



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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 27

Vol. 27

№ 5

No. 5

сентябрь – октябрь

September – October

2022

ПОДПИСКА 2023

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
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис». Подписной индекс 38934
- **через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»:** <http://presskiosk.ru/categories>
- **через редакцию** – с любого номера и до конца года

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

<http://ivuz-e.ru>

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



Известия высших учебных заведений. ЭЛЕКТРОНИКА

Том 27, № 5, 2022
сентябрь – октябрь

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

Газарина 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., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471

Горбачевич 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

Коноплев Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X

Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)

Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293

Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)

Лабунцов 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 «Синописис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860

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», 2022
© МИЭТ, 2022

Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0002-5834-5138

Петросяниц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786

Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада),
ORCID: 0000-0003-0974-1262

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. А. 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

Тимошенко Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),
ORCID: 0000-0001-5411-1804

Хорев Анатолий Анатольевич – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

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. Проскуракова*

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

<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 11.10.2022. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 14,415 усл.печ.л., 12,608 уч.-изд.л. Тираж 130 экз. Заказ № 7. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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 группам специальностей:

05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление

05.27.00 Электроника

Включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Включен 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

- Шомахов З. В., Налимова С. С., Аубекеров К., Гукетлов А. М., Мошников В. А.* Влияние дефектов структуры поверхности наностержней оксида цинка на их газочувствительные свойства 571
- Хамдохов З. М., Маргушев З. Ч., Калажкоков З. Х., Калажкоков Х. Х., Тленкопачев М. Р., Левин Д. Д., Лосанов Х. Х.* Особенности структуры и состава пленок, полученных с помощью аэрозольного распыления растворов коллоидного графита 581

Технологические процессы и маршруты

- Терехов Д. Ю., Пепеляев Д. В., Якубов А. О., Бабич А. В., Шерченков А. А.* Разработка процесса фотолитографии для изготовления гибкого тонкопленочного термоэлектрического генератора 591

Элементы интегральной электроники

- Полунин М. Н., Лосев В. В., Чаплыгин Ю. А.* Исследование методов тестирования SINAD аналого-информационных преобразователей 603
- Попов А. В.* Расчетная модель оптической системы для одноканального двухспектрального приемника архитектуры электронно-оптического преобразователя 613

Схемотехника и проектирование

- Степченков Ю. А., Дьяченко Ю. Г., Рождественский Ю. В., Морозов Н. В., Рождественскене А. В., Степченков Д. Ю.* Самосинхронный троичный сумматор с повышенной сбоеустойчивостью 624
- Абрамешин Д. А., Пожидяев Е. Д., Саенко В. С., Тумковский С. Р.* Моделирование широкополосного усилителя на печатной плате с диэлектриком повышенной проводимости 635
- Синюкин А. С., Ковалев А. В.* Методика итерационного уточнения значений параметров в аналитических моделях микроэлектронных устройств 645

Микро- и наносистемная техника

- Архипов А. В., Тимошенко С. П.* Применение адаптивных регуляторов в системах управления беспилотными летательными аппаратами 652

Информационно-коммуникационные технологии

- Буренева О. И., Милакин А. Д., Миронов С. Э.* Аппаратная реализация бит-поточковых устройств 664
- Морозов С. А., Мунерман В. И., Симаков В. А.* Экспериментальный анализ многомерно-матричного подхода к построению маршрутов в графе 676
- К сведению авторов 687



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 27, No. 5, 2022
September – October

The scientific 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. Gavrilo – 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. Bessalov – 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., Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471

Sergey V. Gavrilo – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian), ORCID: 0000-0003-0566-4482

Aleksandr A. Gorbatshevich – 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)

Boris G. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia), ORCID: 0000-0003-3105-029X

Yury N. Korkishko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Optolink LLC (Moscow, Russia)

Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293

Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC “NIIME” (Moscow, Russia)

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

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. Petrosyantz – 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 Microe-
lectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Andrey Y. Sazonov – PhD, Prof., University of Waterloo (Canada),
ORCID: 0000-0003-0974-1262
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

http://ivuz-e.ru

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

Signed to print 11.10.2022. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed
sheets 14,415. Number of copies 130. Order no. 7. 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
groups of specialties:

05.11.00 Instrumentation, metrology and information-measuring devices and systems

05.13.00 Computer science, computer engineering and management

05.27.00 Electronics

The journal is included into the Russian Science Citation Index on the Web of Science basis.

