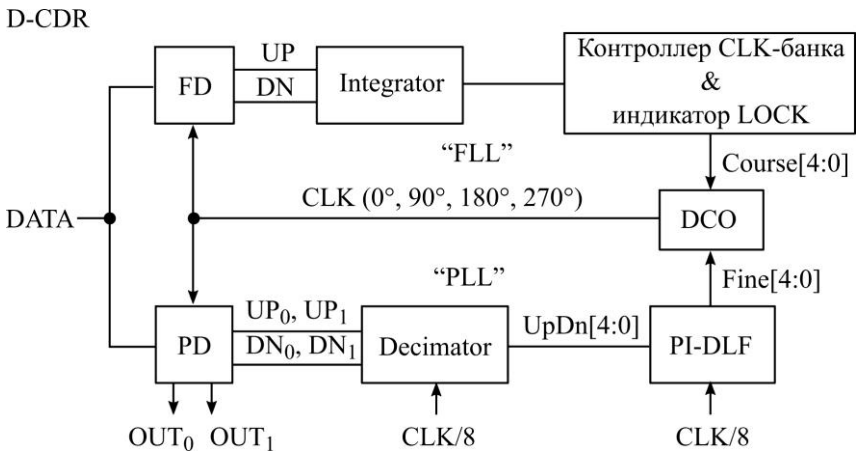


Рис. 9. Архитектура устройства ВТСД [12]: DATA – входные последовательные данные битовой частоты Fbit; CLK – восстановленный сигнал синхронизации внутреннего генератора Digitally Controlled Oscillator (DCO), представленный в четырех фазах 0, 90, 180, 270°– 1/2 битовые интервалы (отношение Fbit/CLK = 2 – архитектурная характеристика Half-rate устройства ВТСД, $T_{DCO} = 2T_{bit}$ – отношение периодов); OUT_0, OUT_1 – пара выходных сигналов (четный, нечетный биты), считываемые с частотой CLK

Fig. 9. CDR device architecture [12]: DATA – serial input data of the Fbit bit rate; CLK – the restored synchronization signal of the Digitally Controlled Oscillator (DCO) internal generator, presented in four phases 0, 90, 180, 270°– 1/2 bit intervals (ratio Fbit/CLK = 2 – architectural characteristic of the Half-rate of the CDR device, $T_{DCO} = 2T_{bit}$ – ratio periods); OUT_0, OUT_1 – a pair of output signals (even, odd bits), read at a frequency of CLK

Переключение режимов выполняется автоматически – по результатам обработки информации от FD, PD о текущем отклонении частоты или фазы генератора DCO. Генератор частоты с цифровым управлением DCO представляет собой традиционный кольцевой двухкаскадный генератор, выполненный на псевдодифференциальных элементах задержки Delay с Course (Ireg)/Fine (Ureg) настройкой частоты CLK (рис. 10 и 11). Грубая подстройка фазовой частоты CLK генератора по диапазонам (CLK-банк) обеспечивается управляемым выбором тока питания I_{reg} – цифровой вход Course[4:0] с цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) DAC. Преобразователь Course[4:0]→ I_{reg} представляет собой токовое зеркало, отображающее опорный ток Iref в значение I_{reg} с заданным коэффициентом, пропорциональным числу единичных разрядов в значении кода Course[4:0], что определяет пять частотных диапазонов. Тонкая подстройка фазы CLK-генератора в установленном частотном диапазоне обеспечивается выбором напряжения U_{reg} смещения варикапов в составе элемента Delay – цифровой вход Fine[4:0] с ЦАП Fine[4:0]→ U_{reg}. Преобразование Fine[4:0]→ U_{reg} проводится с помощью термометрически кодированного ЦАП. Следует отметить, что в описываемой реализации ГУН не полностью используется возможность снижения джиттера выходного сигнала с помощью введения дополнительного инжектирующего (injected) сигнала.

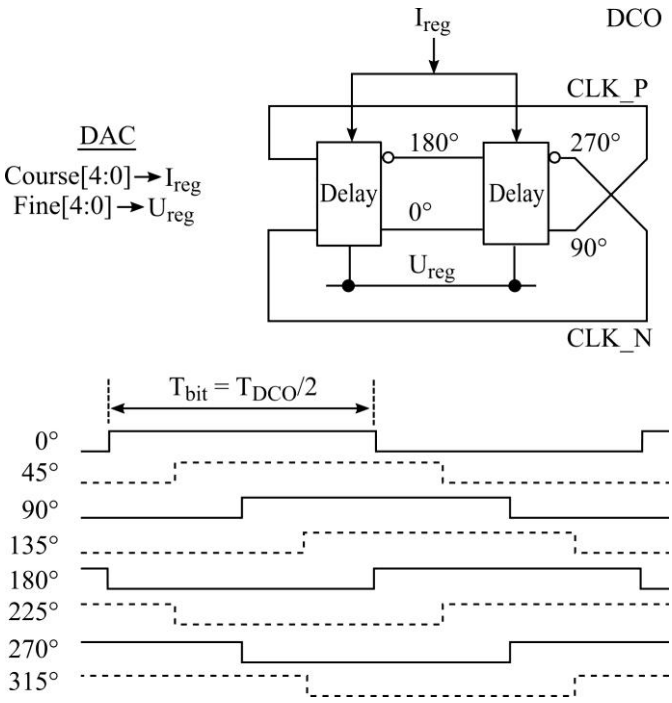


Рис. 10. Архитектура кольцевого двухкаскадного генератора
Fig. 10. Architecture of a ring two-stage generator

Вариант блока задержки (так называемая псевдодифференциальная ячейка Lee-Kim delay cell), потенциально пригодный для реализации по нанометровой КМОП-технологии, приведен на рис. 12 [10].

В режиме FLL грубой настройки D-CDR (Course) частотный детектор FD (рис. 13) определяет знак разности UP, DN битовой частоты Fbit данных DATA и восстановленной частоты CLK генератора DCO с использованием текущего временного положения перепадов DATA в фазовой сетке 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315° DCO (см. рис. 10).

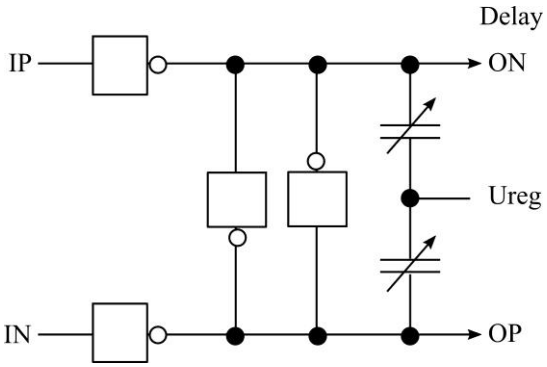


Рис. 11. Схема псевдодифференциального элемента задержки
Fig. 11. Scheme of the pseudo-differential delay element

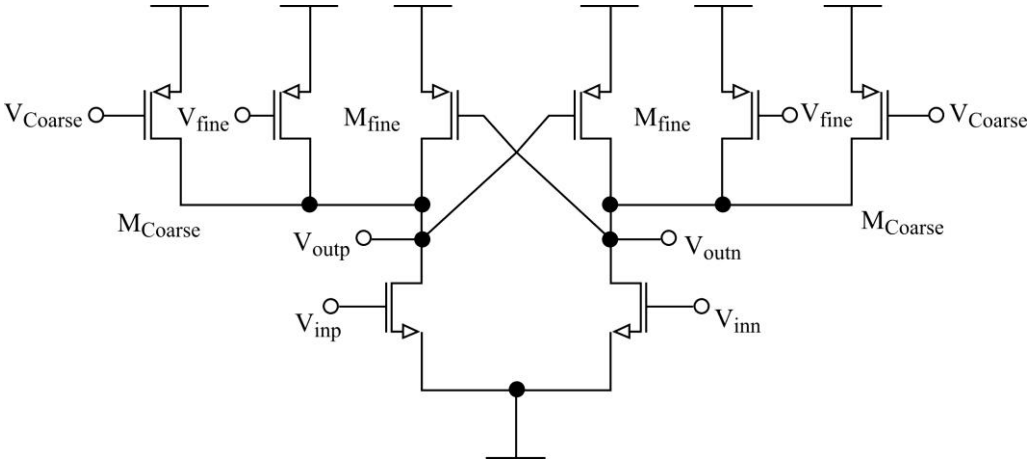


Рис. 12. Псевдодифференциальная ячейка Lee-Kim delay cell [10]
Fig. 12. Pseudo-differential Lee-Kim delay cell [10]

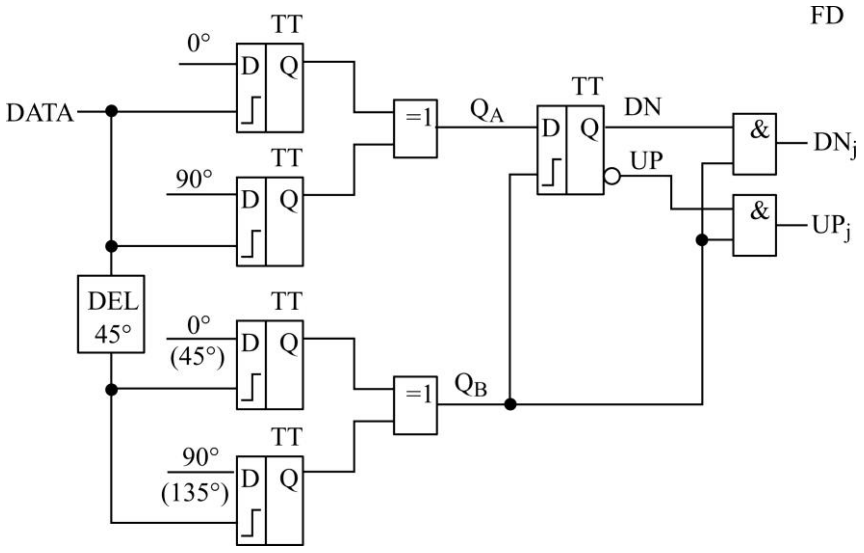


Рис. 13. Схема частотного детектора FD
Fig. 13. FD frequency detector circuit

Элемент DEL45° представляет собой цепочку инверторов. Авторы статьи [12] указывают, что проблемы разброса параметров, режимной и температурной нестабильности не привели к отказам схемы в границах рабочих условий D-CDR. По сравнению с рис. 13 в схеме, приведенной в работе [9], для защелкивания UP, DN используется инверсный сигнал $\overline{Q_B}$. Это ведет к перестановке выходов UP, DN. Кроме того, вместо UP, DN предлагается использовать сигналы UPj, DNj с дополнительных вентилей AND (см. рис. 13) для повышения устойчивости D-CDR к джиттеру DATA. Имеется в виду специфический конструктивно зависимый эффект ВЧ-переключений Q_A, Q_B на коротком интервале формирования семплирующего перепада DATA (прямого или задержанного на 45°).

В конструкции контура PLL тонкой настройки D-CDR (Fine) (см. рис. 9) задействован классический квадратурный Half-rate bang-bang ФД, использующий четыре фазы с 1/2 битовым интервалом: 0, 90, 180, 270° ($2T_{bit}$). Фазовая информация (отклонение фазы CLK) представляется на четырех выходах ФД в виде логических сигналов UP_0, DN_0, UP_1, DN_1 (UP требует повышения частоты CLK, DN – понижения), синхронизируемых соответствующими фазами. Длительность сигналов UP_0, DN_0, UP_1, DN_1 равна периоду $T_{DCO} = 1/CLK$ синхронизирующей частоты. Смежные сигналы (в смежных тактах CLK) на отдельно взятом выходе могут сливаться в непрерывный сигнал, длительностью более одного такта.

Цифровая фильтрация (PI-DLF) в контуре ФАПЧ плохо сочетается с ВЧ-характеристиками (CLK) выходных сигналов ФД. Требуется понижение частоты (децимация) продвигаемой фазовой информации, которая реализуется в блоке Decimator (см. рис. 9). В исследуемой схеме принят коэффициент децимации 8: НЧ-участок контура ФАПЧ синхронизируется частотой CLK/8 (период $16T_{bit}$). Вследствие децимации утрачивается часть фазовой информации, что отрицательно сказывается на переходных характеристиках и показателях джиттера D-CDR. Наиболее грубый способ – прямое семплирование частотой CLK/8 выходов UP_0, DN_0, UP_1, DN_1 детектора PD. В работе [12] отмечены другие способы сохранения информации и, в частности, схемы с многоуровневыми фазовыми детекторами. Способ децимации в D-CDR основан на подсчете (по каждому выходу ФД) числа тактов CLK, представляющих значение «1» выхода ФД на интервале децимации (8 тактов CLK): четыре 3-разрядных счетчика UP_0[2:0], DN_0[2:0], UP_1[2:0], DN_1[2:0]. Результат децимации преобразуется арифметическим блоком в значение UpDn[4:0] на входе НЧ-фильтра PI-DLF. Схема цифрового НЧ-фильтра PI-DLF в контуре ФАПЧ представлена на рис. 14, *а*.

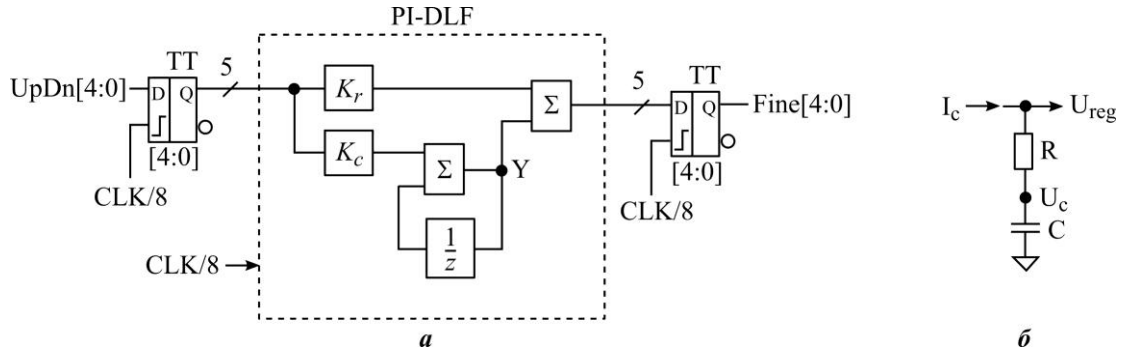


Рис. 14. Цифровой НЧ-фильтр PI-DLF в контуре ФАПЧ (*а*) и его аналоговый эквивалент (*б*): K_r, K_c – числовые коэффициенты; Σ – числовой сумматор; $1/z$ – оператор задержки на один такт

Fig. 14. Digital woofer PAD LF in the PL circuit (*a*) and its analog equivalent (*b*): K_r, K_c – numerical coefficients; Σ – numerical adder; $1/z$ – delay operator for one clock cycle

Можно показать, что цифровой схеме на рис. 14, *а* соответствует аналоговый эквивалент, показанный на рис. 14, *б*, причем

$$\frac{8}{\mathrm{CLK}}\frac{K_r}{K_c} = RC\,.$$

Условие семплирования $RC >> 8/\mathrm{CLK}$ преобразуется к виду $K_r >> K_c$.

Дополнительная информация о конкретных разработках высокоскоростных устройств ВТСД содержится в работах [13–17], информация о деталях реализации ГУН – в работах [18–20] и о возможных вариантах реализации ФД – в работе [21].

Заключение. Обзор вариантов реализации на архитектурном и схемотехническом уровнях критичного блока ВТСД показал возрастающее число архитектурных решений данных блоков с усложненными алгоритмами обработки сигналов, использующих, в частности, двух- и трехконтурные схемы управления и усовершенствованные схемы фазовых детекторов для улучшения основных технических показателей и максимальной реализации возможностей используемой технологии изготовления.

Литература

1. Analog circuit design: High-speed clock and data recovery, high-performance amplifiers, power management / eds ***M. Steyaert, A. H. M. van Roermund, H. Casier***. Dordrecht: Springer, 2008. XII, 358 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8944-2

2. All-digital half-rate referenceless CDR with single direction frequency sweep scheme using asymmetric binary phase detector / ***Y. Changzhi, P. Himchan, H. Qiwei et al.*** // IEICE Electronics Express. 2020. Vol. 17. No. 6. Art. ID: 20200024. https://doi.org/10.1587/elex.17.20200024

3. ***Jeong D.-K.*** Topics in IC design. 6.1. Introduction to clock and data recovery: lecture course. Seoul: Seoul National Univ., 2020. 27 p.

4. ***Hsieh M.-t., Sobelman G. E.*** Architectures for multi-gigabit wire-linked clock and data recovery // IEEE Circuits and Systems Magazine. 2008. Vol. 8. Iss. 4. P. 45–57. https://doi.org/10.1109/MCAS.2008.930152

5. United States Patent and Trademark Office [Электронный ресурс]. URL: https://www.uspto.gov/ (дата обращения: 06.03.2024).

6. ***Walker R. C.*** Designing bang-bang PLLs for clock and data recovery in serial data transmission systems // Phase-locking in high-performance systems – from devices to architectures / ed. B. Razavi. S. l.: Wiley-IEEE Press, 2003. P. 34–45. https://doi.org/10.1109/9780470545492.ch4

7. ***Talegaonkar M., Inti R., Hanumolu P. K.*** Digital clock and data recovery circuit design: Challenges and tradeoffs // 2011 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC). San Jose, CA: IEEE, 2011. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/CICC.2011.6055346

8. ***Razavi B.*** Challenges in the design of high-speed clock and data recovery circuits // IEEE Communications Magazine. 2002. Vol. 40. Iss. 8. P. 94–101. https://doi.org/10.1109/MCOM.2002.1024421

9. A 4-to-10.5 Gb/s continuous-rate digital clock and data recovery with automatic frequency acquisition / ***G. Shu, W.-S. Choi, S. Saxena et al.*** // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2016. Vol. 51. Iss. 2. P. 428–439. https://doi.org/10.1109/JSSC.2015.2497963

10. ***Kwon D.-H., Park Y.-S., Choi W.-Y.*** A clock and data recovery circuit with programmable multi-level phase detector characteristics and a built-in jitter monitor // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2015. Vol. 62. No. 6. P. 1472–1480. https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2415180

11. ***Gimeno C., Bol D., Flandre D.*** Multilevel half-rate phase detector for clock and data recovery circuits // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2018. Vol. 26. Iss. 9. P. 1807–1811. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2018.2826440

12. A referenceless digital CDR with a half-rate jitter-tolerant FD and a multi-bit decimator / ***J. Kim, Y. Ko, J. Jin et al.*** // Electronics. 2022. Vol. 11. Iss. 4. Art. No. 537. https://doi.org/10.3390/electronics11040537

13. A 12.5-mb/s to 2.7-Gb/s continuous-rate CDR with automatic frequency acquisition and data-rate readback / ***D. Dalton, K. Chai, E. Evans et al.*** // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2005. Vol. 40. Iss. 12. P. 2713–2725. https://doi.org/10.1109/JSSC.2005.856577

14. A 12 Gb/s 0.9 mW/Gb/s wide-bandwidth injection-type CDR in 28 nm CMOS with reference-free frequency capture / ***T. Masuda, R. Shinoda, J. Chatwin et al.*** // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2016. Vol. 51. Iss. 12. P. 3204–3215. https://doi.org/10.1109/JSSC.2016.2594077

15. A 1.8-pJ/b, 12.5-25-Gb/s wide range all-digital clock and data recovery circuit / ***M. Verbeke, P. Rombouts, H. Ramon et al.*** // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2018. Vol. 53. Iss. 2. P. 470–483. https://doi.org/10.1109/JSSC.2017.2755690

16. A 25 Gb/s all-digital clock and data recovery circuit for burst mode applications in PONs / ***M. Verbeke, P. Rombouts, H. Ramon et al.*** // 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC). Gothenburg: IEEE, 2017. P. 1–3. https://doi.org/10.1109/ECOC.2017.8346193

17. A 1–16 Gb/s all-digital clock and data recovery with a wideband high-linearity phase interpolator / ***G. Wu, D. Huang, J. Li et al.*** // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2016. Vol. 24. Iss. 7. P 2511–2520. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2015.2508045

18. ***Cheng K.-H., Lai C.-W., Lo Y.-L.*** A CMOS VCO for 1V, 1GHz PLL applications // Proceedings of 2004 IEEE Asia-Pacific Conference on Advanced System Integrated Circuits. Fukuoka: IEEE, 2004. P. 150–153. https://doi.org/10.1109/APASIC.2004.1349433

19. ***Pavithra A., Vivek K.*** A digital PLL using digitally controlled oscillator for low power consumption // AJAST. 2017. Vol. 1. Iss. 4. P. 24–27.