The journal is included 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.

CONTENTS

Electronics materials

- Shomakhov Z. V., Nalimova S. S., Aubekero K., Guketlov A. M., Moshnikov V. A.* Effect of surface structure defects of zinc oxide nanowires on their gas-sensitive properties 571
- Khamdokhov Z. M., Margushev Z. Ch., Kalazhokov Z. Kh., Kalazhokov Kh. Kh., Tlenkopacyev M. R., Levin D. D., Losanov Kh. Kh.* Structure and composition features of films obtained by aerosol spraying of colloidal graphite solutions 581

Technological processes and routes

- Terekhov D. Yu., Pepelyaev D. V., Yakubov A. O., Babich A. V., Sherchenkov A. A.* Development of the photolithography process for the fabrication of flexible thin film thermoelectric generator 591

Integrated electronics elements

- Polunin M. N., Losev V. V., Chaplygin Yu. A.* Research of analog-to-information converters SINAD testing techniques 603
- Popov A. V.* Calculation model of the optical system for a single-channel dual-spectrum receiver of the image intensifier tube architecture 613

Circuit engineering and design

- Stepchenkov Yu. A., Diachenko Yu. G., Rogdestvenski Yu. V., Morozov N. V., Rogdestvenskene A. V., Stepchenkov D. Yu.* Ternary self-timed adder with improved soft error tolerance 624
- Abrameshin D. A., Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Tumkovskiy S. R.* Modeling of a broadband amplifier made on a printed circuit board with an increased conductivity dielectric 635
- Sinyukin A. S., Kovalev A. V.* An approach of the parameter values iterative refinement for analytical models of microelectronic devices 645

Micro- and nanosystem technology

- Arhipov A. V., Timoshenkov S. P.* Application of adaptive controllers in control systems for unmanned aerial vehicles 652

Information-communication technologies

- Bureneva O. I., Milakin A. D., Mironov S. E.* Hardware implementation of bitstream devices 664
- Morozov S. A., Munerman V. I., Simakov V. A.* Experimental analysis of multidimensional matrix approach to constructing routings in a graph 676
- Instructions for authors 687

Научная статья

УДК 621.586'33:621.315.592.3

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-5-571-580

**Влияние дефектов структуры
поверхности наностержней оксида цинка
на их газочувствительные свойства**

**З. В. Шомахов¹, С. С. Налимова², К. Аубекеров²,
А. М. Гукетлов¹, В. А. Мошников²**

¹*Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, Россия*

shozamir@yandex.ru

Аннотация. Газовые сенсоры на основе наноструктурированных оксидов металлов характеризуются низкой стоимостью, экологической безопасностью, высокой чувствительностью, а также возможностью изготовления приборов индивидуального пользования. При создании высокоэффективных сенсоров для детектирования токсичных и взрывоопасных газов актуальной является разработка способов управления дефектной структурой поверхности. В работе сенсорные слои на основе оксида цинка получены гидротермальным методом. Для изменения дефектной структуры поверхности использованы дополнительные прекурсоры. Исследование сенсорных свойств проведено при воздействии паров изопропилового спирта. Показано, что введение дополнительных прекурсоров в ростовой раствор приводит к увеличению сенсорного отклика слоев на основе оксида цинка. Предложена модель, учитывающая роль кислородных вакансий в процессах взаимодействия сенсорного слоя с изопропиловым спиртом. Установлено, что выбор оптимальных условий жертвенного легирования способствует улучшению газочувствительных свойств слоев на основе оксида цинка.