20. ***Sheng D., Chung C.-C., Lan J.-C.*** A monotonic and low-power digitally controlled oscillator using standard cells for SoC applications // 2012 4th Asia Symposium on Quality Electronic Design (ASQED). Penang: IEEE, 2012. P. 123–127. https://doi.org/10.1109/ACQED.2012.6320487

21. ***Sanchez-Azqueta C., Celma S.*** A phase detection scheme for clock and data recovery applications // 2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD). Linköping: IEEE, 2011. P. 130–133. https://doi.org/10.1109/ECCTD.2011.6043294

Обзор поступил в редакцию 15.09.2023 г.; одобрен после рецензирования 03.10.2023 г.;
принят к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Раннев Николай Юрьевич – начальник лаборатории отдела проектирования аналоговых блоков АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), nrannev@elvees.com

Кондратенко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела проектирования аналоговых блоков АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), skondratenko@elvees.com

Байков Валерий Дмитриевич – главный специалист отдела проектирования аналоговых блоков АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), vbaykov@elvees.com

Дубинский Алексей Васильевич – кандидат технических наук, начальник отдела проектирования аналоговых блоков АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), dav@elvees.com

Горшкова Наталья Михайловна – кандидат технических наук, начальник лаборатории отдела проектирования аналоговых блоков АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), ngorshkova@elvees.com

Скок Дмитрий Владимирович – директор по проектированию АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Конструктора Лукина, 14, стр. 14), dskok@elvees.com

References

1. Steyaert M., Roermund A. H. M. van, Casier H., eds. *Analog circuit design: High-speed clock and data recovery, high-performance amplifiers, power management.* Dordrecht, Springer, 2008. xii, 358 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8944-2

2. Changzhi Y., Himchan P., Qiwei H., Daewung L., Hyunmook K., Hyunbae L., Jinwook B. All-digital half-rate referenceless CDR with single direction frequency sweep scheme using asymmetric binary phase detector. *IEICE Electronics Express*, 2020, vol. 17, no. 6, art. ID: 20200024. https://doi.org/10.1587/elex.17.20200024

3. Jeong D.-K. *Topics in IC design. 6.1. Introduction to clock and data recovery*, lecture course. Seoul, Seoul National Univ., 2020. 27 p.

4. Hsieh M.-t., Sobelman G. E. Architectures for multi-gigabit wire-linked clock and data recovery. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2008, vol. 8, iss. 4, pp. 45–57. https://doi.org/10.1109/MCAS.2008.930152

5. *United States Patent and Trademark Office.* Available at: https://www.uspto.gov/ (accessed: 04.03.2024).

6. Walker R. C. Designing bang-bang PLLs for clock and data recovery in serial data transmission systems. *Phase-locking in high-performance systems – from devices to architectures*, ed. B. Razavi. S. l., Wiley-IEEE Press, 2003, pp. 34–45. https://doi.org/10.1109/9780470545492.ch4

7. Talegaonkar M., Inti R., Hanumolu P. K. Digital clock and data recovery circuit design: Challenges and tradeoffs. *2011 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC).* San Jose, CA, IEEE, 2011, pp. 1–8. https://doi.org/10.1109/CICC.2011.6055346

8. Razavi B. Challenges in the design of high-speed clock and data recovery circuits. *IEEE Communications Magazine*, 2002, vol. 40, iss. 8, pp. 94–101. https://doi.org/10.1109/MCOM.2002.1024421

9. Shu G., Choi W.-S., Saxena S., Talegaonkar M., Anand T., Elkholy A., Elshazly A., Hanumolu P. K. A 4-to-10.5 Gb/s continuous-rate digital clock and data recovery with automatic frequency acquisition. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, vol. 51, iss. 2, pp. 428–439. https://doi.org/10.1109/JSSC.2015.2497963

10. Kwon D.-H., Park Y.-S., Choi W.-Y. A clock and data recovery circuit with programmable multi-level phase detector characteristics and a built-in jitter monitor. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2015, vol. 62, no. 6, pp. 1472–1480. https://doi.org/10.1109/TCSI.2015.2415180

11. Gimeno C., Bol D., Flandre D. Multilevel half-rate phase detector for clock and data recovery circuits. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2018, vol. 26, iss. 9, pp. 1807–1811. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2018.2826440

12. Kim J., Ko Y., Jin J., Choi J., Chun J.-H. A referenceless digital CDR with a half-rate jitter-tolerant FD and a multi-bit decimator. *Electronics*, 2022, vol. 11, iss. 4, art. no. 537. https://doi.org/10.3390/electronics11040537

13. Dalton D., Chai K., Evans E., Ferriss M., Hitchcox D., Murray P., Selvanayagam S., Shepherd P., Devito L. A 12.5-mb/s to 2.7-Gb/s continuous-rate CDR with automatic frequency acquisition and data-rate readback. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2005, vol. 40, iss. 12, pp. 2713–2725. https://doi.org/10.1109/JSSC.2005.856577

14. Masuda T., Shinoda R., Chatwin J., Wysocki J., Uchino K., Miyajima Y., Ueno Y., Maruko K. et al. A 12 Gb/s 0.9 mW/Gb/s wide-bandwidth injection-type CDR in 28 nm CMOS with reference-free frequency capture. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2016, vol. 51, iss. 12, pp. 3204–3215. https://doi.org/10.1109/JSSC.2016.2594077

15. Verbeke M., Rombouts P., Ramon H., Moeneclaey B., Yin X., Bauwelinck J., Torfs G. A 1.8-pJ/b, 12.5-25-Gb/s wide range all-digital clock and data recovery circuit. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, vol. 53, iss. 2, pp. 470–483. https://doi.org/10.1109/JSSC.2017.2755690

16. Verbeke M., Rombouts P., Ramon H., Torfs G., Bauwelinck J., Yin X. A 25 Gb/s all-digital clock and data recovery circuit for burst mode applications in PONs. *2017 European Conference on Optical Communication (ECOC).* Gothenburg, IEEE, 2017, pp. 1–3. https://doi.org/10.1109/ECOC.2017.8346193

17. Wu G., Huang D., Li J., Gui P., Liu T., Guo S., Wang R., Fan Y. et al. A 1–16 Gb/s all-digital clock and data recovery with a wideband high-linearity phase interpolator. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2016, vol. 24, iss. 7, pp. 2511–2520. https://doi.org/10.1109/TVLSI.2015.2508045

18. Cheng K.-H., Lai C.-W., Lo Y.-L. A CMOS VCO for 1V, 1GHz PLL applications. *Proceedings of 2004 IEEE Asia-Pacific Conference on Advanced System Integrated Circuits.* Fukuoka, IEEE, 2004, pp. 150–153. https://doi.org/10.1109/APASIC.2004.1349433

19. Pavithra A., Vivek K. A digital PLL using digitally controlled oscillator for low power consumption. *AJAST*, 2017, vol. 1, iss. 4, pp. 24–27.

20. Sheng D., Chung C.-C., Lan J.-C. A monotonic and low-power digitally controlled oscillator using standard cells for SoC applications. *2012 4th Asia Symposium on Quality Electronic Design (ASQED).* Penang, IEEE, 2012, pp. 123–127. https://doi.org/10.1109/ACQED.2012.6320487

21. Sanchez-Azqueta C., Celma S. A phase detection scheme for clock and data recovery applications. *2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD).* Linköping, IEEE, 2011, pp. 130–133. https://doi.org/10.1109/ECCTD.2011.6043294

The review was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 03.10.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Nikolay Yu. Rannev – Head of the Laboratory of Analog Block Design Department, JSC SPC "ELVEES" (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), nrannev@elvees.com

Sergey V. Kondratenko – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the Analog Block Design Department, JSC SPC "ELVEES" (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), skondratenko@elvees.com

Valeriy D. Baykov – Chief Specialist of the Analog Block Design Department, JSC SPC "ELVEES" (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), vbaykov@elvees.com

Alexey V. Dubinsky – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Analog Block Design Department, JSC SPC "ELVEES" (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), dav@elvees.com

Natalia M. Gorshkova – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Analog Block Design Department, JSC SPC "ELVEES" (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), ngorshkova@elvees.com

Dmitry V. Skok – Director of Design, JSC SPC "ELVEES" (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Constructor Lukin st., 14, bld. 14), dskok@elvees.com

Информация для читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Полные тексты статей журнала с 2004 по 2023 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 004.891
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-362-366
EDN: ANZIKM

Разработка модели гибридной экспертной системы для современного промышленного производства

А. В. Городилов, А. В. Чирков

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

andrewchirckov@gmail.com

Аннотация. Основная задача гибридной экспертной системы – совершенствование производственных процессов, минимизация простоев и повышение качества продукции. Гибридная конструкция системы позволяет работать с различными сценариями, адаптироваться к новым ситуациям и постоянно повышать свою эффективность. Однако существуют проблемы адаптации этих систем к уникальным особенностям различных типов производства, а также их высокой стоимости и сложности разработки и внедрения. В работе представлена модель гибридной экспертной системы, сочетающая в себе методы рассуждений на основе правил и машинного обучения, предназначенная для промышленного производства. Данная система представлена в виде циклического графа, отражающего ее способность к непрерывному обучению и адаптации. Предлагаемая модель гибридной экспертной системы является основой для разработки экспертной системы для современного промышленного производства.

Ключевые слова: гибридная экспертная система, рассуждения на основе правил, машинное обучение, промышленное производство, оптимизация процессов

Для цитирования: Городилов А. В., Чирков А. В. Разработка модели гибридной экспертной системы для современного промышленного производства // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 362–366. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-362-366. – EDN: ANZIKM.

© А. В. Городилов, А. В. Чирков, 2024

Original article

Development of the model of hybrid expert system for modern industrial production

A. V. Gorodilov, A. V. Chirkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

andrewchirckov@gmail.com

Abstract. The main objective of a hybrid expert system is to improve production processes, minimize downtime and improve product quality. The system's hybrid design allows it to handle different scenarios, adapt to new situations and continuously improve its efficiency. However there are problems of these systems' adaptation to features of various production types, and of high cost and complexity of their development and implementation. In this work, a model of a hybrid expert system is presented combining rule-based reasoning and machine learning methods and designed for industrial production. The system is represented as a cyclic graph reflecting its ability to continuously learn and adapt. The proposed model of hybrid expert system is a reliable framework for developing an expert system for modern industrial production.

Keywords: hybrid expert system, rule-based reasoning, machine learning, industrial production, process optimization

For citation: Gorodilov A. V., Chirkov A. V. Development of the model of hybrid expert system for modern industrial production. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 362–366. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-362-366. – EDN: ANZIKM.

Введение. Экспертные системы как отрасль искусственного интеллекта способны имитировать человека, принимающего решения. Однако существует проблема адаптации этих систем к особенностям разных типов производства [1]. Более того, возникает проблема высокой стоимости и сложности разработки и внедрения таких систем, а также появляются трудности в обучении персонала [2].

В экспертных системах, как правило, используются методы на основе правил и знаний. В сфере, например, промышленного производства экспертные системы и методы машинного обучения применяются для различных целей, таких как контроль процесса, диагностика неисправностей и планирование производства.

Цель настоящей работы – создание формальной модели гибридной экспертной системы для оптимизации современных производственных процессов, сокращения простоев и улучшения качества продукции.

Анализ литературных источников. Потенциал гибридных систем в распознавании и адаптации к сложным паттернам в данных представлен в работе по распознаванию активности человека в «умных домах» на основе датчиков [3]. Эта особенность распознавания и адаптации к сложным паттернам совпадает с принципом работы предлагаемой экспертной системы. В работе [4] проведен обзор кибербезопасности на основе искусственного интеллекта в автоматизации и совершенствовании вычислительных процессов в области кибербезопасности. Практическое применение рассуждений о знаниях в реальных производственных условиях отражено в исследовании по обработке

данных в реальном времени на «умной фабрике» [5]. В работе [6] показан потенциал обучения с подкреплением – одного из видов машинного обучения – в оптимизации сложных промышленных систем. Применение методов машинного обучения для уточнения базы знаний экспертной системы рассмотрено в работе по использованию индукции дерева решений для оптимизации процесса и уточнения знаний о промышленном процессе [7]. Эффективность гибридных экспертных систем в сложных диагностических задачах отмечена при робастной диагностике литий-ионных аккумуляторов [8]. Экспертные системы на основе правил в реальных сценариях применяются в онлайн-диагностике неисправностей силовых трансформаторов [9]. Универсальность гибридных экспертных систем позволяет диагностировать сердечно-сосудистые заболевания [10].

Таким образом, гибридные экспертные системы применяются в различных областях, в том числе и в промышленном производстве, эффективно сочетают в себе методы правил и знаний с методами машинного обучения при работе со сложными сценариями и адаптируются к новым ситуациям. Тем не менее необходимо проведение дальнейших исследований и эмпирических испытаний для подтверждения эффективности этих систем и выявления возможностей их оптимизации.

Методология разработки гибридной экспертной системы. Разработка экспертной системы для современного промышленного производства требует комплексной методологии, включающей в себя проектирование системы, сбор знаний, разработку механизма вывода и оценку системы. Экспертная система построена как гибридная модель с возможностями структурированного принятия решений, присущими системам, основанным на правилах, и возможностями адаптивного обучения, свойственными алгоритмам машинного обучения. Такая гибридная конструкция позволяет системе работать с широким спектром сценариев, адаптироваться к новым ситуациям и с течением времени улучшать свою производительность.

База знаний экспертной системы формируется путем получения знаний из различных источников, включая экспертов в данной области, техническую литературу и оперативные данные о производственных процессах. Затем эти знания формализуются в виде набора правил IF-THEN, составляющих базу компонента системы, основанного на правилах. Механизм вывода – это ядро экспертной системы, отвечающее за принятие решений на основе базы знаний. В разрабатываемой гибридной системе механизм вывода использует подход прямого выстраивания цепочек, начиная с известных фактов и применяя правила для вывода новых фактов. Компонент машинного обучения работает совместно с механизмом вывода, используя данные для изучения закономерностей и построения прогнозов.

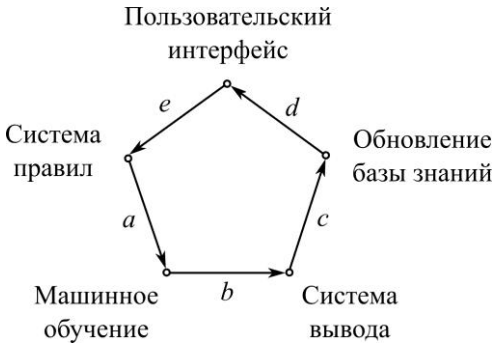
Эффективность экспертной системы оценивается на основе оперативных данных, полученных на производстве. Внимание уделяется способности системы оптимизировать производственные процессы, уменьшать время простоя и повышать качество продукции. Для оценки преимуществ гибридной экспертной системы ее эффективность сравнивают с эффективностью традиционных производственных систем.

Представление гибридной экспертной системы. Модель предлагаемой гибридной экспертной системы представлена в виде циклического графа (рисунок), где каждый узел – компонент системы (рассуждения на основе правил, машинное обучение, механизм вывода, обновление базы знаний, пользовательский интерфейс), а каждое ребро – взаимодействие между компонентами, представленное функциями *a*, *b*, *c*, *d*, *e*. Цикличность графа означает непрерывное обучение и адаптацию системы.

Функция *a* преобразует правила, полученные от компонента рассуждений на основе правил, в форму, которая используется компонентом машинного обучения. Если представить правило в виде вектора $R=[r_0, r_1, ..., r_n]$, где каждый r_i – это признак правила, то функция *a* преобразуется в вид

$$a(R)=[f(r_0), f(r_1), ..., f(r_n)].$$

Здесь *f* – функция преобразования, переводящая каждый признак в числовой формат.



Циклический граф гибридной системы
Cyclic graph of the hybrid system

Функция *b* использует модель машинного обучения для составления прогнозов на основе правил. Предлагается использовать модель логистической регрессии, которая, как правило, применяется для решения задач бинарной классификации. Если представить преобразованное правило в виде вектора $X=[x_1, x_2, ..., x_n]$, а параметры модели машинного обучения в виде $B=[b_0, b_1, ..., b_n]$, то функция *b* равна:

$$P(Y=1)=\frac{1}{1+\sqrt{e^{-(b_0+\sum_{i=1}^{N} b_i x_i)}}},$$

где $P(Y=1)$ – вероятность отказа станка / машины; $b_i(\text{for}(i=1,2,...,N))$ – параметры модели, которые обучаются на основе тренировочных данных; $x_i(\text{for}(i=1,2,...,N))$ – входные переменные.

Данная модель работает с любым количеством входных переменных, что делает ее гибким инструментом для решения различных задач бинарной классификации. Выбор входных переменных x_i должен основываться на их значимости для прогнозируемого результата.

Функция *c* использует механизм вывода для принятия решений на основе предсказаний, полученных с помощью модели машинного обучения. Если представить предсказание в виде *p*, то функция *c* преобразуется следующим образом:

$$c(p)=\begin{cases}1 \text{ if } p>t,\\ 0 \text{ if } p\le t,\end{cases}$$

где *t* – пороговое значение.

Функция *d* обновляет базу знаний на основе решений, принятых механизмом вывода. Если представить решение как *d*, а текущее состояние базы знаний как *K*, то функция *d* равна:

$$d(K,d)=K',$$

где K' – обновленное состояние базы знаний.

Точный вид функции *d* зависит от конкретного метода, используемого для обновления базы знаний.

Функция e представляет решения пользователю и получает обратную связь. Если представить решение как d, а обратную связь как f, то $e(d) = f$. Эта функция сопоставляет решение с обратной связью, полученной от пользователя.

Заключение. Рассмотренные комплексная методология и формальное представление гибридной экспертной системы могут служить основой для разработки экспертной системы для современного промышленного производства. Интеграция рассуждений на основе правил с методами машинного обучения является эффективным подходом, повышающим адаптивность и эффективность системы. Циклическая структура системы обеспечивает непрерывное обучение и адаптацию, а формальное математическое представление – разработку экспертной системы с учетом типа промышленного производства.

Для дальнейшего подтверждения ее эффективности и выявления возможностей оптимизации исследования следует направить на проведение эмпирических испытаний в реальных условиях.

Литература

1. ***Гагарина Л. Г., Дорогова Е. Г., Немцова Т. И.*** Особенности разработки программного обеспечения для автоматизации технологического процесса производства продукции различной номенклатуры // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2006. № 4. С. 36–38. EDN: KASDFN.

2. ***Скворцов В. Н.*** Проблемы обучения персонала в контексте концепции самообучающейся организации // Вестник ЛГУ им. А. С. Пушкина. 2009. Т. 3. № 1. С. 137–152. EDN: IYEBCG.

3. ***Mekruksavanich S., Jitpattanakul A.*** LSTM networks using smartphone data for sensor-based human activity recognition in smart homes // Sensors. 2021. Vol. 21. Iss. 5. Art. No. 1636. https://doi.org/10.3390/s21051636

4. ***Sarker I. H., Furhad M. H., Nowrozy R.*** AI-driven cybersecurity: An overview, security intelligence modeling and research directions // SN Comput. Sci. 2021. Vol. 2. Iss. 2. Art. No. 173. https://doi.org/10.1007/s42979-021-00557-0

5. ***Wang S., Wan J., Li D., Liu C.*** Knowledge reasoning with semantic data for real-time data processing in smart factory // Sensors. 2018. Vol. 18. Iss. 2. Art. No. 471. https://doi.org/10.3390/s18020471

6. Smart grid for industry using multi-agent reinforcement learning / ***M. Roesch, C. Linder, R. Zimmermann et al.*** // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. Iss. 19. Art. No. 6900. https://doi.org/10.3390/APP10196900

7. ***Famili A.*** Use of decision-tree induction for process optimization and knowledge refinement of an industrial process // Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing. 1994. Vol. 8. Iss. 1. P. 45–57. https://doi.org/10.1017/S0890060400000469

8. ***Jamwal A., Agrawal R., Sharma M., Giallanza A.*** Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions // Appl. Sci. 2021. Vol. 11. Iss. 12. Art. No. 5725. https://doi.org/10.3390/app11125725

9. ***Calderón Godoy A. J., González Pérez I.*** Integration of sensor and actuator networks and the SCADA system to promote the migration of the legacy flexible manufacturing system towards the Industry 4.0 concept // J. Sens. Actuator Netw. 2018. Vol. 7. Iss. 2. Art. No. 23. https://doi.org/10.3390/jsan7020023

10. A Hybrid Expert System for Heart Disease Diagnosis. Scientific Programming. P. 1128717. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-22555-0_13 (дата обращения: 15.07.2023).

Статья поступила в редакцию 20.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 01.08.2023 г.;
принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Городилов Алексей Владиславович – кандидат технических наук, доцент Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124489, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), igi@miee.ru

Чирков Андрей Владимирович – аспирант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124489, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), andrewchirckov@gmail.com

References

1. Gagarina L. G., Dorogova E. G., Nemtsova T. I. Peculiarities of software development for automation of various assortment product manufacturing process flow. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*, 2006, no. 4, pp. 36–38. (In Russian). EDN: KASDFN.

2. Skvortsov V. N. Problems of staff training in the context of concept of self-study organization. *Vestnik LGU im. A. S. Pushkina = Pushkin Leningrad State University Journal*, 2009, vol. 3, no. 1, pp. 137–152. (In Russian). EDN: IYEBCG.

3. Mekruksavanich S., Jitpattanakul A. LSTM networks using smartphone data for sensor-based human activity recognition in smart homes. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 5, art. no. 1636. https://doi.org/10.3390/s21051636

4. Sarker I. H., Furhad M. H., Nowrozy R. AI-driven cybersecurity: An overview, security intelligence modeling and research directions. *SN Comput. Sci.*, 2021, vol. 2, iss. 2, art. no. 173. https://doi.org/10.1007/s42979-021-00557-0

5. Wang S., Wan J., Li D., Liu C. Knowledge reasoning with semantic data for real-time data processing in smart factory. *Sensors*, 2018, vol. 18, iss. 2, art. no. 471. https://doi.org/10.3390/s18020471

6. Roesch M., Linder C., Zimmermann R., Rudolf A., Hohmann A., Reinhart G. Smart grid for industry using multi-agent reinforcement learning. *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, iss. 19, art. no. 6900. https://doi.org/10.3390/APP10196900

7. Famili A. Use of decision-tree induction for process optimization and knowledge refinement of an industrial process. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 1994, vol. 8, iss. 1, pp. 45–57. https://doi.org/10.1017/S0890060400000469

8. Jamwal A., Agrawal R., Sharma M., Giallanza A. Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, iss. 12, art. no. 5725. https://doi.org/10.3390/app11125725

9. Calderón Godoy A. J., González Pérez I. Integration of sensor and actuator networks and the SCADA system to promote the migration of the legacy flexible manufacturing system towards the Industry 4.0 concept. *J. Sens. Actuator Netw.*, 2018, vol. 7, iss. 2, art. no. 23. https://doi.org/10.3390/jsan7020023

10. Hybrid Expert System for Heart Disease Diagnosis. Scientific Programming, pp. 1128717. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-22555-0_13 (accessed: 15.07.2023).

The article was submitted 20.07.2023; approved after reviewing 01.08.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Alexey V. Gorodilov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), igi@miee.ru

Andrey V. Chirkov – PhD student of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), andrewchirckov@gmail.com

Научная статья
УДК.621.396.41
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-368-378
EDN: AIJVME

Исследование эффективности нелинейного сетевого кодирования

В. А. Шевцов, В. О. Казачков, И. Р. Летфуллин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

vs@mai.ru

Аннотация. Разработка методов канального кодирования в основном для приложений точка – точка обеспечивает приближение к пределу Шеннона. Развитие телекоммуникационных сетей с динамически меняющейся топологией и гетерогенных сетей привело к идее переноса процессов кодирования на сетевую структуру. Исследованные к настоящему времени сетевые коды при установлении соответствия между информационными и закодированными битами используют линейные алгебраические соотношения, определенные, как правило, на двух переменных. Последний фактор ограничивает применение таких линейных сетевых кодов только на топологии – два источника, один или несколько узлов кодирования. В работе исследован класс сетевых кодов, основанных на использовании нелинейной функции неограниченного числа переменных (логической функции абсолютного большинства), что позволяет их применять на более широком классе сетевых топологий. Предложены варианты сетевых топологий с произвольным числом кодируемых источников в одном узле кодирования – коммутации. Рассмотрены возможности объединения таких звездообразных фрагментов сети с использованием кластеризации. Исследованы характеристики помехоустойчивости нелинейных сетевых кодов произвольной избыточности с помощью статистических и аналитических моделей. Выработаны рекомендации по выбору структуры нелинейных сетевых кодов, обладающих наилучшей эффективностью. Адекватность статистических и аналитических моделей подтверждена имитационным моделированием.

Ключевые слова: сенсорные сети, гетерогенные сети, сетевое кодирование, блоковые коды, сетевой код, помехоустойчивость при кодировании, энергетическая эффективность избыточного кода

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-69-10084, https://rscf.ru/project/23-69-10084/).

Для цитирования: Шевцов В. А., Казачков В. О., Летфуллин И. Р. Исследование эффективности нелинейного сетевого кодирования // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 368–378. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-368-378. – EDN: AIJVME.

© В. А. Шевцов, В. О. Казачков, И. Р. Летфуллин, 2024

Original article

Investigation of the effectiveness of non-linear network coding

V. A. Shevtsov, V. O. Kazachkov, I. R. Letfullin

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

vs@mai.ru

Abstract. The channel coding methods development mainly for point-to-point applications provides an approximation to the Shannon limit. The development of telecommunication networks with dynamically changing topology and heterogeneous networks led to the idea of transferring coding processes to the network structure. The network codes studied to date, when establishing a correspondence between information bits and encoded bits, use linear algebraic relations defined, as a rule, on two variables. The latter factor limits the use of such linear network codes only on topologies – two sources, one or more coding nodes. In this work, a class of network codes based on the use of a non-linear function of an unlimited number of variables (the logical function of the absolute majority), which allows them to be applied to a wider class of network topologies, is investigated. Variants of network topologies with an arbitrary number of sources encoded in one coding – switching node are proposed. The possibilities of combining such star-shaped fragments of the network using clustering are considered. The characteristics of noise immunity of non-linear network codes of arbitrary redundancy were investigated using statistical and analytical models. Recommendations for choosing the structure of non-linear network codes with the best efficiency have been developed. The adequacy of statistical and analytical models is confirmed by simulation modeling.

Keywords: sensor networks, heterogeneous networks, network coding, block codes, network code, noise immunity during coding, energy efficiency of redundant code

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-69-10084, https://rscf.ru/project/23-69-10084 /).

For citation: Shevtsov V. A., Kazachkov V. O., Letfullin I. R. Investigation of the effectiveness of non-linear network coding. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 368–378. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-368-378. – EDN: AIJVME.

Введение. Сетевое кодирование, впервые представленное в работе [1], применяется в многоточечных сетях в отличие от шенноновского канала, в котором кодирование рассматривается на уровне связи точка – точка. Исследования показали, что сетевое кодирование на физическом уровне обеспечивает преимущество в показателях эффективности, особенно в случаях применения с ограничением на допустимую задержку, что актуально для критически важных приложений [2]. Кроме того, сетевое кодирование используется в задачах обеспечения информационной безопасности в сетях. В работах [2–6] обсуждаются несколько типов сетевого кодирования на физическом уровне, а именно: линейное сетевое кодирование, при котором узел кодирования или ретрансляции выполняет линейную комбинацию входных данных; случайное линейное сетевое кодирование, при котором в линейной комбинации используются случайные коэффи-

циенты; аналоговое сетевое кодирование, работающее непосредственно с аналоговыми сигналами. Исследуются также несколько сценариев применения сетевого кодирования: для широковещательной (групповой) одноадресной связи, с односторонней кооперативной ретрансляцией, с двухсторонней релейной связью и в ячеистых сетях. Перспективным считается совместное использование канального и сетевого кодирования [7, 8], в том числе для борьбы с группирующимися ошибками [9].

В известных исследованиях рассматриваются линейные коды и предполагается участие в процедуре сетевого кодирования не более двух узлов-источников, двух узлов-получателей и одного или более узлов-ретрансляторов. Однако современные сенсорные сети разнообразны. Процедуру сетевого кодирования в широковещательном канале можно рассматривать как частный вариант многостанционного доступа, при котором в узлах сети происходит совместная обработка сигналов, приходящих от различных источников. При этом используются различные ресурсы телекоммуникационной сети. Известна классификация методов многостанционного доступа [10] по ресурсному принципу, согласно которой в качестве таких ресурсов рассматриваются время, частота, кодовый признак, пространство (направление распространения сигнала), поляризационные характеристики электромагнитной волны (переносчика сообщения) и мощность сигнала. Приведенные в литературных источниках методы сетевого кодирования можно отнести к частному случаю использования метода множественного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA). Действительно, в промежуточных узлах сети используется объединение сообщений от различных источников на основе одной из булевых функций, в частности исключающего ИЛИ, которая определена для двух переменных.

Теория и технологии многостанционного доступа к настоящему времени достаточно глубоко изучены и разработаны. Известно большое количество модификаций методов множественного доступа и их комбинаций. Каждый из методов многостанционного доступа имеет свои преимущества и недостатки. Наиболее полный аналитический обзор этих методов представлен в работе [10].

Цель настоящей работы – поиск эффективных сетевых кодов с произвольным числом кодируемых источников в промежуточных узлах коммутации сети обмена данными.

Принцип нелинейного сетевого кодирования. Использование класса нелинейных (мажоритарных) кодов в приложении к уплотнению и кодированию двоичных сигналов на физическом уровне в системах точка – точка описано в работе [11]. Исследованиям нелинейных систем, нелинейных и неортогональных методов множественного доступа посвящены публикации [10, 12].

Рассмотрим возможность применения нелинейных кодов в распределенных сенсорных сетях. Предположим, что на сети действует единая временная шкала и все процедуры производятся синхронно. На рис. 1 приведен направленный граф сети с тремя узлами-источниками, тремя узлами-получателями и одним узлом-ретранслятором. Информационные пакеты (сигналы) от источников $И_1$, $И_2$, $И_3$ поступают на соответствующие канальные кодеры $КК_1$, $КК_2$, $КК_3$. С выходов канальных кодеров сигналы поступают на сетевой кодер, в котором вычисляется их нелинейная комбинация.

Информационные сигналы, канальные и групповые коды представим на множестве двоичных символов $a \in \{-1; 1\}$. В качестве нелинейной комбинации рассмотрим функционал жесткого ограничения линейной суммы исходных кодов:

$$S_{\text{гр}} = Sign(S_{И_1} S_{К_1}; S_{И_2} S_{К_2}; ... S_{И_k} S_{К_k}),$$

где $S_{гр}$ – сетевой групповой код; $S_{И_j}$ – символ j-го источника, $j = [1, k]$; $S_{К_j}$ – j-й канальный код длины n; k – количество кодируемых источников.

Обозначив произведение $S_{И_j} S_{К_j} = s_i$, $i = [1, n]$, определим функционал $Sign(s_i)$ согласно следующему правилу:

$$Sign(s_i) = -1, \text{ если } \sum_{j=1}^{k} s_{ik} \le 0,$$

$$Sign(s_i) = 1, \text{ если } \sum_{j=1}^{k} s_{ik} > 0.$$

Декодирование нелинейного кода в канальных декодерах основано на вычислении нормированных взаимно корреляционных функций (ВКФ) закодированного сетевого мажоритарного кода $S_{гр}(t)$ с канальными кодирующими сигналами $S_{К_i}(t)$ по формуле

$$\rho_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} S_{гр_i} S_{K_{ij}},$$

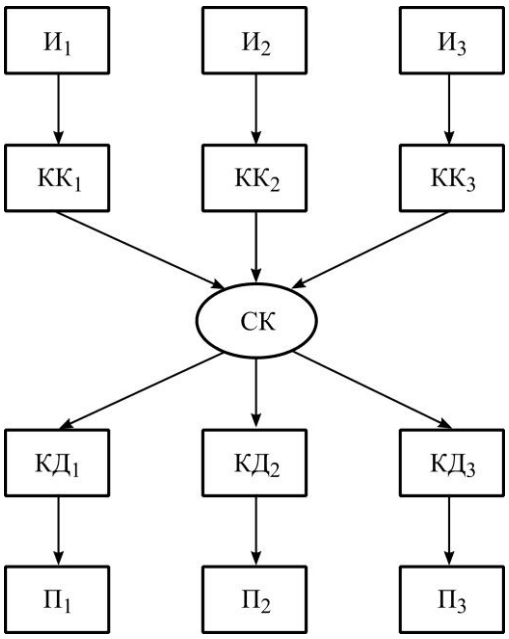


Рис. 1. Принцип нелинейного сетевого кодирования ($И_1$, $И_2$, $И_3$ – источники; $КК_1$, $КК_2$, $КК_3$ – канальные кодеры; $КД_1$, $КД_2$, $КД_3$ – канальные декодеры; $П_1$, $П_2$, $П_3$ – приемник)

Fig. 1. The principle of non-linear network coding ($И_1$, $И_2$, $И_3$ – sources; $КК_1$, $КК_2$, $КК_3$ – channel encoders; $КД_1$, $КД_2$, $КД_3$ – channel decoders; $П_1$, $П_2$, $П_3$ – receiver)

сравнении ее значения с порогом и принятии решения о значении соответствующего декодированного информационного символа $S^*_{И_i}(T)$ по правилу

$$S^*_{И_i}(T) = \begin{cases} 1, \text{ если } \rho_i \le 0, \\ -1, \text{ если } \rho_i > 0. \end{cases}$$

Очевидно, что канальные кодеры и канальные декодеры следует размещать в узлах-источниках и узлах-получателях соответственно.

На рис. 2 показан фрагмент широковещательной сети с нелинейным сетевым кодированием. Следует отметить, что на рис. 1 и 2 представлены частные случаи нелинейного сетевого кодирования для трех источников. В общем случае количество узлов-источников может быть любым. Кроме того, использование принципа сетевого кодирования позволяет выстраивать кластеризацию фрагментов сети (рис. 3).

Известно [11], что при нелинейном кодировании к ансамблю канальных кодирующих сигналов предъявляются следующие требования: они должны составлять ансамбль взаимно ортогональных сигналов или иметь малый уровень боковых лепестков ВКФ, быть равновесными и их длина должна удовлетворять условию $n = 2^k$. Согласно общепринятому обозначению сетевой код будем записывать как (n, k)-код. Более подробные исследования показывают, что последнее условие не является строгим. Можно показать (и это подтверждено моделированием), что при определенном выборе канальных кодирующих сигналов будут однозначно декодируемы, например, такие коды, как (3, 3); (7, 7); (9, 5); (15, 7) и др.

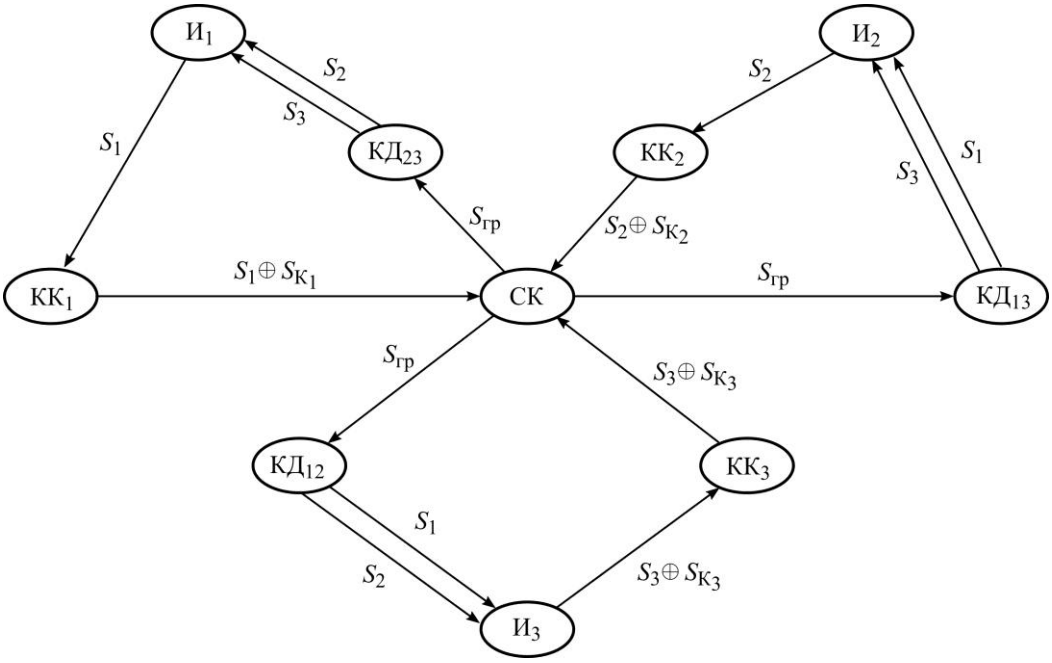


Рис. 2. Сетевое кодирование в широковещательном режиме
Fig. 2. Network encoding in broadcast mode

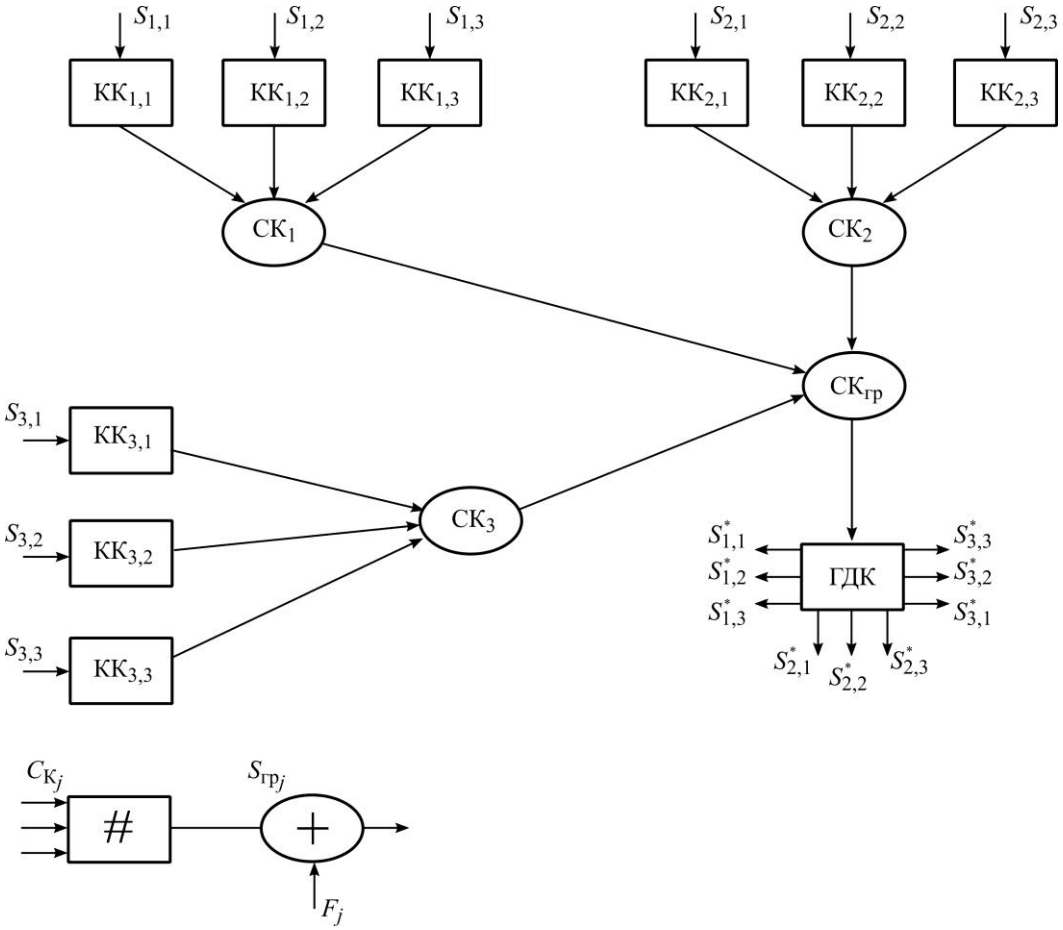


Рис. 3. Пример кластеризации при нелинейном сетевом кодировании
Fig. 3. Example of clustering in non-linear network coding

Эффективность нелинейного сетевого кода. В качестве критерия оценки эффективности передачи информации по сети примем вероятность ошибочного приема символов при фиксированной мощности сигнала на приемной стороне и фиксированной информационной скорости, т. е. фиксированной длительности информационных символов, равной T. При этом учтем, что скорость передачи информации в групповых и широковещательных каналах зависит от количества кодруемых источников k. В общем случае длительность символов τ в групповом или широковещательном канале определяется выражением $\tau = T/n$, где n – длина кода, обозначаемого обычно как (n, k). В частности, при безызбыточной передаче $n = k$.

Вероятность ошибочного приема блока из n символов в двоичном симметричном канале без памяти без кодирования описывается биномиальным законом:

$$\overline{p^{*}_{\text{гр}}} = \sum_{i=1}^{n} C_n^i p_0^i (1-p_0)^{n-i}, \qquad (1)$$

где p_0 – вероятность ошибочного приема отдельных символов группового кода.

В условиях, когда в канале действует аддитивный белый гауссовский шум, вероятность ошибочного приема символов можно оценить по формуле [13]

$$p_0 = 1 - F(h^2), \qquad (2)$$

где $F(h^2)$ – интеграл вероятностей (функция Лапласа) $F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{\frac{-t^2}{2}} dt$;

$h^2 = \frac{E}{N_0}(1-R)$; E – энергия сигнала $(E = P_c\tau)$; P_c – средняя мощность принимаемого сигнала; R – коэффициент взаимной корреляции сигналов-переносчиков символов в канале связи, который зависит, например, от способа модуляции; N_0 – энергия шума.