Ключевые слова: оксид цинка, наностержни, легирование, газовый сенсор, изопропиловый спирт

Для цитирования: Влияние дефектов структуры поверхности наностержней оксида цинка на их газочувствительные свойства / З. В. Шомахов, С. С. Налимова, К. Аубекеров и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 571–580. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-571-580>

Effect of surface structure defects of zinc oxide nanowires on their gas-sensitive properties

Z. V. Shomakhov¹, S. S. Nalimova², K. Aubekero²,
A. M. Guketlov², V. A. Moshnikov²

¹Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov,
Nalchik, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg,
Russia

shozamir@yandex.ru

Abstract. Gas sensors based on nanostructured metal oxides are low-cost, ecologically safe, highly sensitive and allowing the individual equipment fabrication. The development of methods for controlling the defect structure of the surface is an urgent task for the fabrication of highly efficient sensors for the detection of toxic and explosive gases. In this work, sensor layers based on zinc oxide were synthesized by hydrothermal method. Additional precursors were used to change the defect structure of the surface. The study of sensor properties was carried out under the influence of isopropyl alcohol vapors. It was demonstrated that the adding of supplementary precursors into the growth solution leads to an increase in the sensor response of layers based on zinc oxide. A model is proposed that considers the role of oxygen vacancies in the processes of interaction of the sensor layer with isopropyl alcohol. It has been established that the choice of optimal conditions for sacrificial doping contributes to the improvement of the gas-sensitive properties of zinc oxide-based layers.

Keywords: zinc oxide, nanowires, doping, gas sensor, isopropyl alcohol

For citation: Shomakhov Z. V., Nalimova S. S., Aubekero K., Guketlov A. M., Moshnikov V. A. Effect of surface structure defects of zinc oxide nanowires on their gas-sensitive properties. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 571–580. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-571-580>

Введение. Газовые сенсоры широко применяются в различных областях мониторинга окружающей среды, биомедицинских устройствах, фармацевтической промышленности и т. д. В качестве газочувствительных материалов традиционно используются полимеры, полупроводниковые материалы на основе оксидов металлов, пористый кремний и др. Характеристики газовых сенсоров описываются с учетом различных параметров, таких как чувствительность, обнаружительная способность (или, напротив, способность работать при достаточно высоких концентрациях вблизи порога взрывоопасности), время отклика, время восстановления, селективность и рабочая температура [1–5].

Сенсоры на основе наноструктурированных оксидов металлов по сравнению с другими газовыми сенсорами имеют следующие преимущества: низкая стоимость, возможность изготовления приборов индивидуального пользования, экологически безопасный синтез и высокая чувствительность [6, 7]. Для улучшения чувствительности и

селективности используют разные методы. Наиболее эффективный – разработка новых наноматериалов и создание новых методологий для наноструктурирования активных слоев. Выделим два технологических приема: создание гетероструктур для улучшения каталитической активности и адсорбционной способности [8] с образованием дополнительного обедненного слоя и большей модуляции сопротивления в пористых материалах [9]; улучшение характеристик прибора с помощью атомно-молекулярного дизайна и создание дефектной поверхности [10].

Оксид цинка широко применяется в качестве газочувствительного материала для обнаружения токсичных и взрывоопасных газов. Этот материал является широкозонным полупроводником *n*-типа и имеет такие преимущества, как биосовместимость, химическая стабильность, экологичность, низкая стоимость. Оксид цинка может быть получен в виде наноструктур различного размера и формы, например наночастиц, одномерных (1D), двумерных (2D) и трехмерных (3D) структур [11]. В СПбГЭТУ «ЛЭТИ» разработаны различные способы управления размером и формой наноструктур оксида цинка, исследовано влияние условий синтеза и получены наноструктуры в виде ограниченных наностержней [12], в том числе растущие из единого центра, и иерархические наноструктуры [13].

Для достижения наилучших сенсорных свойств важный фактор – наличие на поверхности газочувствительного слоя кислородных вакансий, которые являются адсорбционными центрами для окисляющих газов, в частности кислорода. Отрицательно заряженные хемосорбированные ионы кислорода принимают участие в химических реакциях и формировании сенсорного сигнала. Увеличение содержания кислородных вакансий в оксиде цинка может быть достигнуто с помощью механического воздействия, а также при синтезе или постобработке в восстановительной или кислорододефицитной атмосфере в газовой и жидкой фазах при использовании специальных прекурсоров [14].

Для повышения чувствительности актуальна разработка сенсоров с перколяционной структурой [15]. В данных сенсорах ток протекает по локализованным с помощью приемов нанолитографии наностержням, а стержни, расположенные в других местах подложки, не имеют электрического контакта с проводящим каналом и могут выполнять другие функции, например адсорбировать находящиеся в воздухе водяные пары, ухудшающие сенсорные свойства.

В работе [16] с помощью метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии показано, что жертвенное легирование бромом и йодом приводит к изменению состава поверхности, а именно к образованию дополнительных кислородных вакансий на поверхности образцов. Данный факт установлен вследствие изменения спектров основных уровней кислорода и появления дополнительных пиков с соответствующей кислородным вакансиям в оксиде цинка энергией связи. Предложена модель образования дополнительных кислородных вакансий, согласно которой при отжиге происходит удаление ZnI_2 с поверхностных слоев с образованием локализованных отрицательных зарядов.

Цель настоящей работы – исследование влияния дефектов структуры поверхности на сенсорные свойства слоев на основе наностержней оксида цинка.

Эксперимент. Схема и внешний вид сенсорных чипов, используемых для синтеза газочувствительных слоев, приведены на рис. 1. Чипы представляют собой керамическую подложку с встречно-штыревыми контактами NiCr/Ni/Au (сенсорная платформа BI2, “Tesla Blatna” АО, Чехия). Толщина электродов и расстояние между ними составляют 25 мкм.

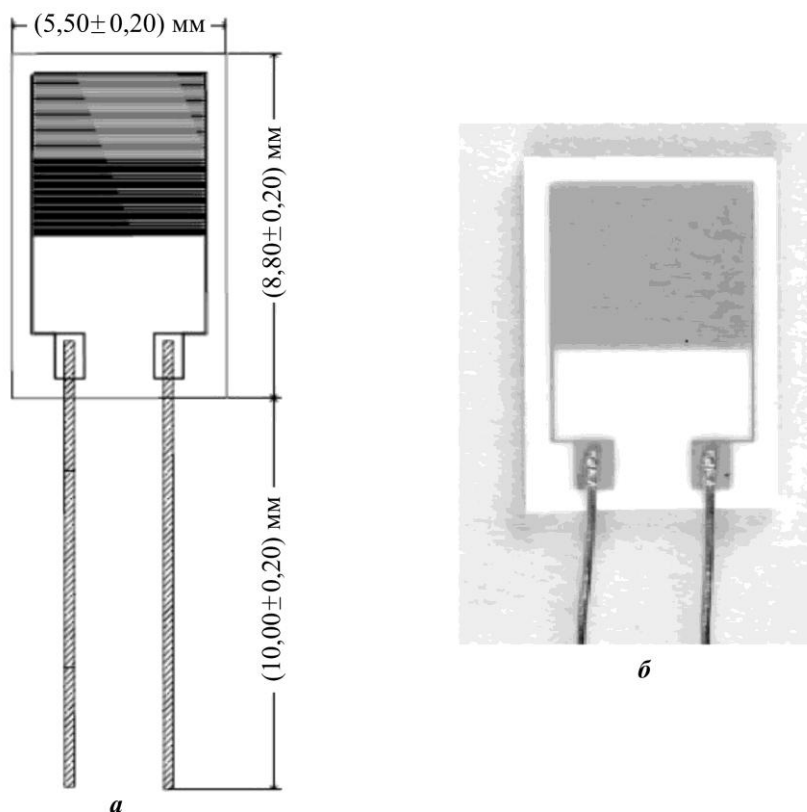


Рис. 1. Сенсорная платформа для получения образцов: а – схема; б – внешний вид
 Fig. 1. Sensor platform for sample deposition: a – scheme; b – image