Рассмотрим нелинейный сетевой код (НСК) произвольной избыточности для случаев от $n = k$ до $n = 2^k$. Известно [11], что безызбыточный НСК существует только для случаев $n = k = 3$ и $n = k = 7$. Свойства предельного случая НСК для $n = 2^k$ исследованы в работе [11], где показано, что такой код проигрывает безызбыточному коду по энергетической эффективности примерно на 2 дБ. Исследуем варианты усеченного НСК, когда $k < n < 2^k$. Для таких кодов будем анализировать спектр значений ВКФ ρ_i группового кода с канальными кодами при полном переборе всех возможных значений информационных символов. Очевидно, что для (n, k)-кода мощность такого спектра равна $M = k2^k$, причем спектр симметричен относительно «нуля». Пример такого спектра для кода (31, 7) приведен на рис. 4.

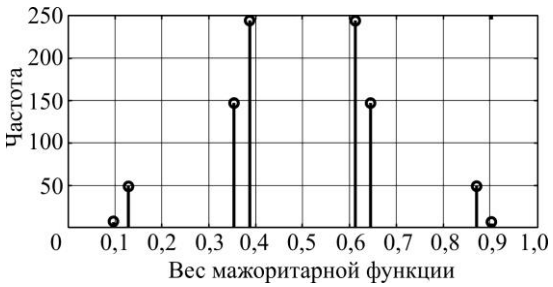


Рис. 4. Пример спектра значений ВКФ ρ_i для кода (31, 7)

Fig. 4. Example of the spectrum of values of the cross-correlation function ρ_i for the code (31, 7)

Оценим вероятность ошибочного декодирования НСК при фиксированных скорости передачи информации $(1/T)$ и средней мощности сигнала на входе декодера P_c. Как видно из рис. 4, спектр значений ВКФ характеризуется неким минимальным значением ρ_i, которое определяет исправляющую способность избыточного НСК кода.

Так, для рассматриваемого кода (31, 7) $|\rho_j|_{\min} = 4{,}5/31$, т. е. данный код исправляет все ошибки кратностью $t \le 4$. Обозначим M_j количество значений ρ_i в спектре ВКФ. Ввиду симметричности спектра ограничимся его одной полуплоскостью. Тогда

$$\sum_j M_j = \frac{M}{2} = \frac{k}{2}2^k = k2^{k-1}.$$

В данном случае вероятность ошибочного декодирования НСК можно охарактеризовать выражением

$$p_{\text{гр}}^{\#} = \sum_j \sum_{i=t_j}^{n} \frac{M_j}{k2^{k-1}} C_n^i p_0^{\#i} (1-p_0^{\#})^{n-i}, \qquad (3)$$

где t_j – кодовое расстояние между групповыми и канальными кодами для i-го значения спектра кодовых расстояний; $p_0^{\#i}$ – вероятность ошибочного приема символов группового кода.

Выражения (1) и (3) справедливы для двухэтапного декодирования, когда первая решающая схема выносит решения об оценках символов, группового кода после демодуляции с вероятностью ошибки, определяемой выражением (2), а вторая решающая схема выносит решение об оценке информационных символов после декодирования (посимвольный прием). Рассмотрим случай реализации приемника и декодера по одноэтапной схеме, когда на стороне приемника вычисляются значения ВКФ демодулированного сигнала непосредственно с образцом канального кода (прием в целом). Приведем нижнюю оценку вероятности ошибочного приема информационных символов через оценку наихудшего отношения энергии сигнала на выходе решающей схемы к спектральной плотности мощности шума. Очевидно, что для безызбыточного кода это отношение можно записать в виде

$$h_{\text{б}}^2 = \frac{P_{\text{с}}(1-R)T}{kN_0}.$$

Для НСК произвольной длины $k < n < 2^k$ нижняя оценка энергетического отношения сигнал / шум при избыточном кодировании имеет вид

$$h_{\text{изб}}^2 = \frac{RP_{\text{с}}|\rho_{\min}|T}{N_0},$$

где $|\rho_{\min}|$ – модуль минимального нормированного значения ВКФ принятого группового кода и канального кода.

Будем оценивать эффективность кодирования по сравнению с безызбыточным кодом при приеме в целом отношением

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{h_{\text{изб}}^2}{h_{\text{б}}^2} = \frac{P_{\text{с}}(1-R)|\rho_{\min}|TN_0k}{N_0TP_{\text{с}}(1-R)} = |\rho_{\min}|k.$$

Очевидно, что при посимвольном приеме отношение сигнал / шум, характеризующее нижнюю оценку вероятности ошибочного декодирования блока, можно записать в виде

$$h^2_{\text{изб}} = \frac{P_c(1-R)tT}{nN_0},$$

где $t = [|\rho_{\min}|]^* n$; $[x]$ – целая часть числа x.

В данном случае нижняя оценка энергетической эффективности кодирования равна:

$$\eta = \frac{tk}{n}.$$

На рис. 5 представлены графики нижней оценки энергетической эффективности кодирования семи источников нелинейным сетевым кодом различной длины n по сравнению с безызбыточным кодированием.

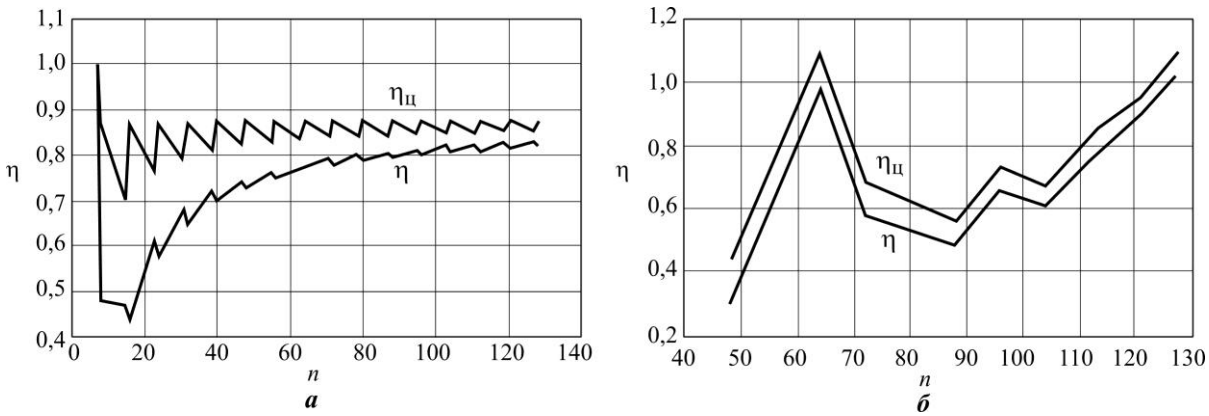


Рис. 5. Энергетическая эффективность НСК (n, 7)
Fig. 5. Energy efficiency of the non-linear network code (n, 7)

Из рис. 5 следует, что существуют наборы канальных кодов длины $n < 2^k$, обеспечивающие энергетический выигрыш при приеме в целом по сравнению с безызбыточным кодированием. Причем этот выигрыш достигается при выборе линейно независимых канальных кодов из множества ортогональных или квазиортогональных функций. Поиску таких наборов канальных кодов для произвольного количества кодируемых источников будут посвящены дальнейшие исследования.

Проведено имитационное моделирование наиболее эффективных с точки зрения нижней оценки эффективности нескольких вариантов нелинейных сетевых кодов. Моделирование проводили в среде Matlab на основе воздействия аддитивного белого гауссовского шума на групповой код, передаваемый по каналу связи с применением BPSK-модуляции, и подсчета вероятности ошибочного декодирования блокового кода при приеме в целом при наличии избыточности и без нее. Результаты моделирования представлены на рис. 6. Полученные результаты подтвердили наличие НСК, обеспечивающих выигрыш в использовании энергетики канала до 2 дБ при малых отношениях сигнал / шум. Так, из графиков на рис. 6 следует, что для кодов (15, 5) и (63, 7) обеспечивается выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с безызбыточной передачей при фиксированной скорости передачи информации.

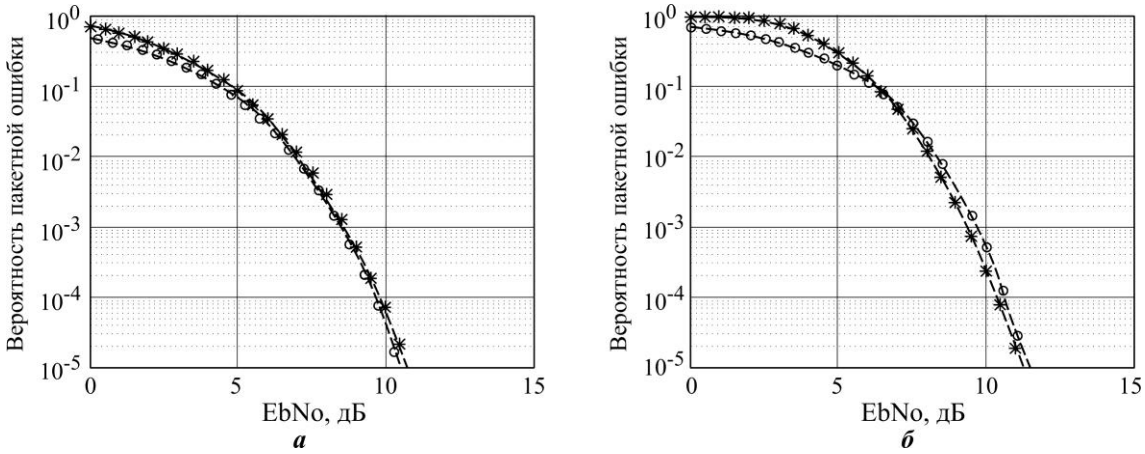


Рис. 6. Помехоустойчивость НСК по результатам имитационного моделирования для кодов $n = 15$, $k = 5$ (*а*) и $n = 63$, $k = 7$ (*б*): ○ – нелинейный сетевой код ФМ-2; * – без кодирования ФМ-2
Fig. 6. Noise immunity of the non-linear network code based on the results of simulation modeling for codes $n = 15$, $k = 5$ (*a*) and $n = 63$, $k = 7$ (*b*): ○ – non-linear network code of FM-2; * – without FM-2 encoding

Заключение. Предложенный способ сетевого кодирования позволяет гибко использовать произвольную топологию сети. Способ ориентирован на совместное кодирование в узлах коммутации и ретрансляции произвольного количества источников как в режиме адресной передачи, так и в широковещательном режиме, и допускает кластеризацию фрагментов сети с одновременным сетевым кодированием. Исследования показали, что существуют усеченные варианты НСК, позволяющие получить выигрыш по показателю энергетической эффективности по сравнению с линейными сетевыми кодами.

К недостаткам рассмотренных сетевых кодов, а также методов CDMA с прямым расширением спектра следует отнести необходимость выравнивания мощностей сигналов в узлах сети. Однако данные недостатки могут быть частично устранены за счет кластеризации сети и применения каскадных нелинейных кодов. Проблема синхронного режима, введенного как ограничение при рассмотрении НСК, как следует из предварительных исследований, может быть решена при выборе кодирующих сигналов со специальными свойствами, чему будут посвящены дальнейшие исследования.

Анализ характеристик исследованных нелинейных сетевых кодов ставит вопрос о поиске новых кодовых конструкций, оптимизирующих характеристики энергетической и частотной эффективности, а также позволяющих гибко использовать топологию гетерогенных сенсорных сетей, в том числе с динамически меняющейся топологией.

Литература

1. ***Ahlswede R., Cai N., Li S.-Y. R., Yeung R. W.*** Network information flow // IEEE Transactions on Information Theory. 2000. Vol. 46. Iss. 4. P. 1204–1216. https://doi.org/10.1109/18.850663

2. Сетевое кодирование / ***Э. М. Габидулин, Н. И. Пилипчук, А. И. Колыбельников и др.*** // Тр. МФТИ. 2009. Т. 1. № 2. С. 3–28. EDN: LKGAMF.

3. ***Başaran S. T., Kurt G. K., Uysal M., Altunbaş I.*** A tutorial on network coded cooperation // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. Iss. 4. P. 2970–2990. https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2562027

4. ***Zhang S., Liew S. C., Lam P. P.*** Hot topic: Physical-layer network coding // Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '06). New York: ACM, 2006. P. 358–365. https://doi.org/10.1145/1161089.1161129

5. ***Katti S., Gollakota S., Katabi D.*** Embracing wireless interference: Analog network coding // SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 2007. Vol. 37. Iss. 4. P. 397–408. https://doi.org/10.1145/1282427.1282425

6. ***Hausl C., Dupraz P.*** Joint network-channel coding for the multiple-access relay channel // 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Reston, VA: IEEE, 2006. P. 817–822. https://doi.org/10.1109/SAHCN.2006.288566

7. Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков: от подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту / ред. ***В. Тонг, П. Чжу***. М.: ДМК Пресс, 2022. 624 с.

8. ***Волков А. С., Солодков А. В., Цымляков Д. В.*** Разработка программно-аппаратного стенда для исследования характеристик полярных кодов // Тр. МАИ. 2021. № 116. Ст. 7. https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-07. – EDN: QRQQKW.

9. ***Волков А. С.*** Разработка имитационной модели канала с группирующимися ошибками // Тр. МАИ. 2023. № 128. Ст. 12. https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12. – EDN: ZKUGZE.

10. ***Бондарев А.*** Обзор методов множественного доступа в беспроводной связи. Ч. 1. Как разделить спектр: Частотно-временное разделение // Хабр [Электронный ресурс]. 18.07.2022. https://habr.com/ru/company/etmc_exponenta/blog/677524/ (дата обращения: 13.03.2024).

11. ***Гридин В. Н., Мазепа Р. Б., Рощин Б. В.*** Мажоритарное уплотнение и кодирование двоичных сигналов. М.: Наука, 2001. 105 с.

12. ***Шевнина Ю. С.*** Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 3. С. 407–415. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415. – EDN: BZRDEB.

13. ***Финк Л. М.*** Теория передачи дискретных сообщений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Сов. радио, 1970. 728 с.

Статья поступила в редакцию 26.07.2023 г.; одобрена после рецензирования 11.12.2023 г.;
принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторах

Шевцов Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникаций Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), vs@mai.ru

Казачков Виталий Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры инфокоммуникаций Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), kazachkov.vo@gmail.com

Летфуллин Ильгам Рамилевич – аспирант кафедры инфокоммуникаций Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), l.ilgam@yandex.ru

References

1. Ahlswede R., Cai N., Li S.-Y. R., Yeung R. W. Network information flow. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, vol. 46, iss. 4, pp. 1204–1216. https://doi.org/10.1109/18.850663

2. Gabidulin E. M., Pilipchuk N. I., Kolybel'nikov A. I., Urivskiy A. V., Vladimirov S. M., Grigor'yev A. A. Network coding. *Trudy MFTI = Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*, 2009, vol. 1, no. 2, pp. 3–28. (In Russian). EDN: LKGAMF.

3. Başaran S. T., Kurt G. K., Uysal M., Altunbaş I. A tutorial on network coded cooperation. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18, iss. 4, pp. 2970–2990. https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2562027

4. Zhang S., Liew S. C., Lam P. P. Hot topic: Physical-layer network coding. *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '06).* New York, ACM, 2006, pp. 358–365. https://doi.org/10.1145/1161089.1161129

5. Katti S., Gollakota S., Katabi D. Embracing wireless interference: Analog network coding. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 2007, vol. 37, iss. 4, pp. 397–408. https://doi.org/10.1145/1282427.1282425

6. Hausl C., Dupraz P. Joint network-channel coding for the multiple access relay channel. *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. Reston, VA, IEEE, 2006, pp. 817–822. https://doi.org/10.1109/SAHCN.2006.288566

7. Tong W., Zhu P., eds. *6G: The next horizon: from connected people and things to connected intelligence.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2021. 490 p.

8. Volkov A. S., Solodkov A. V., Tsymlyakov D. V. Developing program-hardware interface for polar codes characteristics studying. *Trudy MAI*, 2021, no. 116, art. no. 7. (In Russian). https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-07. – EDN: QRQQKW

9. Volkov A. S. The development of simulation model of channel with burst error arrays. *Trudy MAI*, 2023, no. 128, art. no. 12. (In Russian). https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12. – EDN: ZKUGZE.

10. Bondarev A. Review of multiple access methods in wireless communication. Part 1. How to divide a specter. Frequency-time division. *Habr*. 18.07.2022. (In Russian). Available at: http://habr.com/ru/company/etmc_exponenta/blog/677524/ (accessed: 13.03.2024).

11. Gridin V. N., Mazepa R. B., Roshchin B. V. *Majority compaction and coding of binary signals.* Moscow, Nauka, 2001. 105 p. (In Russian).

12. Shevnina Ju. S. Method for estimating the state of a nonlinear system based on logical data analysis. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 3, pp. 407–415. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415. – EDN: BZRDEB.

13. Fink L. M. *Theory of discrete messages transmission.* 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Sov. radio, 1970. 728 p. (In Russian).

The article was submitted 26.07.2023; approved after reviewing 11.12.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the authors

Vyacheslav A. Shevtsov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Infocommunications Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125080, Moscow, Volokolamsk ave., 4), vs@mai.ru

Vitaly O. Kazachkov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Infocommunications Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125080, Moscow, Volokolamsk ave., 4), kazachkov.vo@gmail.com

Ilgam R. Letfullin – PhD student of the Infocommunications Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125080, Moscow, Volokolamsk ave., 4), l.ilgam@yandex.ru

Уважаемые авторы!

С правилами оформления и опубликования научных статей можно ознакомиться на нашем сайте: http://ivuz-e.ru

Научная статья
УДК 004.052.32 : 681.518.5
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-379-392
EDN: AFFBGY

Особенности использования кодов Хэмминга при синтезе самопроверяемых цифровых устройств на основе метода инвертирования данных

Д. В. Ефанов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия
Российский университет транспорта, г. Москва, Россия
Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Узбекистан

TrES-4b@yandex.ru

Аннотация. Коды Хэмминга характеризуются с позиции теории синтеза самопроверяемых цифровых систем следующими свойствами: их кодеры и декодеры описываются самодвойственными и самоантидвойственными булевыми функциями. При синтезе схемы внутреннего контроля по данным диагностическим признакам важно обеспечить самодвойственность и самоантидвойственность устройства. В работе рассмотрена задача построения самопроверяемых цифровых устройств с использованием временно́й избыточности и импульсного режима работы на основе метода инвертирования данных. Предложено в схемах встроенного контроля применять в качестве диагностических признаков принадлежность формируемых функций классам самодвойственных и самоантидвойственных булевых функций, а также принадлежность формируемого кодового слова заранее выбранному коду Хэмминга. Установлено, что функции, описывающие проверочные символы кодов Хэмминга, могут быть либо только самодвойственными, либо только самоантидвойственными, либо часть из них самодвойственными, а часть самоантидвойственными. Установлены значения числа символов в кодовых словах кодов Хэмминга, для которых проверочные символы описываются только самодвойственными, либо только самоантидвойственными, либо часть из них самодвойственными, а часть – самоантидвойственными булевыми функциями. Аналогичные условия установлены и для расширенных кодов Хэмминга. Приведена структура организации схемы встроенного контроля по нескольким диагностическим признакам. Отмечено, что в основе структуры может лежать любой линейный блоковый код. Однако для каждого конкретного кода должны быть определены условия, при которых проверочные символы будут описываться только самодвойственными, либо только самоантидвойственными, либо часть из них самодвойственными, а часть – самоантидвойственными булевыми функциями. Выяснено, что использование свойств кодов Хэмминга позволяет на практике синтезировать самопроверяемые цифровые устройства на основе метода инвертирования данных при контроле вычислений по нескольким диагностическим признакам.

© Д. В. Ефанов, 2024

Ключевые слова: самопроверяемые цифровые устройства, самодвойственная булева функция, самоантидвойственная булева функция, самодвойственное цифровое устройство, самоантидвойственное цифровое устройство, контроль вычислений на выходах цифровых устройств, метод инвертирования данных, классические и расширенные коды Хэмминга

Для цитирования: Ефанов Д. В. Особенности использования кодов Хэмминга при синтезе самопроверяемых цифровых устройств на основе метода инвертирования данных // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 379–392. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-379-392. – EDN: AFFBGY.