Синтезированы образцы трех типов, для которых выбраны индивидуальные условия синтеза. Зародышевый слой получен методом spin-coating. В качестве раствора для синтеза применяли водный раствор ацетата цинка $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ с концентрацией 5 ммоль/л. Водный раствор ацетата цинка распределяли по поверхности подложки с помощью центрифуги в течение 30 мин со скоростью вращения 3000 об/мин. Для каждого образца проводили пять циклов spin-coating, после чего поверхность образца была полностью покрыта слоем раствора. Полученные образцы отжигали в муфельной печи при температуре 500 °С в течение 15 мин. Наностержни оксида цинка получены на поверхности зародышевого слоя наночастиц оксида цинка гидротермальным методом. В качестве раствора для синтеза использовали водный раствор нитрата цинка $ZnNO_3 \cdot 6H_2O$ и гексаметиленetetрамина (НМТА), который является слабым основанием, обеспечивающим щелочную среду в растворе. Концентрации раствора $ZnNO_3 \cdot 6H_2O$ + НМТА + [NaI или NaBr] следующие: 100 ммоль/л +100 ммоль/л (образец первого типа); 100 ммоль/л +100 ммоль/л + 20 ммоль/л [NaBr] (образец второго типа); 100 ммоль/л +100 ммоль/л + 20 ммоль/л [NaI] (образец третьего типа). Синтез проводили в течение 1 ч при температуре 85 °С. Затем подложки промывали в дистиллированной воде и сушили на воздухе при комнатной температуре. Далее проводили отжиг в течение 15 мин при температуре 500 °С.

Исследования морфологии поверхности полученных образцов проводили методом растровой электронной микроскопии (Zeiss Supra25, Carl Zeiss, Германия). Сенсорные свойства проанализированы при воздействии на образец паров изопропилового спирта при температуре 150 °С, выбор которой обусловлен особенностями хемосорбции кислорода на поверхности оксида цинка. Максимальный отклик наблюдается в темпера-

турном диапазоне 300–400 °С. Однако данные температуры ограничивают практическое применение разрабатываемых сенсоров, так как их невозможно интегрировать с современными устройствами. Поэтому целесообразно исследование сенсорных свойств при более низких температурах. Исследуемый образец помещали в ячейку, продуваемую попеременно потоком чистого осушенного воздуха и смеси воздуха с парами изопропилового спирта, концентрация которых составляла 1000 ppm. Ток, протекающий через образец, измеряли с помощью пикоамперметра Keithley 6485. Напряжение смещения, подаваемое с помощью источника питания, составляло 5 В. Чувствительность образцов S рассчитана как отношение сопротивления в атмосфере воздуха к сопротивлению при наличии детектируемого газа.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 показана типичная микроструктура образца, полученного при условиях синтеза, указанных в настоящей работе. Результаты анализа изображения показали, что диаметр наностержней варьируется от 20 до 120 нм при их средней длине порядка 200 нм.

Согласно проведенным исследованиям, чувствительность образца нелегированного оксида цинка к парам изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm составила 2,51; образца оксида цинка, легированного йодом, – 2,97; образца оксида цинка, легированного бромом, – 4,03. Определено время отклика и восстановления для каждого образца (таблица). Установлено, что время отклика легированных образцов уменьшается. По сравнению с нелегированным образцом время восстановления легированного йодом образца уменьшается почти в два раза, а легированного бромом образца увеличивается незначительно.

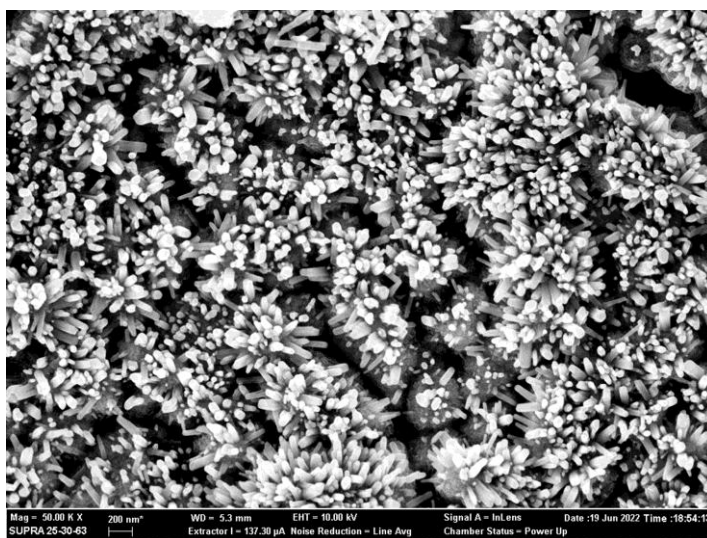


Рис. 2. РЭМ-изображение массива наностержней оксида цинка
Fig. 2. SEM image of zinc oxide nanowire array