Original article

Special aspects of Hamming codes use in the self-checking digital devices synthesis based on the data inversion method

D. V. Efanov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
Russian University of Transport, Moscow, Russia
Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

TrES-4b@yandex.ru

Abstract. Hamming codes with regard to theory of self-testing digital system synthesis are characterized by the following properties: their coders and decoders are described by self-dual and self-antidual Boolean functions. It is important during synthesis of scheme of internal control according to specified diagnostic criteria to provide self-duality and self-antiduality of a device. In this work, the task of constructing self-testing digital devices using time redundancy and pulse mode of operation based on the data inversion method is considered. It is proposed to use as diagnostic features in CED the membership of the generated functions in the self-dual and self-antidual Boolean functions classes, as well as the membership of the generated code word in a pre-selected Hamming code. It has been established that the functions describing the Hamming codes checking bits can be either only self-dual, or only self-antidual, or partially self-dual and partially self-antidual. The values of the symbols number in the Hamming codes codewords are established, for which the check symbols are described only by self-dual, or only self-antidual, or partially self-dual and partially self-antidual Boolean functions. Similar conditions are established for extended Hamming codes. The CED organization structure according to several diagnostic criteria is given. It is noted that the structure can be based on any linear block code. However, for each specific code, conditions must be determined under which the check symbols will be described only by self-dual, or only by self-antidual, or by partially self-dual and partially self-antidual Boolean functions. It has been found that the Hamming codes properties use makes it possible to synthesize in practice the self-testing digital devices based on the data inversion method when checking calculations using several diagnostic criteria.

Keywords: self-testing digital devices, self-dual Boolean function, self-antidual Boolean function, self-dual digital device, self-antidual digital device, calculation control at the digital device outputs, data inversion method, classical and extended Hamming codes

For citation: Efanov D. V Special aspects of Hamming codes use in the self-checking digital devices synthesis based on the data inversion method. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 379–392. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-379-392. – EDN: AFFBGY.

Введение. Развитие теории синтеза самопроверяемых устройств с применением временно́й избыточности и импульсного режима работы представляет собой важное для практического применения направление. Особенно оно актуально для устройств и систем критического применения с редко меняющимися входными данными [1, 2], поскольку позволяет увеличивать показатели контролепригодности в части наблюдаемости ошибок на выходах дискретных цифровых устройств при оснащении их схемами встроенного контроля (СВК) по сравнению с традиционными методами их синтеза [3].

Обзор литературных источников. В работе [4] показано, что обнаружение неисправностей в цифровых устройствах с применением временно́й избыточности и импульсного режима функционирования (на основе метода инвертирования данных) достигается за счет использования свойств самодвойственных булевых функций [5]. В работе [6] рассмотрено решение задачи синтеза цифровых устройств с самодвойственными компонентами как без памяти (комбинационного типа), так и с памятью (устройства последовательностного типа). Отмечено, что комбинационное устройство, реализованное из самодвойственных компонентов, также является самодвойственным устройством. В данном исследовании установлено, что полностью определенный автомат будет самодвойственным в случае самодвойственной его комбинационной части. В качестве примеров простейших самодвойственных автоматов приведены самодвойственные модификации триггеров. Работа [6] носит фундаментальный характер в теории синтеза цифровых устройств с контролем вычислений по признаку самодвойственности реализуемых функций.

Дальнейшее развитие теория синтеза цифровых устройств с контролем вычислений по признаку самодвойственности реализуемых функций получила в работах [7–12]. Так, в [7] приведены методы получения самодвойственных комбинационных устройств, связанные с использованием структурных преобразований путем замены элементов самодвойственными аналогами, а также с применением разложения Шеннона для реализации самодвойственной функции добавлением одной переменной. В работах [8, 9] описан метод синтеза самопроверяемого комбинационного устройства за счет реализации СВК при вычислении функции паритета по значениям выходов объекта диагностирования и дальнейшего преобразования полученной функции в самодвойственную. В [10, 11] рассмотрены различные модификации структуры организации СВК с контролем самодвойственности вычисляемых функций. Подход к реализации цифровых устройств с памятью с контролем вычислений по признаку самодвойственности реализуемых функций описан в [12].

По результатам исследований в теории синтеза самодвойственных цифровых устройств опубликованы монографии, посвященные технической диагностике дискретных систем [13–15]. Более поздние исследования применения контроля самодвойственности вычисляемых функций при построении самопроверяемых цифровых устройств связаны с контролем вычислений по двум диагностическим признакам – самодвойственности

формируемых функций и принадлежности кодовых векторов, реализуемых в СВК, заранее выбранным блоковым кодам. Так, в работах [16, 17] отмечены особенности применения равновесных кодов при использовании метода логической коррекции сигналов для синтеза самопроверяемых цифровых устройств с контролем вычислений по двум диагностическим признакам, в работе [3] исследовано применение кодов Хэмминга [18] при построении самодвойственных цифровых устройств.

Применению свойств кодов Хэмминга при синтезе устройств с обнаружением неисправностей посвящены, например, работы [19–23]. Особенности синтеза самопроверяемых схем декодирования кодов Хэмминга рассмотрены в монографии [19], результаты применения кодов Хэмминга и их модификаций для контроля устройств памяти – в работе [20], свойства кода Хэмминга, проявляющиеся при синтезе СВК, а также алгоритмы синтеза полностью самопроверяемых схем на их основе – в [21], подходы к синтезу устройств с обнаружением неисправностей на основе кодов Хэмминга – в работах [22, 23].

В настоящей работе рассматриваются результаты, полученные в теории синтеза цифровых устройств с использованием временно́й избыточности и импульсного режима работы с применением кодов Хэмминга.

Контроль вычислений по признаку принадлежности вычисляемых функций классу самодвойственных булевых функций и близким к ним. Приведем следующие определения [5].

Определение 1. Функция $g(x_1, x_2, \ldots, x_t)$ называется двойственной к функции $f(x_1, x_2, \ldots, x_t)$, если

$$g\left(x_1, x_2, ..., x_t\right) = \overline{f\left(\overline{x_1}, \overline{x_2}, ..., \overline{x_t}\right)}.$$

Определение 2. Функция $f(x_1, x_2, \ldots, x_t)$ называется самодвойственной, если

$$f\left(x_1, x_2, ..., x_t\right) = \overline{f\left(\overline{x_1}, \overline{x_2}, ..., \overline{x_t}\right)}.$$

Особенность самодвойственных функций в том, что они имеют противоположные значения на ортогональных по всем переменным входных комбинациях (на так называемых инверсных входных комбинациях).

Для дальнейшего изложения требуется использовать следующие определения [24].

Определение 3. Функция $g(x_1, x_2, \ldots, x_t)$ называется антидвойственной к функции $f(x_1, x_2, \ldots, x_t)$, если

$$g\left(x_1, x_2, ..., x_t\right) = f\left(\overline{x_1}, \overline{x_2}, ..., \overline{x_t}\right).$$

Определение 4. Функция $f(x_1, x_2, \ldots, x_t)$ называется самоантидвойственной, если

$$f\left(x_1, x_2, ..., x_t\right) = f\left(\overline{x_1}, \overline{x_2}, ..., \overline{x_t}\right).$$

Самоантидвойственные функции на инверсных входных комбинациях имеют одинаковые значения в отличие от самодвойственных. В таблице приведены примеры самодвойственных f_1 и самоантидвойственных f_2 булевых функций. Для контроля самодвойственного сигнала используется специальный тестер Self-Checking Self-Dual Checker (SDC), структура которого приведена на рис. 1, *а* [25].

Самодвойственные и самоантидвойственные булевы функции
Self-dual and self-antidual Boolean functions

№	x_1	x_2	x_3	f_1	f_2
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	1
2	0	1	0	1	1
3	0	1	1	0	0
4	1	0	0	1	0
5	1	0	1	0	1
6	1	1	0	0	1
7	1	1	1	1	0

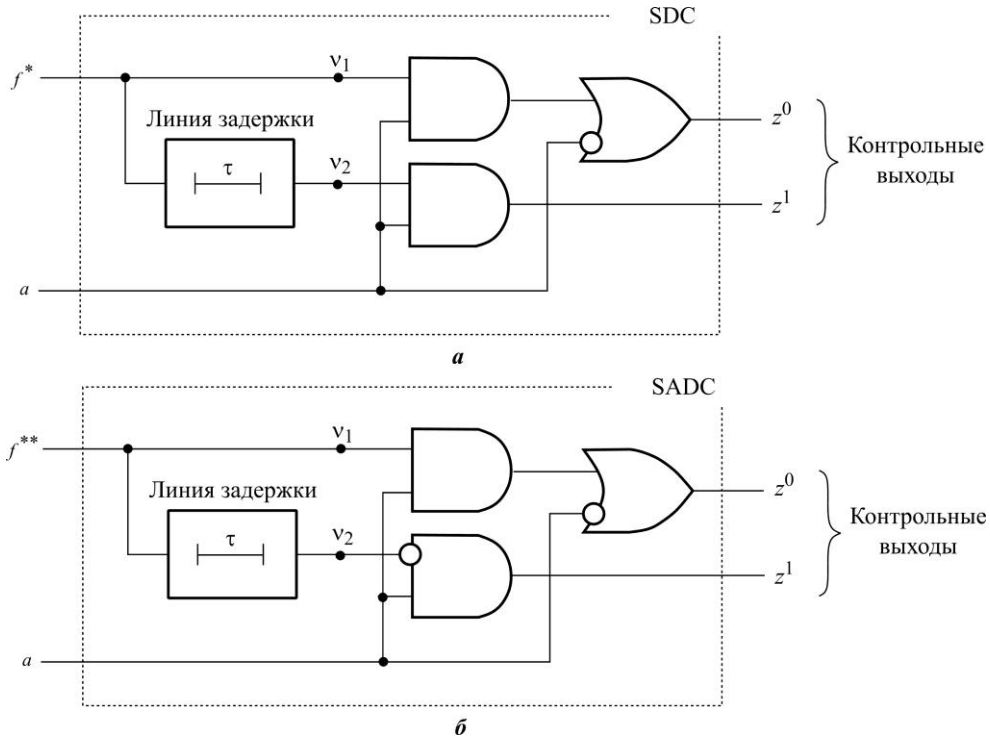


Рис. 1. Тестеры самодвойственных сигналов: *а* – SDC; *б* – SADC
Fig. 1. The self-dual signal checkers: *a* – SDC; *b* – SADC

Тестер самодвойственного сигнала позволяет контролировать принадлежность формируемой функции *f** классу самодвойственных булевых функций. С помощью линии задержки, равной одному такту импульсной последовательности *a*, сигнал *f** преобразуется в двухфазный сигнал $<\nu_1\ \nu_2>$. При отсутствии ошибок в импульсной последовательности в контрольных тактах в точках ν_1 и ν_2 формируются сигналы с противоположными значениями. В информационных тактах могут формироваться сигналы как с одинаковыми, так и с противоположными значениями. При наличии ошибки в сигнале в некотором периоде в контрольном такте этого периода в точках ν_1 и ν_2 всегда формируются сигналы с одинаковыми значениями. Отсюда следует, что контроль самодвойственного сигнала можно осуществлять только в контрольном такте. Схема SDC преобразует самодвойственный сигнал *f** в пространственный парафазный сигнал $<z^0\ z^1>$. При этом во время информационного такта, когда $a = 0$, значения сигналов на выходах z^0 и z^1 не зависят от сигналов в точках ν_1 и ν_2, на них всегда формируется парафазный

сигнал <1 0>. Во время контрольного такта, когда $a = 1$, устанавливаются равенства $z^0 = \nu_1$ и $z^1 = \nu_2$ и, следовательно, осуществляется контроль самодвойственного сигнала в текущем периоде.

Для контроля принадлежности формируемой функции f^{**} классу самоантидвойственных булевых функций используется специализированный тестер Self-Checking Self-Anti-Dual Checker (SADC) (рис. 1, *б*). Его структура отличается от тестера самодвойственного сигнала тем, что на входе второго элемента И, соединенного с выходом линии задержки, установлен инвертор. SADC работает аналогично тестеру самодвойственного сигнала.

Линейные самодвойственные и «близкие» к ним булевы функции. Самодвойственные и самоантидвойственные функции могут также принадлежать и иным классам булевых функций, свойства которых также широко используются при синтезе самопроверяемых цифровых устройств. К ним относятся, например, линейные булевы функции [5].

Определение 5. Функция $f(x_1, x_2, \ldots, x_t)$ называется линейной, если она может быть представлена в виде полинома Жегалкина первой степени:

$$f\left(x_1, x_2, ..., x_t\right) = C_0 \oplus C_1 x_1 \oplus C_2 x_2 \oplus ... \oplus C_t x_t,$$

где $C_i = 0$ или 1.

Приведем пример. Функция f_1 (см. таблицу) может быть представлена в виде $f_1 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$, а функция f_2 – в виде $f_2 = x_2 \oplus x_3$. Обе функции являются линейными. При этом первая существенно зависит от всех переменных, а вторая – только от переменных x_2 и x_3. Таким образом, среди булевых функций могут быть выделены те, которые одновременно являются линейными и самодвойственными (самоантидвойственными).

Известна следующая особенность линейных функций [3].

Теорема 1. Линейная булева функция будет самодвойственной только в том случае, если имеет нечетное количество аргументов, от которых она зависит существенно.

Из теоремы 1, например, следует, что функция f_1 (см. таблицу) самодвойственная, а функция f_2 таковой не является. Далее важно следующее утверждение, которое доказывается аналогично теореме 1.

Теорема 2. Линейная булева функция будет самоантидвойственной только в том случае, если имеет четное количество аргументов, от которых она зависит существенно.

Из теорем 1 и 2 непосредственно следует теорема 3.

Теорема 3. Линейная булева функция может быть либо самодвойственной, либо самоантидвойственной.

Самодвойственные и самоантидвойственные цифровые устройства. При построении самопроверяемых цифровых устройств применяют методы теории информации и кодирования, в том числе часто используют линейные блоковые коды [26, 27]. Одна из особенностей линейных блоковых кодов: их проверочные символы могут быть определены по линейным булевым функциям. Например, для задания классического кода Хэмминга (7, 4) используется следующая проверочная матрица:

$$H_{(7,4)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Проверочные символы могут быть определены по формулам

$$\begin{cases} g_3 = f_2 \oplus f_3 \oplus f_4, \\ g_2 = f_1 \oplus f_3 \oplus f_4, \\ g_1 = f_1 \oplus f_2 \oplus f_4. \end{cases}$$

Линейные блоковые коды особенно важны при синтезе самопроверяемых цифровых устройств, когда используются временная избыточность и импульсный режим работы, поскольку устройства кодирования и декодирования будут иметь выходы, на которых реализуются линейные функции. Контроль вычислений на таких выходах можно осуществить по признаку самодвойственности и самоантидвойственности формируемой функции.

В работах [3, 4, 6–17] развита теория синтеза цифровых устройств, вычисления в которых контролируют по принадлежности формируемых функций классу самодвойственных. В указанных источниках используется понятие самодвойственного устройства.

Определение 6. Цифровое устройство, на выходах которого реализуются исключительно самодвойственные булевы функции $\{f_1, f_2, ..., f_m\}$, называется самодвойственным устройством (SD-устройством).

Аналогично данному определению введем в рассмотрение еще два типа цифровых устройств.

Определение 7. Цифровое устройство, на выходах которого реализуются исключительно самоантидвойственные булевы функции $\{f_1, f_2, ..., f_m\}$, называется самоантидвойственным устройством (SAD-устройством).

Если речь идет об устройствах, на выходах которых реализуются только линейные булевы функции, то такие устройства могут иметь часть выходов, описываемых самодвойственными функциями, а часть – самоантидвойственными.

Определение 8. Цифровое устройство, на выходах которого реализуются функции $\{f_1, f_2, ..., f_m\}$, называется самодвойственно-самоантидвойственным устройством (SD/SAD-устройством), если выходы из множества $\{f_{i_1}, f_{i_2}, ..., f_{i_p}\} \subset \{f_1, f_2, ..., f_m\}$, ($\{f_{i_1}, f_{i_2}, ..., f_{i_p}\} \neq \{f_1, f_2, ..., f_m\}$, $\{f_{i_1}, f_{i_2}, ..., f_{i_p}\} \neq \varnothing$), $\{i_1, i_2, ..., i_p\} \in \{1, 2, ..., m\}$, описываются самодвойственными булевыми функциями, а выходы из множества $\{f_1, f_2, ..., f_m\} \setminus \{f_{i_1}, f_{i_2}, ..., f_{i_p}\}$ – самоантидвойственными булевыми функциями.

Исходя из введенных определений, кодеры и декодеры линейных блоковых кодов могут быть классифицированы как SD-устройства, SAD-устройства, SD/SAD-устройства.

Установление длин кодовых слов кодов Хэмминга с самодвойственными и близкими к ним функциями, описывающими проверочные символы. ***Классические коды Хэмминга.*** Рассмотрим коды Хэмминга. Они относятся к линейным блоковым кодам. Рассмотрим кодеры данных кодов, так как именно они используются в составе СВК [25].

Кодеры классических кодов Хэмминга будут являться SD-устройствами при выполнении следующего условия [3].

Теорема 4. При длинах кодовых слов $n = m + k = 3 + 4l$, $l \in \Gamma_0$, где m и k – число информационных и проверочных символов в кодовом слове, все линейные функции, описывающие проверочные символы классических кодов Хэмминга, будут содержать нечетное число аргументов.

Аналогично можно выделить те значения длин кодовых слов классических кодов Хэмминга, при которых их кодеры будут являться SAD-устройствами.

Теорема 5. При длинах кодовых слов $n = 2^k - 2, k \in \{3, 4, ...\}$, все линейные функции, описывающие проверочные символы классических кодов Хэмминга, будут содержать четное число аргументов.

Доказательство. Как показано в работе [3], четность или нечетность всех функций, описывающих проверочные символы для кодов Хэмминга (назовем их контрольными функциями), определяется числом суммируемых аргументов, и задача определения числа n, при котором все контрольные функции содержат четное или нечетное число аргументов, сводится к поиску сумм числа единиц по строкам проверочной матрицы (чисел E_j, $j \in \{1, 2, ..., k\}$). Проверочная матрица для классического кода Хэмминга имеет следующий вид:

$$H_n = \begin{pmatrix} 0 & 0 & ... & 1 & 1 \\ 0 & 0 & ... & 1 & 1 \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 1 & ... & 1 & 1 \\ 1 & 0 & ... & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В матрице H_n перечисляются подряд слева направо все возможные двоичные числа от числа $[00\ldots01]_2$ до числа $[11\ldots11]_2$. Столбцы, соответствующие двоичным числам с десятичными аналогами $n = 2^i$, $i \in \Gamma_0$, отводятся под проверочные символы (им соответствуют столбцы с одним символом «1»). Остальные столбцы соответствуют информационным символам. Значение функции g_j, $j = \overline{1,k}$, описывающей j-й проверочный символ, получается как сумма по модулю $M = 2$ сигналов тех информационных битов f_i, на пересечении столбцов которых с j-й строкой стоит единица. Число проверочных символов определяется как ближайшее целое, удовлетворяющее неравенству $m+1 \le 2^k - k$, где $m = n - k$ – число информационных символов.

В [3] для каждого значения n установлены числа E_j, $j \in \{1, 2, ..., k\}$. Доказано, что для $n = 2^k - 2, k \in \{2, 3, ...\}$, эти числа будут нечетными и равными $E_j = 2^{k-1} - 1$ для каждого значения j. Однако при построении классического кода Хэмминга столбцы проверочной матрицы, в которых имеется всего одна единица, отведены под проверочные символы. Из полученных чисел E_j, $j \in \{1, 2, ..., k\}$, для каждой контрольной функции следует вычесть единицу: $E^*_j = E_j - 1 = (2^{k-1} - 1) - 1 = 2^{k-1} - 2$. Этим суммам будет соответствовать число $n = 2^k - 2, k \in \{2, 3, ...\}$. При $k = 2$ классический код Хэмминга не строится, поэтому это число исключается из множества рассматриваемых.

Длины кодовых слов для классических кодов Хэмминга, для которых кодеры являются SD- и SAD-устройствами, установлены в теоремах 4 и 5. Для остальных значений n кодеры будут SD/SAD-устройствами (необходимо учесть, что коды Хэмминга не строятся для случаев $n = 2^k, k \in \{3, 4, ...\}$).

На рис. 2 представлена классификация кодеров для классических кодов Хэмминга с указанием значений длин кодовых слов для них. Числа m определяются согласно принципу, показанному в работе [3].

Расширенные коды Хэмминга. Известна модификация кода Хэмминга, для которой используются те же правила построения, что и для классического кода Хэмминга, однако дополнительно для всех информационных и проверочных символов определяется еще бит четности [27]. Такие коды называются расширенными кодами Хэмминга и имеют улучшенную обнаруживающую способность по сравнению с классическими кодами Хэмминга. Для расширенных кодов Хэмминга справедливо следующее положение.



Рис. 2. Классификация кодеров классических кодов Хэмминга
Fig. 2. The classical Hamming codes encoders classification

Теорема 6. Все линейные функции, описывающие проверочные символы расширенных кодов Хэмминга, будут содержать нечетное число аргументов при длинах кодовых слов $n = m + k = 3 + 4l,\ l \in \Gamma_0$, и четное число аргументов при длинах кодовых слов $n = 2^k - 2, k \in \{3, 4, ...\}$.

Доказательство. Расширенный код Хэмминга отличается от классического только тем, что для него используется дополнительный проверочный символ, который вычисляется как свертка по модулю $M = 2$ $n = m + k$ информационных и проверочных символов.

Из теоремы 4 следует, что нечетное число аргументов для всех контрольных функций будет иметь код со значением $n = 3 + 4l,\ l \in \Gamma_0$. Как видно из формулы, это число всегда нечетное, следовательно сохраняются условия теоремы 4 в применении к расширенному коду Хэмминга.

Согласно теореме 5 четное число аргументов для всех контрольных функций будет иметь код со значением $n = 2^k - 2, k \in \{3, 4, ...\}$. Число n в данном случае всегда четное, следовательно условия теоремы 5 в применении к расширенному коду Хэмминга также выполняются.

Таким образом, расширенный код Хэмминга имеет те же свойства с позиции признаков функций, описывающих проверочные символы, что и классический код Хэмминга.

Схема организации контроля вычислений на выходах SD-, SAD- или SD/SAD-устройств. На рис. 3 приведена схема организации контроля вычислений на выходах SD/SAD-устройств (показана только СВК; выводы рабочих выходов объекта диагностирования на управляемые объекты не приведены для упрощения схемы).

Выделены две группы выходов: выходы, на которых реализуются самодвойственные функции $\{f_1, f_2, ..., f_r\}$; выходы, на которых реализуются самоантидвойственные функции $\{f_{r+1}, f_{r+2}, ..., f_m\}$. Для контроля вычислений на выходах, входящих в первую группу, используется r SDC-устройств, а для контроля вычислений на выходах, входящих во вторую группу, используется $m - r$ SADC-устройств. Контрольные выходы SDC- и SADC-устройств подключаются к схеме сжатия парафазных сигналов mTRC1, позволяющей m контрольных сигналов сжать в один. Устройство mTRC1 реализуется на основе $m - 1$ элементарного модуля сжатия парафазных сигналов TRC (Two-Rail Checker) [25].

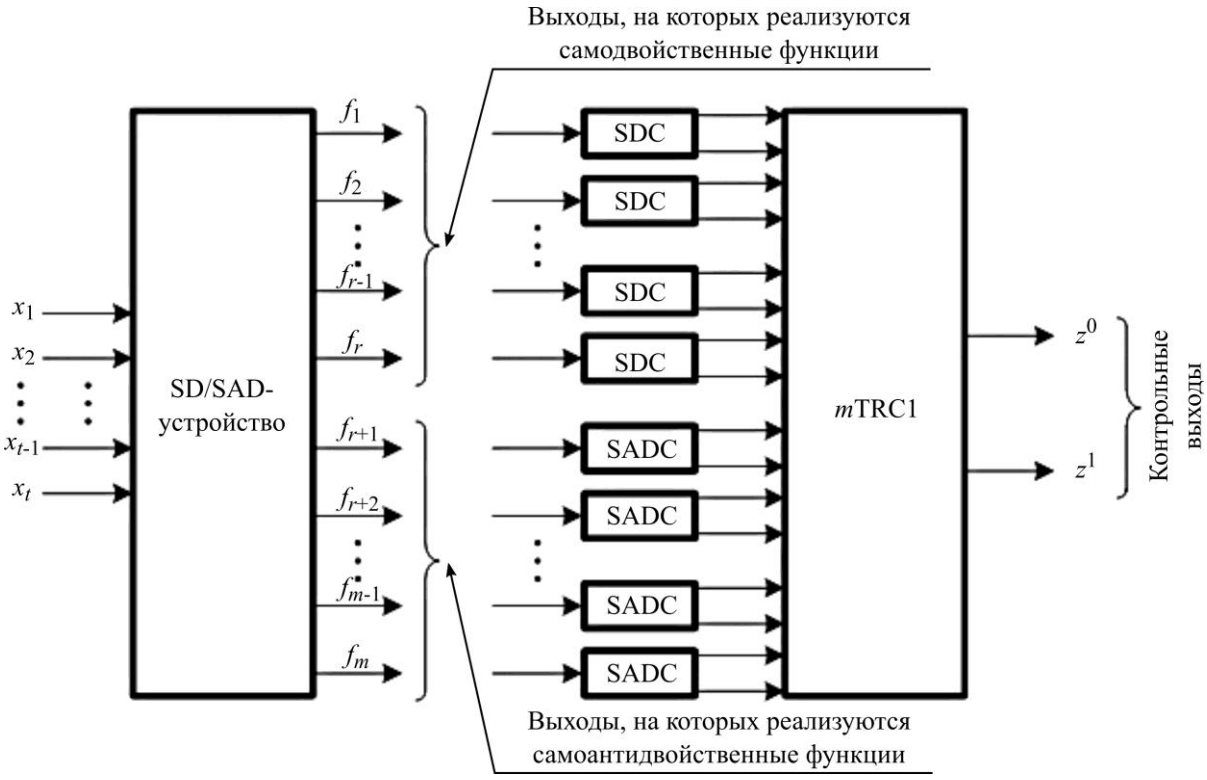


Рис. 3. Схема организации контроля вычислений на выходах SD/SAD-устройства
Fig. 3. The calculation control organizing circuit at the SD/SAD device outputs

Кодеры кодов Хэмминга (SD-, SAD- или SD/SAD-устройства) целесообразно использовать в структурах СВК. На рис. 4 приведена структурная схема организации СВК по нескольким диагностическим признакам. В ней вычисления контролируются по признаку как самодвойственности и самоантидвойственности вычисляемых функций, так и по принадлежности заранее выбранному (n, m)-коду (в рассматриваемом случае коду Хэмминга), где n – общее число символов в кодовом слове, m – число информационных символов.

Объект диагностирования – SD-, SAD- или SD/SAD-устройство $F(x)$. В работе [7] описано, как модифицировать любую структуру комбинационного устройства в самодвойственную. Аналогично можно получить структуры для SAD- или SD/SAD-устройства с учетом определения 4. В СВК установлен блок $G(f)$ – кодер (n, m)-кода, являющийся SD-, SAD- или SD/SAD-устройством. Сигналы с выходов данного блока контролируются по признаку самодвойственности или самоантидвойственности (в зависимости от числа выходов n объекта диагностирования), для чего организована схема сжатия парафазных сигналов с выходов тестеров самодвойственности и самоантидвойственности kSDC/SADC1. Здесь r выходов из k, на которых реализуются самодвойственные функции, контролируются с применением подсхемы контроля самодвойственных сигналов rSDC1, образованной r SDC-устройствами; $k-r$ выходов, на которых реализуются самоантидвойственные функции, контролируются с применением подсхемы контроля самоантидвойственных сигналов $(k–r)$SADC1, образованной $k-r$ SADC-устройствами. Сигналы с блока $G(f)$ сравниваются с инвертированными сигналами с выходов блока $G(x)$, также являющегося кодером выбранного (n, m)-кода, вычисляющим проверочные символы по значениям входных векторов системы диагностирова-

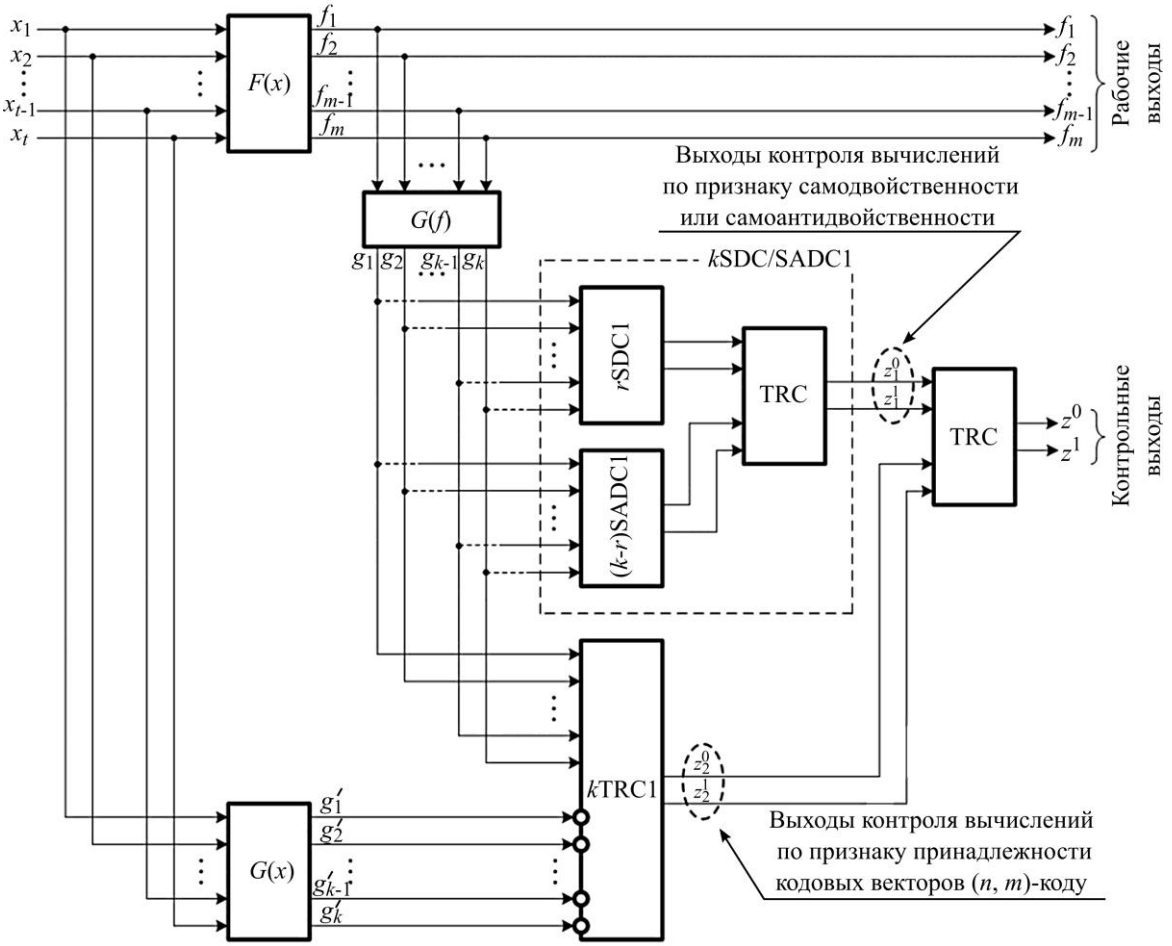


Рис. 4. Структура организации схемы встроенного контроля
Fig. 4. The CED organizational structure

ния. Сравнение осуществляется самопроверяемым компаратором *k*TRC1, представляющим собой каскадное подключение $k-1$ модуля TRC. Выходы обеих подсхем контроля объединяются на входах одного модуля TRC. Выходы данного устройства – контрольные выходы системы диагностирования.

Контроль вычислений исключительно по признаку самоантидвойственности не позволяет организовывать полностью самопроверяемые устройства относительно модели константной неисправности. Это следует из факта принадлежности элементарных функций «константа 0» и «константа 1» классу самоантидвойственных булевых функций: константные неисправности элементов выходного каскада не будут обнаруживаться. Однако при обустройстве СВК так, как это показано на рис. 4, за счет контроля вычислений по еще одному диагностическому признаку такие неисправности удается обнаруживать. Кроме того, как показано в работе [3], представленная на рис. 4 организация СВК позволяет повысить контролепригодность самопроверяемого устройства за счет увеличения показателей наблюдаемости ошибок на выходах объекта диагностирования.

Заключение. Установленные значения числа символов в кодовых словах кодов Хэмминга, при которых их кодеры будут SD-, SAD- и SD/SAD-устройствами, позволяют на практике определять целесообразный вариант организации СВК и выбирать для устройств с n выходами состав контрольного оборудования. Аналогично в качестве основы СВК для синтеза самопроверяемых устройств с применением временно́й избы-

точности и импульсного режима работы могут рассматриваться и любые другие линейные блоковые коды. Установление особенностей их применения в данном приложении – тема дальнейших исследований.

Литература

1. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / ***А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антощук и др.***; под ред. А. В. Дрозда, В. С. Харченко. Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. 614 с.
2. Green IT engineering: Concepts, models, complex systems architectures / eds ***V. Kharchenko, Yu. Kondratenko, J. Kacprzyk***. Cham: Springer, 2017. XIV, 305 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7
3. ***Ефанов Д. В., Погодина Т. С.*** Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 2. С. 349–392. https://doi.org/10.15622/ia.22.2.5. – EDN: FGQINF.
4. ***Reynolds D. A., Metze G.*** Fault detection capabilities of alternating logic // IEEE Transactions on Computers. 1978. Vol. C-27. Iss. 12. P. 1093–1098. https://doi.org/10.1109/TC.1978.1675011
5. ***Яблонский С. В.*** Введение в дискретную математику. 4-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2003. 384 с.
6. ***Аксёнова Г. П.*** Восстановление в дублированных устройствах методом инвертирования данных // Автомат. и телемех. 1987. № 10. С. 144–153.
7. ***Гессель М., Мошанин В. И., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.*** Обнаружение неисправностей в самопроверяемых комбинационных схемах с использованием свойств самодвойственных функций // Автомат. и телемех. 1997. № 12. С. 193–200. EDN: YZRWPL.
8. ***Saposhnikov Vl. V., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V. V.*** Self-dual parity checking – A new method for on-line testing // Proceedings of 14th VLSI Test Symposium. Princeton, NJ: IEEE, 1996. P. 162–168. https://doi.org/10.1109/VTEST.1996.510852
9. ***Гессель М., Дмитриев А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.*** Самотестируемая структура для функционального обнаружения отказов в комбинационных схемах // Автомат. и телемех. 1999. № 11. С. 162–174. EDN: OKENAD.
10. ***Гессель М., Дмитриев А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.*** Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах с помощью самодвойственного контроля // Автомат. и телемех. 2000. № 7. С. 140–149. EDN: OFOAVF.
11. ***Saposhnikov V. V., Moshanin V., Saposhnikov Vl. V., Goessel M.*** Experimental results for self-dual multi-output combinational circuits // Journal of Electronic Testing. 1999. Vol. 14. Iss. 3. P. 295–300. https://doi.org/10.1023/A:1008370405607
12. ***Гессель М., Дмитриев А. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В.*** Исследование свойств самодвойственных самопроверяемых многотактных схем // Автомат. и телемех. 2001. № 4. С. 148–159. EDN: ODWNLL.
13. ***Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Гессель М.*** Самодвойственные дискретные устройства. СПб.: Энергоатомиздат. С.-Петерб. отд-ние, 2001. 330 с.
14. ***Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Валиев Р. Ш.*** Синтез самодвойственных дискретных систем. СПб.: Элмор, 2006. 220 с.
15. ***Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.*** New methods of concurrent checking. Dordrecht: Springer Science+Business Media B. V., 2008. VIII, 182 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8420-1
16. Self-dual complement method up to constant-weight codes for arrangement of combinational logical circuits concurrent error-detection systems / ***D. Efanov, V. Sapozhnikov, Vl. Sapozhnikov et al.*** // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Batumi: IEEE, 2019. P. 136–143. https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884398
17. ***Efanov D. V., Pivovarov D. V.*** The hybrid structure of a self-dual built-in control circuit for combinational devices with pre-compression of signals and checking of calculations by two diagnostic parameters // 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Batumi: IEEE, 2021. P. 200–206. https://doi.org/10.1109/EWDTS52692.2021.9581019
18. ***Hamming R. W.*** Error detecting and correcting codes // Bell System Technical Journal. 1950. Vol. 29. Iss. 2. P. 147–160. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x
19. ***Согомонян Е. С., Слабаков Е. В.*** Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989. 208 с.
20. ***Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y.*** Experimental study on Hamming and Hsiao codes in the context of embedded applications // 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Novi Sad: IEEE, 2017. P. 25–28. https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110065

21. ***Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.*** Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств. СПб.: Наука, 2018. 151 с.

22. ***Stempkovsky A. L., Zhukova T. D., Telpukhov D. V., Gurov S. I.*** CICADA: A new tool to design circuits with correction and detection abilities // 2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Kazan: IEEE, 2021. P. 1–5. https://doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438900

23. ***Тельпухов Д. В., Жукова Т. Д., Щелоков А. Н., Кретинина П. Д.*** Применение кода Хэмминга в задаче повышения сбоеустойчивости комбинационных схем // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2021. № 4 (221). С. 220–231. https://doi.org/10.18522/2311-3103-2021-4-220-231. – EDN: NLBWML.

24. ***Шалыто А. А.*** Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации. СПб.: Наука, 2000. 780 с.

25. ***Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В.*** Основы теории надежности и технической диагностики: учебник. СПб.: Лань, 2019. 588 с.

26. ***Fujiwara E.*** Code design for dependable systems: Theory and practical applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2006. 720 p.

27. ***Hamming R. W.*** Coding and information theory. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985. 259 p.

Статья поступила в редакцию 14.09.2023 г.; одобрена после рецензирования 08.11.2023 г.; принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторе

Ефанов Дмитрий Викторович – доктор технических наук, профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, литера Б), профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте Российского университета транспорта (Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9), профессор кафедры автоматики и телемеханики Ташкентского государственного транспортного университета (Узбекистан, 100167, г. Ташкент, 1-й пр-д Темирйулчилар, 1), TrES-4b@yandex.ru

References

1. Drozd A. V. (auth., ed.), Kharchenko V. S. (auth., ed.), Antoshchuk S. G., Drozd Yu. V., Drozd M. A., Sulima Yu. Yu. *Objects and methods of online testing for safe instrumentation and control systems.* Khar'kov, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", 2012. 614 p. (In Russian).

2. Kharchenko V., Kondratenko Yu., Kacprzyk J., eds. *Green IT engineering: Concepts, models, complex systems architectures.* Cham: Springer, 2017. xiv, 305 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44162-7

3. Efanov D., Pogodina T. Properties investigation of self-dual combinational devices with calculation control based on Hamming codes. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation,* 2023, vol. 22, no. 2, pp. 349–392. (In Russian). https://doi.org/10.15622/ia.22.2.5. – EDN: FGQINF.

4. Reynolds D. A., Metze G. Fault detection capabilities of alternating logic. *IEEE Transactions on Computers,* 1978, vol. C-27, iss. 12, pp. 1093–1098. https://doi.org/10.1109/TC.1978.1675011

5. Yablonskiy S. V. *Introduction to discrete mathematics.* 4th print. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2003. 384 p. (In Russian).

6. Aksyonova G. P. Restoration in duplicated units by the method of data inversion. *Avtomat. i telemekh. = Autom. and Remote Control,* 1987, no. 10, pp. 144–153. (In Russian).

7. Goessel M., Moshanin V. I., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Fault detection in self-test combination circuits using the properties of self-dual functions. *Avtomat. i telemekh. = Autom. Remote Control,* 1997, no. 12, pp. 193–200. (In Russian). EDN: YZRWPL.

8. Saposhnikov Vl. V., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V. V. Self-dual parity checking – A new method for on-line testing. *Proceedings of 14th VLSI Test Symposium.* Princeton, NJ, IEEE, 1996, pp. 162–168. https://doi.org/10.1109/VTEST.1996.510852

9. Goessel M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. A self-testable structure for functional fault detection in combination circuits. *Avtomat. i telemekh. = Autom. Remote Control,* 1999, no. 11, pp. 162–174. (In Russian). EDN: OKENAD.

10. Goessel M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Detection of faults in combinational circuits by a self-dual test. *Autom. Remote Control,* 2000, vol. 61, iss. 7, pp. 1192–1200.

11. Saposhnikov V. V., Moshanin V., Saposhnikov Vl. V., Goessel M. Experimental results for self-dual multi-output combinational circuits. *Journal of Electronic Testing*, 1999, vol. 14, iss. 3, pp. 295–300. https://doi.org/10.1023/A:1008370405607

12. Gessel' M., Dmitriev A. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V. Self-dual self-testing multicycle circuits: Their properties. *Autom. Remote Control*, 2001, vol. 62, iss. 4, pp. 642–652. https://doi.org/10.1023/A:1010245914985

13. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Goessel M. *Self-dual discrete devices.* St. Petersburg, Energoatomizdat. S.-Peterb. otd-nie Publ., 2001. 330 p. (In Russian).

14. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Valiev R. Sh. *Synthesis of self-dual discrete systems.* St. Petersburg, Elmor Publ., 2006. 220 p. (In Russian).

15. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. *New methods of concurrent checking.* Dordrecht, Springer Science+Business Media B. V., 2008. viii, 182 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8420-1

16. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Osadchy G., Pivovarov D. Self-dual complement method up to constant-weight codes for arrangement of combinational logical circuits concurrent error-detection systems. *2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).* Batumi, IEEE, 2019, pp. 136–143. https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884398

17. Efanov D. V., Pivovarov D. V. The hybrid structure of a self-dual built-in control circuit for combinational devices with pre-compression of signals and checking of calculations by two diagnostic parameters. *2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).* Batumi, IEEE, 2021, pp. 200–206. https://doi.org/10.1109/EWDTS52692.2021.9581019

18. Hamming R. W. Error detecting and correcting codes. *Bell System Technical Journal*, 1950, vol. 29, iss. 2, pp. 147–160. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1950.tb00463.x

19. Sogomonyan E. S., Slabakov E. V. *Self-checking devices and fault-tolerant systems.* Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1989. 208 p. (In Russian).

20. Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y. Experimental study on Hamming and Hsiao codes in the context of embedded applications. *2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS).* Novi Sad, IEEE, 2017, pp. 25–28. https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110065

21. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. *Hamming codes in concurrent error detection systems of logic devices.* St. Petersburg, Nauka Publ., 2018. 151 p. (In Russian).

22. Stempkovsky A. L., Zhukova T. D., Telpukhov D. V., Gurov S. I. CICADA: A new tool to design circuits with correction and detection abilities. *2021 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).* Kazan, IEEE, 2021, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/SIBCON50419.2021.9438900

23. Telpukhov D. V., Zhukova T. D., Schelokov A. N., Kretinina P. D. Application of the Hamming code in the problem of increasing fault tolerance of logic circuits. *Izv. YuFU. Tekhnicheskiye nauki = Izv. SFedU. Engineering Sciences*, 2021, no. 4 (221), pp. 220–231. (In Russian). https://doi.org/10.18522/2311-3103-2021-4-220-231. – EDN: NLBWML.

24. Shalyto A. A. *Logical control. Methods for hardware and software implementation of algorithms.* St. Petersburg, Nauka Publ., 2000. 780 p. (In Russian).

25. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. *Fundamentals of reliability theory and technical diagnostics*, textbook. St. Petersburg, Lan' Publ., 2019. 588 p. (In Russian).

26. Fujiwara E. *Code design for dependable systems: Theory and practical applications.* Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2006. 720 p.

27. Hamming R. W. *Coding and information theory.* 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1985. 259 p.

The article was submitted 14.09.2023; approved after reviewing 08.11.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the author

Dmitry V. Efanov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Higher School of Transport of the Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russia, 195251, St. Petersburg, Politekhnicheskaya st., 29B), Prof. of the Automation, Remote Control and Communications on Railway Transport Department, Russian University of Transport (Russia, 127994, Moscow, Obraztsov st., 9, bld. 9), Professor of the Automation and Telemechanics Department, Tashkent State Transport University (Uzbekistan, 100167, Tashkent, 1st ave. Temiryulchilar, 1),TrES-4b@yandex.ru

Научная статья
УДК 004.056.53
doi:10.24151/1561-5405-2024-29-3-393-402
EDN: AGFKBK

О задаче оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз информационной безопасности

II. Аналитическая математическая модель

В. А. Воеводин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

vva541@mail.ru

Аннотация. Для разработки методики оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз, требуется адекватная математическая модель. Существующие математические модели позволяют учитывать серию воздействий угроз и характеризуются значительной дескриптивной сложностью, которая может быть значительно снижена. В работе представлена аналитическая математическая модель, с помощью которой может быть построена функция живучести с учетом однократного воздействия угрозы. Показано, что конкретизация общей постановки задачи дает возможность значительно упростить модель оценивания устойчивости функционирования при обеспечении приемлемой достоверности получаемого результата. Установлено, что для снижения уровня сложности необходимо принять дополнительные меры по учету погрешности получаемых результатов. Приведена новая постановка задачи, при которой принимается во внимание имеющийся и требуемый ресурс для восстановления функциональности элементов. Это позволяет учесть реальную обстановку при принятии решения по обеспечению устойчивости функционирования информационной инфраструктуры.

Ключевые слова: функциональная устойчивость, информационная инфраструктура, функция живучести, угрозы информационной безопасности, элемент информационной инфраструктуры

Для цитирования: Воеводин В. А. О задаче оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз информационной безопасности. II. Аналитическая математическая модель // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 3. С. 393–402. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-393-402. – EDN: AGFKBK.

© В. А. Воеводин, 2024

Original article

On the task of assessing the stability of the functioning of information infrastructure elements exposed to information security threats

II. Analytical mathematical model

V. A. Voevodin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

vva541@mail.ru

Abstract. In order to develop a methodology for assessing the stability of functioning of the elements of information infrastructure exposed to threats, an adequate mathematical model is required. The existing mathematical models allow considering a series of threat impacts and are characterized by significant descriptive complexity that can be reduced considerably. In this work, as a result of the research, a analytical mathematical model has been developed with the help of which the survivability function can be constructed with account for the single impact of a threat. It was demonstrated that the concretization of the general problem statement makes it possible to considerably simplify the model of functioning stability assessment while ensuring acceptable reliability of the result obtained. It has been established that to reduce complexity it is necessary to take additional measures to account for the error of the results obtained. A new formulation of the problem is given, which has respect to the available and required resource for restoring the elements functionality. This makes it possible to consider the real situation when taking a decision to ensure the stability of information infrastructure functioning.

Keywords: functional stability, information infrastructure, survivability function, threats to information security, information infrastructure element

For citation: Voevodin V. A. On the task of assessing the stability of the functioning of information infrastructure elements exposed to information security threats. II. Analytical mathematical model. *Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 3, pp. 393–402. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-3-393-402. – EDN: AGFKBK.

Введение. Для разработки методики оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз, требуется адекватная аналитическая математическая модель. Существующие математические модели [1–4], позволяющие учесть серию воздействий угроз, характеризуются дескриптивной сложностью. Эта проблема может быть решена при принятии допущений об однократности воздействия и экспоненциальных законов времени воздействия и восстановления, что на практике вполне возможно.

Настоящая работа является продолжением работы [5], в которой сформулирована задача по поиску путей снижения дескриптивной сложности при моделировании. При поиске решения учтен имеющийся ресурс для восстановления функциональности поврежденных элементов и введены ограничения на количество воздействий, что позволяет снизить сложность моделирования.

Математическая модель. Рассмотрим некоторые дополнительные свойства функции живучести $\varphi(t)$ при экспоненциальном законе $F(t)=1-e^{-\lambda t}$ ($\lambda = 1/T_\eta$, T_η – среднее время до воздействия угрозы), $G(t) = 1-e^{-\mu t}$ ($\mu = 1/T_\tau$, T_τ – среднее время до восстановления функциональности элемента). После подстановки выражений для $F(t) = 1-e^{-\lambda t}$ и $g(t) = \mu e^{-\mu t}$ в формулу

$$\nu(t)=1-PF(t)+P\int_0^t F(t-\tau)\,g(\tau)\,d\tau$$

и выполнения операций свертки выражение приобретает вид

$$\begin{aligned}\varphi(t)&=1-\lambda P(\mu-\lambda)^{-1}\left(e^{-\lambda t}-e^{-\mu t}\right),\ \lambda\neq\mu,\\ \varphi(t)&=1-\lambda P t e^{-\lambda t},\ \lambda=\mu,\end{aligned} \qquad (1)$$

где P – оценка вероятности поражения элемента при однократном воздействии угрозы; μ – интенсивность восстановления функционала элемента; λ – интенсивность воздействия угроз.

Полученная математическая модель (1) позволяет вычислить значения функции живучести $\varphi(t)$. Минимум функции живучести $\varphi(t)$ при $\lambda \neq \mu$ определяется из решения уравнения при $\varphi'(t) = 0$. Решая уравнение, определяем момент времени t_m, когда $\varphi_m = \varphi(t_m) = \min\limits_{t\in(0,T]} \varphi(t)$. В результате получаем $t_m = \ln\omega(\mu-\lambda)^{-1}$, где $\omega = \mu/\lambda$, $\lambda \neq 0$. Подставляя значение t_m в (1), после преобразований имеем $\varphi_m = 1 - P\omega^\alpha$, где $\alpha = \omega(1-\omega)^{-1}$.

С помощью полученной математической модели можно решить практическую задачу обоснования требуемого среднего времени восстановления функциональности поврежденного элемента $T_в^{тр}$, обеспечивающего требуемое минимальное значение функции живучести $\varphi_m^{тр}$. Для этого достаточно решить уравнение $\varphi_m^{тр} = 1 - P\omega^\alpha$, определить $\omega_{тр} = \mu_{тр} / \lambda = 1/\lambda T_\tau$ и вычислить $T_в^{тр} = \left(\omega_{тр}\lambda\right)^{-1}$.

Теорема 1. Если $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$, $g(t) = \mu e^{-\mu t}$ и $\lambda \neq \mu$, то минимум функции живучести φ_m зависит только от соотношения $\omega = \mu/\lambda = m_\eta/m_\tau$, $\lambda \neq 0$, где m_η – среднее время до результативного воздействия угрозы; m_τ – среднее время восстановления функционала элемента $m_\tau \neq 0$. Оценки m_η и m_τ получаем в результате статистического моделирования, либо экспериментально, если это возможно, либо экспертными методами.

Доказательство. Действительно, при $t_m = t_{\min}$ производная от функции живучести должна быть равно нулю: $\varphi'(t) = 0$ и $\lambda \neq \mu$. Определим момент времени t_m, при котором $\varphi_m = \min \varphi(t) = \varphi(t_m)$. В результате имеем $t_m = (\mu - \lambda)^{-1} \ln \omega$. Подставляя в (1) выражение для t_m, получаем

$$\varphi_m = 1 - P\,\omega^\alpha, \qquad (2)$$

где $\alpha = \omega(1-\omega)^{-1}$. Теорема доказана.

Математическая модель (2) позволяет определить требуемое среднее время восстановления функционала m_τ, при котором обеспечивается требуемое минимальное значение функции живучести $\varphi_m^{тр}$. На рис. 1 приведена зависимость функции живучести φ_m от ω при разных значениях P.

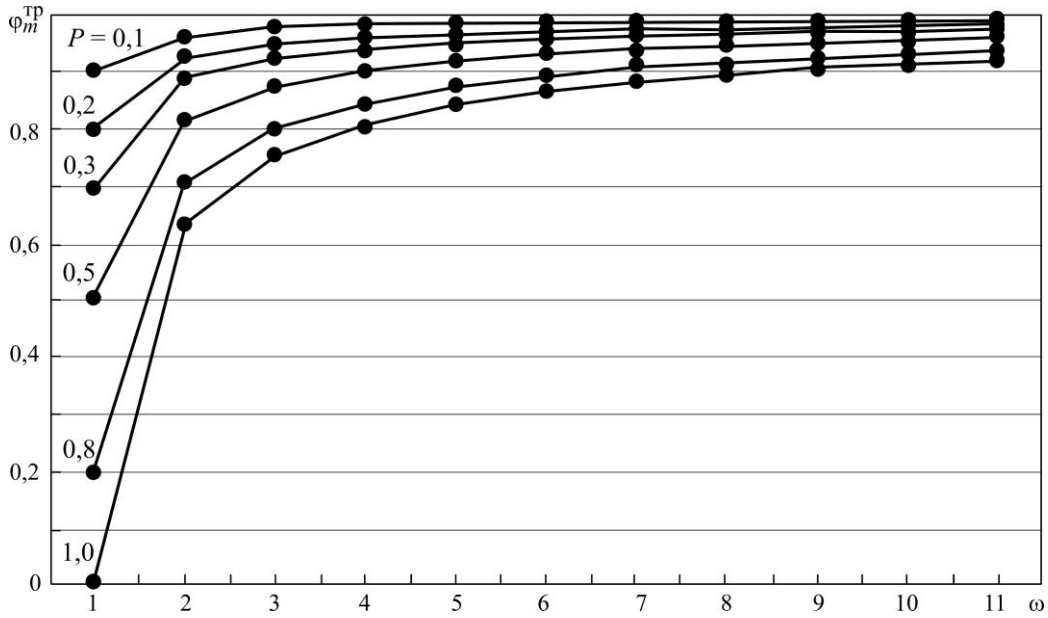


Рис. 1. Зависимость функции живучести φ_m от $\omega = \mu/\lambda = m_\eta/m_\tau$ при различных значениях P

Fig. 1. The dependence of the survivability function φ_m on $\omega = \mu/\lambda = m_\eta/m_\tau$ at different values of P

Следствие 1. При $\lambda = \mu$ минимум функции живучести не зависит от параметров законов экспоненциального распределения $F(t)$ и $G(t)$ и определяется с помощью математической модели:

$$\varphi_m = 1 - Pe^{-1}, \quad 0 \le P \le 1. \tag{3}$$

Доказательство. Действительно, при $\lambda = \mu$ значение $\omega = \mu/\lambda = 1$, поэтому

$$\lim_{\omega\to 1}\varphi_m = 1 - P\lim_{\omega\to 1}\omega^{\alpha} = 1 - Pe^{-1}. \tag{4}$$

Теорема доказана.

Аналогичный результат получаем при определении минимума функции $\varphi(t)$ с использованием модели (1) и в случае $\lambda = \mu$, $t_m = \lambda^{-1}$. Из формул (3) и (4) следует, что при $\lambda = \mu$ и $P = 1$ минимум функции живучести является величиной постоянной и равен: $\varphi_m\left(\lambda = \mu, P = 1\right) = 1 - e^{-1} \approx 0,632.$

Следствие 2. Для любых $\omega > 0$ и $0 \le P \le 1$ справедливо неравенство

$$\varphi_m(\omega, P) = 1 - P\omega^{\alpha} > K_{\text{ж}}(\omega, P) = \omega(\omega + P)^{-1}, \tag{5}$$

или

$$(1 - P\omega^{\alpha}) > K_{\text{ж}}(\omega, P) = \omega(\omega + P)^{-1}, \tag{6}$$

т. е. коэффициент живучести $K_{\text{ж}}$, определяемый по формуле $K_{\text{ж}} = m_\eta\,(m_\eta + Pm_\tau)^{-1}$ [4], является оценкой снизу минимума φ_m функции живучести $\varphi(t)$.

Доказательство. Умножим левую и правую части (6) на $(\omega + P)$ и преобразуем неравенство следующим образом:

$$(\omega + P)(1 - P\omega^{\alpha}) > \omega; \quad \omega + P - (\omega + P)P\omega^{\alpha} > \omega,$$
$$P - (\omega + P)P\omega^{\alpha} > 0; \quad P[1 - (\omega + P)\omega^{\alpha}] > 0; \quad (\omega + P)^{-1} > \omega^{\alpha}, \quad \alpha = \omega(1 - \omega)^{-1}.$$

Полученное неравенство доказывается при всех возможных значениях ω: $0 < \omega < 1$; $\omega = 1$; $\omega > 1$.

При $0 < \omega < 1$ полученное неравенство можно преобразовать в неравенство $(\omega + P)^{\omega-1} > \omega^{\omega}$, разделив левую и правую части данного неравенства соответственно на левую и правую части очевидного неравенства $(\omega + P)^{\omega-1} < \omega^{\omega-1}$. В результате получаем $[(\omega + P)^{\omega-1}]/[(\omega + P)^{\omega-1}] > \omega^{\omega}/\omega^{\omega-1}$, или $1 > \omega$. Таким образом, исходное неравенство (6) при условии, что $0 < \omega < 1$, доказано.

При $\omega = 1$, или $\lambda = \mu$, имеем $\omega^{\alpha} = e^{-1}$ и $(1 + P)^{-1} > e^{-1}$, так как $1 + P < e$.

При $\omega > 1$ преобразуем неравенство (6), разделив левую и правую части очевидного неравенства $(\omega + P)^{\omega-1} > \omega^{\omega-1}$. После умножения получаем

$$[(\omega + P)^{\omega-1}]/[(\omega + P)^{\omega-1}] < \omega^{\omega}/\omega^{\omega-1}, \text{ или } 1 < \omega.$$

Таким образом, исходное неравенство (5) доказано.

Оценка погрешности от замены φ(*t*) на $K_{ж}(\omega, P)$. При использовании $K_{ж}(\omega, P)$ в качестве нижней оценки $\varphi_m(\omega, P)$ необходимо оценить ее погрешность. Для этого вычислим значение абсолютной ошибки $\Delta(\omega, P) = \varphi_m(\omega, P) - K_{ж}(\omega, P)$. Эта погрешность значительно убывает с увеличением ω и определяется соотношением $\Delta(\omega, P) = P[1-(\omega + P)\omega^{\alpha}](\omega + P)^{-1}$, $\lambda \neq \mu$, при этом $\lim\limits_{\omega\to\infty}\Delta(\omega, P) = 0$. На рис. 2, *а* погрешность $\Delta(\omega)$ может быть большей и лежать для $P = 1$ в пределах 0,05–0,2, а для $P = 0{,}5$ в пределах 0,05–0,5, что существенно снижает достоверность результатов оценки при использовании $K_{ж}$ вместо φ_m. На графической модели (рис. 2, *б*) видно, что при значении $\omega \geq 4$ погрешность $\Delta(\omega) < 0{,}05$. Это позволяет с достаточно высокой достоверностью применять для оценки живучести $K_{ж}$ вместо φ_m.

Наряду с полученными результатами исследования возможных погрешностей актуально также определение зависимости среднего времени восстановления функциональности элемента от среднего времени до воздействия угрозы при заданном минимальном значении φ_m. Анализ математической модели (1) приводит к неочевидному результату, а именно: требуемое среднее время восстановления m_{τ} при заданной вероятности успешного воздействия угрозы P не является постоянной величиной, а прямо пропорционально среднему интервалу времени до воздействия угрозы m_{η}. Действительно, пусть установлен порог требуемой живучести элемента $\varphi_m^{тр}$ и задана вероятность потери функциональности элементов при воздействии угрозы P. Тогда, решая уравнение (1), можно определить требуемое значение $\omega_{тр}$.

Можно предположить, что $m_{\tau}^{тр}$ должно быть прямо пропорционально m_{η}. Однако значением m_{η} управлять нельзя, а можно только его прогнозировать на основе возможного сценария воздействия угроз. В результате при увеличении m_{η} при заданном значении $\varphi_m^{тр}$ следует пропорционально увеличивать $m_{\tau}^{тр}$. Значением $m_{\tau}^{тр}$ уже можно управлять, задавая требования к производительности сил восстановления функциональности.

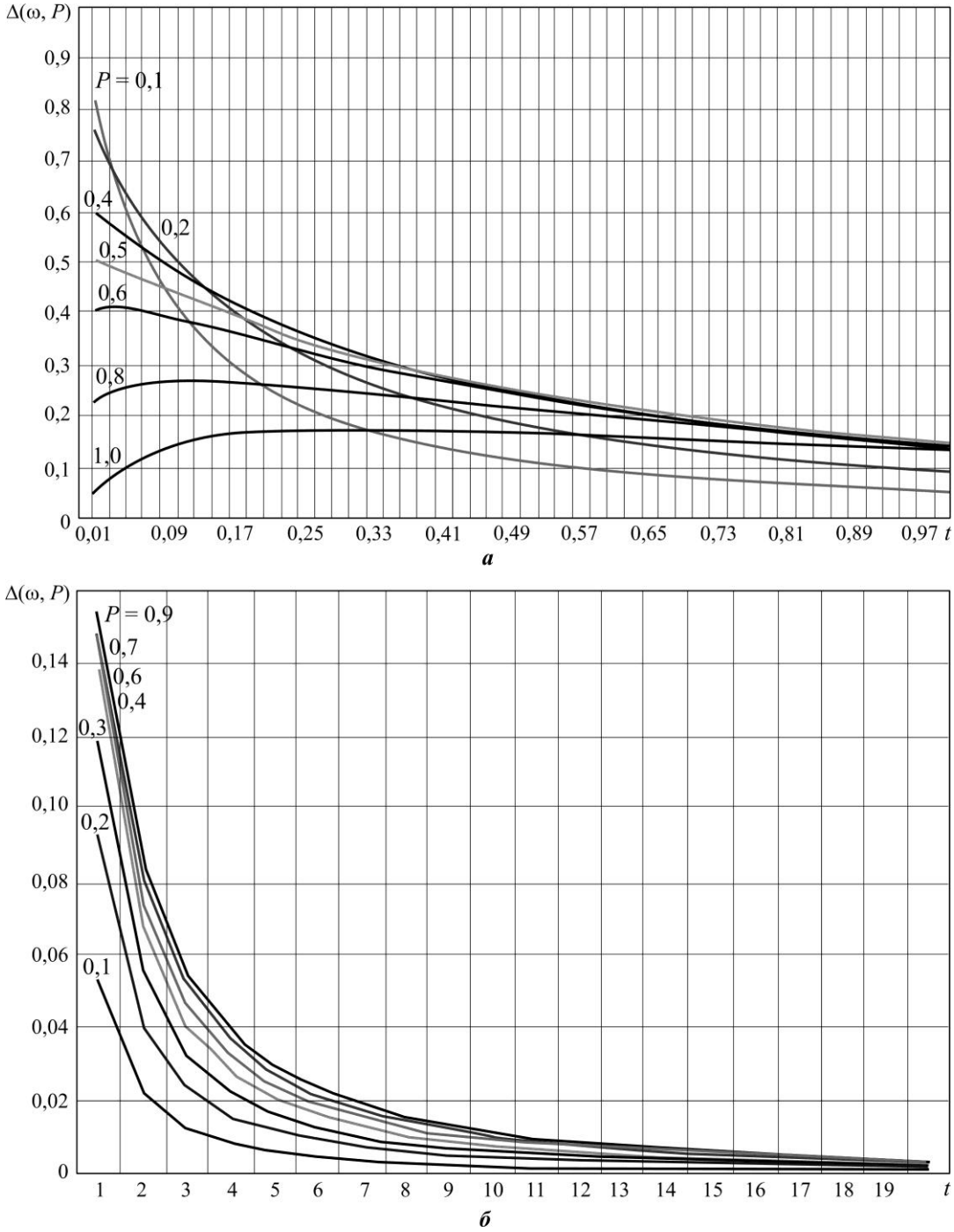


Рис. 2. Изменение абсолютной погрешности Δ(ω, *P*): *а* – при ω < 1; *б* – при ω > 1
Fig. 2. Change in absolute error Δ(ω, *P*): *a* – at ω < 1; *b* – at ω > 1

Выбор закона распределения. Экспоненциальный закон распределения $F(t)$ приемлем в тех случаях, когда есть основание предполагать, что воздействие угроз преимущественно планируется в первые моменты интервала $(0, T]$ и вероятность этого убывает с течением времени, и когда из всего семейства видов повреждений элемента большее их число может быть устранено в течение небольших промежутков времени (например, методом замены элемента) и меньшее – требует проведения кратковременного восстановления функциональности.

Равномерный закон распределения рекомендуется применять при отсутствии информации о возможных тенденциях распределения вероятностей случайных величин η и τ, диапазоны изменения которых ограничены заданными предельными значениями $\eta_н \le \eta \le \eta_в$, $\tau_н \le \tau \le \tau_в$, определяемых экспертными методами. Равномерный закон распределения позволяет аппроксимировать все другие усеченные законы распределения случайных величин с ограниченными пределами изменения. Имея генератор случайных чисел, распределенных по равномерному закону, и зная функцию, обратную к функции распределения случайной величины, можно построить генератор выборки любого непрерывного распределения (необязательно равномерного). Поэтому равномерно распределенные случайные величины позиционируются как базовые случайные величины для моделирования.

Тестовый пример решения задачи. Пусть требуется обеспечить при $P = 0{,}5$ наименьшее значение функции живучести $\varphi_m \ge 0{,}8$. С помощью графической модели (см. рис. 1) определяем требуемое значение $\omega_{тр} = 0{,}85$ и устанавливаем зависимость $m_\tau^{тр} = 1{,}18\, m_\eta$. Этой зависимости соответствуют возможные сочетания тестовых значений $m_\tau^{тр}$ и m_η:

m_η	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m_\tau^{тр}$	1,18	2,36	3,54	4,72	5,9	7,08	8,26	9,44	10,62

Таким образом, если угрозы будут воздействовать на элемент в среднем через сутки ($m_\eta = 1$) и поражать его с вероятностью 0,5, то для обеспечения $\varphi_m \ge 0{,}8$ необходимо среднее время восстановления $m_\tau \le 1{,}18$ суток; при воздействии в среднем через 5 суток $m_\eta = 5$ требование к среднему времени восстановления существенно ослабевает и определяется неравенством $m_\tau \le 5{,}9$ суток. Результат объясняется тем, что при увеличении m_η в среднем возрастает интервал состояния элемента «функционален» и возрастает его готовность выполнять задачи в составе информационной инфраструктуры. В итоге при одном и том же среднем времени восстановления m_τ это может привести к увеличению всех значений функции живучести $\varphi(t)$, в том числе и минимального значения функции живучести φ_m.

Аналогичное и, возможно, более очевидное соответствие имеет место в теории надежности [4], когда для обеспечения требуемого значения коэффициента готовности $K_г = T_u(T_u + T_в)^{-1}$ в условиях штатного применения при возрастании наработки между отказами T_u можно также увеличить предельно допустимое среднее время восстановления $T_в$. Тем самым при заданных требованиях к надежности возможно снизить требования к производительности органов восстановления работоспособности. Отсюда следует принцип, который рекомендуется соблюдать при определении рациональных характеристик системы восстановления функциональности элемента: требуемое среднее время восстановления функциональности элемента в условиях воздействия угрозы прямо пропорционально среднему времени до воздействия угрозы. Для реализации данного принципа следует выполнить два условия: корректно обосновать требования к функции живучести с учетом структурной важности элемента в составе информационной инфраструктуры и только после этого определить значение коэффициента пропорциональности $\omega_{тр}^{-1}$; при определении требуемого значения $m_\tau^{тр}$ использовать метод минимизации затрат на обеспечение живучести элемента.

Исследованию устойчивости функционирования критических информационных и телекоммуникационных инфраструктур к угрозам информационной безопасности посвящены работы [6–16]. Обобщая изложенное, можно установить следующие предельные свойства функции живучести при однократном воздействии угрозы и экспоненциальных законах распределения $F(t)$ и $G(t)$ случайных времен до воздействия угрозы и восстановления функциональности элемента соответственно:

$$\lim_{\omega\to 0}\varphi_m(\omega)=1-P,\quad \lim_{\omega\to 1}\varphi_m(\omega)=1-Pe^{-1},$$
$$\lim_{\omega\to\infty}\varphi_m(\omega)=1,\quad \lim_{\omega\to\infty}\left[\varphi_m(\omega)-K_{\text{ж}}(\omega)\right]=0.$$

На практике не всегда имеется возможность определить (прогнозировать) μ и λ, а также определить закон распределения случайных времен до воздействия угрозы η и восстановления τ. В этом случае рекомендуется использовать равномерный закон их распределения. При этом предельные значения параметров закона распределения определяются с помощью экспертных методов.

Заключение. Предложенная математическая модель позволяет определить функцию живучести элемента, подверженного воздействию угроз. С помощью математической модели представляется возможным обосновать требуемое время восстановления функциональности элемента при требуемом (заданном) минимуме его функции живучести и прогнозируемых характеристиках воздействия угроз. Имея сведения о функциях живучести отдельных элементов, возможно определить функцию живучести информационной инфраструктуры в целом и тем самым спрогнозировать устойчивость ее функционирования в условиях воздействия угроз. При превышении интенсивности восстановления функционала над интенсивностью воздействия угроз порядка более чем в 4 раза ($\omega \geq 4$) можно использовать вместо сложной и трудоемкой процедуры определения $\varphi(t)$ и ее минимального значения φ_m более простое выражение для вычисления $K_{\text{ж}}$.

Перспективным направлением для дальнейшего исследования является случай равномерного закона распределения времен до воздействия и восстановления функциональности элемента. Это обусловлено тем, что параметры равномерного закона более пригодны для экспертного оценивания, что важно при исследованиях в условиях высокой информационной неопределенности.

Литература

1. ***Воеводин В. А.*** Генезис понятия структурной устойчивости информационной инфраструктуры автоматизированной системы управления производственными процессами к воздействию целенаправленных угроз информационной безопасности // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2023. № 2. С. 30–41. EDN: ONODLF.

2. ***Воеводин В. А., Виноградов И. В., Волков Д. И.*** Об оценке устойчивости функционирования объекта информатизации в условиях компьютерных атак при экспоненциальном законе распределения времени до воздействия противника и восстановления работоспособности // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. Т. 49. № 3. С. 39–51. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-39-51. – EDN: OXAJIF.

3. ***Воеводин В. А.*** Модель оценки функциональной устойчивости элементов информационной инфраструктуры для условий воздействия множества компьютерных атак // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 3. С. 691–715. https://doi.org/10.15622/ia.22.3.8. – EDN: TYBZND.

4. ***Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.*** Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.

5. ***Воеводин В. А.*** О задаче оценивания устойчивости функционирования элементов информационной инфраструктуры, подверженной воздействию угроз информационной безопасности. I. Постановка задачи // Изв. вузов. Электроника. 2024. Т. 29. № 2. С. 249–256. https://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-249-256. – EDN: IBJUAT.

6. ***Obzherin Yu. E., Sidorov S. M., Fedorenko S. N.*** Analysis of the time reserve influence on the technological cell productivity // MATEC Web Conf. 2017. Vol. 129. Art. No. 03009. https://doi.org/10.1051/matecconf/201712903009

7. ***Недосекин А. О., Виноградов В. В.*** Оценка динамической функциональной живучести технической системы в условиях неопределенности // Мягкие измерения и вычисления. 2017. № 1 (1). С. 58–64. EDN: XUXITZ.

8. ***Гавдан Г. П., Иваненко В. Г., Рыбалко Э. П., Рыбалко Д. П.*** Устойчивость функционирования объектов критической информационной инфраструктуры // Безопасность информационных технологий. 2022. Т. 29. № 4. С. 53–66. https://doi.org/10.26583/bit.2022.4.05. – EDN: OKPDVN.

9. ***Антонов С. Г., Анциферов И. И., Климов С. М.*** Методика инструментально-расчетной оценки устойчивости объектов критической информационной инфраструктуры при информационно-технических воздействиях // Надежность. 2020. Т. 20. № 4. С. 35–41. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-35-41. – EDN: UKLVWW.

10. ***Захарченко Р. И., Королев И. Д.*** Методика оценки устойчивости функционирования объектов критической информационной инфраструктуры, функционирующей в киберпространстве // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 2. С. 52–61. https://doi.org/10.24411/2409-5419-2018-10041. – EDN: XNRISL.

11. Resilience metrics for cyber systems / ***I. Linkov, D. A. Eisenberg, K. Plourde et al.*** // Environ. Syst. Decis. 2013. Vol. 33. P. 471–476. https://doi.org/10.1007/s10669-013-9485-y

12. ***Kott A., Linkov I.*** To improve cyber resilience, measure it // Computer. 2021. Vol. 54. Iss. 2. P. 80–85. https://doi.org/10.1109/MC.2020.3038411

13. ***Краснов А. Е., Мосолов А. С., Феоктистова Н. А.*** Оценивание устойчивости критических информационных инфраструктур к угрозам информационной безопасности // Безопасность информационных технологий. 2021. Т. 28. № 1. С. 106–120. https://doi.org/10.26583/bit.2021.1.09. – EDN: JMVYBG.

14. Control traffic transmission period minimization for routing in resource constrained MANET / ***A. Bakhtin, A. Timoshenko, R. Gridasov et al.*** // 2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT). Kumaracoil: IEEE, 2015. P. 486–489. https://doi.org/10.1109/ICCICCT.2015.7475328

15. О наблюдении поверхностных электромагнитных волн в закрытых помещениях / ***М. В. Дацко, А. А. Бахтин, А. В. Тихомиров и др.*** // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 7. С. 699–701. https://doi.org/10.1134/S0033849418070057. – EDN: XWLIYX.

16. Applying of TCP-based protocols for mobile ad-hoc networks with PN signals in NS-3 / ***A. S. Volkov, A. A. Bakhtin, A. V. Ugrovatov et al.*** // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Minsk: IEEE, 2018. P. 1–6. https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457059

Статья поступила в редакцию 13.10.2023 г.; одобрена после рецензирования 20.11.2023 г.; принята к публикации 10.04.2024 г.

Информация об авторе

Воеводин Владислав Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vva541@mail.ru

References

1. Voevodin V. A. The genesis of the concept of structural stability of the information infrastructure of an automated production process management system to the impact of targeted threats to information security. *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii = Vestnik of Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service*, 2023, no. 2, pp. 30–41. (In Russian). EDN: ONODLF.

2. Voevodin V. A., Vinogradov I. V., Volkov D. I. About the informatization object functioning stability assessment in conditions of computer attacks at exponential distribution law of time before the enemy's impact.

Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 39–51. (In Russian). https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-39-51. – EDN: OXAJIF.

3. Voevodin V. A model for assessing the functional stability of information infrastructure elements for conditions of exposure to multiple computer attacks. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2023, vol. 22, no. 3, pp. 691–715. (In Russian). https://doi.org/10.15622/ia.22.3.8. – EDN: TYBZND.

4. Gnedenko B. V., Belyayev Yu. K., Solov'yev A. D. *Mathematical methods in reliability theory*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 524 p. (In Russian).

5. Voevodin V. A. On the task of assessing the stability of the functioning of information infrastructure elements exposed to information security threats. I. Problem statement. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2024, vol. 29, no. 2, pp. 249–256. ttps://doi.org/10.24151/1561-5405-2024-29-2-249-256. – EDN: IBJUAT.

6. Obzherin Yu. E., Sidorov S. M., Fedorenko S. N. Analysis of the time reserve influence on the technological cell productivity. *MATEC Web Conf.*, 2017, vol. 129, art. no. 03009. https://doi.org/10.1051/matecconf/201712903009

7. Nedosekin A. O., Vinogradov V. V. Evaluation of the dynamic functional viability of a technical system under uncertainty. *Myagkiye izmereniya i vychisleniya = Soft Measurements and Computing*, 2017, no. 1 (1), pp. 58–64. (In Russian). EDN: XUXITZ.

8. Gavdan G. P., Ivanenko V. G., Rybalko E. P., Rybalko D. P. Sustainability of the functioning of critical information infrastructure facilities. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 53–66. (In Russian). https://doi.org/10.26583/bit.2022.4.05. – EDN: OKPDVN.

9. Antonov S. G., Antsiferov I. I., Klimov S. M. Method of instrumental estimation of critical information infrastructure under information technology interference. *Nadezhnost' = Dependability*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 35–41. (In Russian). https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-35-41. – EDN: UKLVWW.

10. Zakharchenko R. I., Korolev I. D. Methods of estimation of stability of functioning of objects of critical information infrastructure operating in cyberspace. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = High Technologies in Earth Space Research*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 52–61. (In Russian). https://doi.org/10.24411/2409-5419-2018-10041. – EDN: XNRISL.

11. Linkov I., Eisenberg D. A., Plourde K., Seager Th. P., Allen J., Kott A. Resilience metrics for cyber systems. *Environ. Syst. Decis.*, 2013, vol. 33, pp. 471–476. https://doi.org/10.1007/s10669-013-9485-y

12. Kott A., Linkov I. To improve cyber resilience, measure it. *Computer*, 2021, vol. 54, iss. 2, pp. 80–85. https://doi.org/10.1109/MC.2020.3038411

13. Krasnov A. E., Mosolov A. S., Feoktistova N. A. Assessing the resilience of critical information infrastructures to information security threats. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy,* 2021, vol. 28, no. 1, pp. 106–120. (In Russian). https://doi.org/10.26583/bit.2021.1.09. – EDN: JMVYBG.

14. Bakhtin A., Timoshenko A., Gridasov R., Volkov A., Lomovskaya K. Control traffic transmission period minimization for routing in resource constrained MANET. *2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT).* Kumaracoil, IEEE, 2015, pp. 486–489. https://doi.org/10.1109/ICCICCT.2015.7475328

15. Datsko M. V., Bakhtin A. A., Tikhomirov A. V., Volkov A. S., Liseitsev A. E., Leont'ev A. A., Chaplygin S. D. On observation of surface electromagnetic waves in enclosed spaces. *J. Commun. Technol. Electron.*, 2018, vol. 63, iss. 7, pp. 778–781. https://doi.org/10.1134/S1064226918070057

16. Volkov A. S., Bakhtin A. A., Ugrovatov A. V., Volkova E. A., Shalyagin D. V. Applying of TCP-based protocols for mobile ad-hoc networks with PN signals in NS-3. *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO).* Minsk, IEEE, 2018, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457059

The article was submitted 13.10.2023; approved after reviewing 20.11.2023;
accepted for publication 10.04.2024.

Information about the author

Vladislav A. Voevodin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Information Security Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vva541@.ru

КОНФЕРЕНЦИИ

Об итогах XXXI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2024» с международным участием

С 25 по 26 апреля 2024 г. в Национальном исследовательском университете «МИЭТ» проходила XXXI Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Микроэлектроника и информатика – 2024» с международным участием.

В программу конференции включены 310 докладов из МИЭТ, МГТУ им. Баумана, МИСиС, МАИ, ИНМЭ РАН, НИУ ВШЭ, АО «НИИМЭ», АО «Ангстрем», АО «Субмикрон», НИЦ «Курчатовский институт», НПК «Технологический центр» и др. (Москва), ХГУ им. Н. Ф. Катанова (Абакан), ВлГУ (Владимир), МФТИ (Долгопрудный), Марийского государственного университета (Йошкар-Ола), ПГНИУ (Пермь), СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПбПУ (Санкт-Петербург), ЯВВУ ПВО, ЯрГУ им. П. Г. Демидова (Ярославль), ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (Белоруссия, Минск) и др. В работе конференции активное участие принимали студенты и аспиранты МИЭТ из Мьянмы.

На конференции работали 11 секций: *Материалы микро- и наноэлектроники; Проектирование ИС и электронных компонентов; Оборудование и технология полупроводниковых приборов и ИС; Сенсоры и микромеханика; Информационно-управляющие и вычислительные системы и устройства; Радиотехника, системы и устройства связи и телекоммуникаций; Информационные системы и технологии в цифровой экономике; Информационная безопасность; Биомедицинская электроника; Техносферная безопасность; Менеджмент, маркетинг, инновации наукоемких предприятий.* На конференции выступили 254 докладчика, в том числе 195 студентов, 52 аспиранта.

Конференцию открыл проректор по научной работе МИЭТ, д. т. н., проф. С. А. Гаврилов. На пленарном заседании выступил д. физ.-мат. н., проф. Центра фотоники и квантовых материалов АНОО ВО «Сколковский институт науки и технологий» Н. А. Гиппиус с докладом «Резонансные метаповерхности в фотонике».

По результатам выступлений проведен конкурс на лучшую научную работу, авторами которой являются только студенты или только аспиранты. Дипломами лауреатов отмечены 53 работы, 62 работы рекомендованы к публикации в сборнике статей конференции, который размещается в системе РИНЦ.

В рамках конференции прошел Круглый стол «Нейроморфные технологии искусственного интеллекта». Участники обсудили возможности комплексного подхода к созданию энергоэффективных нейроморфных чипов для реализации алгоритмов искусственного интеллекта.

На встрече выступили: старший преподаватель Института системной и программной инженерии и информационных технологий МИЭТ *А. И. Квач* с докладом «*Переход от нейронных к нейроморфным*

системам искусственного интеллекта»; старший преподаватель Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина МИЭТ, руководитель RTL-проектирования лаборатории энергоэффективных систем на кристалле для периферийных вычислений *Е. В. Примаков* с докладом «*Обзор архитектур современных AI вычислителей*»; старший преподаватель Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина МИЭТ, руководитель разработки систем на кристалле лаборатории энергоэффективных систем на кристалле для периферийных вычислений *А. М. Силантьев* с докладом «*Вычисления в памяти и вычисления с разреженными данными*»; руководитель научно-исследовательской лаборатории мемристивных систем на основе самоорганизованных наноструктур НПК «Технологический центр» д. физ.-мат. н., проф. МФТИ и МИЭТ *Р. Т. Сибатов* с докладом «*Наноразмерные мемристивные системы для нейроморфных вычислений*».

В рамках конференции состоялась Школа «Использование синхротронного излучения для разработки и исследования перспективных материалов и наноструктур для технологии рентгеновской литографии». На открытии Школы со вступительным словом выступил директор Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ к. физ.-мат. н. Н. А. Дюжев. В работе Школы приняли участие руководители, ученые и ведущие специалисты профильных предприятий. Перед слушателями выступили: ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН д. физ.-мат. н. *В. Л. Носик* с докладом «*Источники рентгеновского излучения для рентгеновской литографии*»; ведущий научный сотрудник Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН д. физ.-мат. н. *С. А. Лычев* и младший научный сотрудник Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН *А. В. Дигилов* с докладом «*Механические свойства тонких пленок и расчет механических напряжений в многослойных структурах*»; директор МНИЦ «Когерентная рентгеновская оптика для установок «Мегасайенс» канд. физ.-мат. н. *А. А. Снигирев* с докладом «*Возможности создания рефракционной оптики для использования в рентгеновской литографии*»; заведующий лабораторией физики и технологии многослойных структур Института физики микроструктур РАН канд. физ.-мат. н. *В. Н. Полковников* с докладом «*Технология создания отражающих покрытий для рентгеновского излучения длиной волны 13,5 нм и менее*»; к. т. н., доцент Института интегральной электроники им. академика К. А. Валиева МИЭТ *В. И. Корнеев* с докладом «*Расчет рефракционной оптики для безмасочной рентгеновской литографии*».

Школа проведена в рамках выполнения проекта «Разработка и исследование перспективных материалов и наноструктур для технологии безмасочной рентгеновской нанолитографии, применимой к созданию новой компонентной базы микро- и наноэлектроники с использованием источника синхротронного излучения» по Федеральной научно-технической программе развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг.

Проведение следующей 32-й конференции «Микроэлектроника и информатика – 2025» запланировано на апрель 2025 г.

Оргкомитет конференции