Сенсорные свойства образцов при рабочей температуре 150 °С
Sensor properties of samples for temperature 150 °С

Образец	Чувствительность $S (R_a/R_g)$	Время, с	
		отклика	восстановления
ZnO	2,51±0,18	124±16	222±19
ZnO(I)	2,97±0,14	54±7	114±11
ZnO(Br)	4,03±0,22	76±9	272±19

На рис. 3 проиллюстрировано сравнение временных зависимостей отклика нелегированного и легированного бромом образцов. Воздействие изопропилового спирта приводит к обратимым изменениям сопротивления чувствительных слоев. Уменьшение сопротивления обусловлено адсорбцией паров изопропилового спирта на участках поверхности наностержней с последующими окислительно-восстановительными реакциями между органическими парами и кислородом на поверхности [17]. Возвращаясь в объем материала, электроны участвуют в электропроводности материала, и происходит снижение потенциальных барьеров между наностержнями оксида цинка.

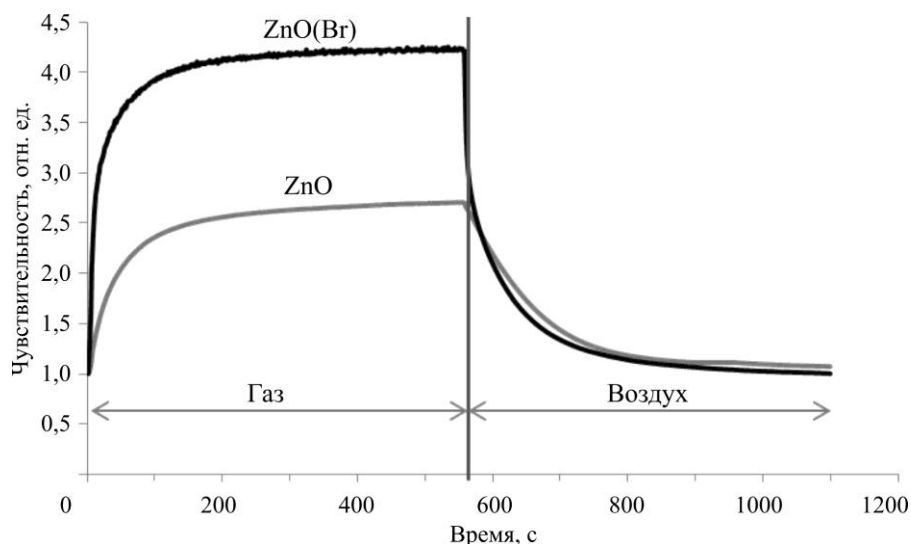


Рис. 3. Временная зависимость отклика нелегированного и легированного бромом оксида цинка к парам изопропилового спирта (1000 ppm)
 Fig. 3. Time dependence of the response of undoped and bromine-doped zinc oxide to isopropyl alcohol vapors (1000 ppm)

Важный параметр для газочувствительных датчиков – удельная поверхность, необходимая для адсорбции молекул. Из-за того что не вся поверхность материала используется для детектирования, основным критерием в работе является отношение поверхности к объему. Наноструктуры в качестве активных слоев позволяют значительно улучшить данный параметр. Поэтому наностержни, нановолокна и нанопроволоки [18] могут существенно увеличить активную площадь.

Наличие кислородных вакансий способствует уменьшению запрещенной зоны металлооксидных полупроводниковых материалов и увеличению количества доступных носителей заряда. После образования кислородных вакансий первоначально стабильная структура решетки переходит в метастабильное состояние, что приводит к повышению адсорбционной способности материала. Кислородные вакансии на поверхности действуют как центры адсорбции, поэтому их присутствие повышает реакционную способность поверхности.

Реакцию оксида цинка с изопропиловым спиртом (восстанавливающий газ) можно разделить на две стадии. На первой стадии молекулы кислорода адсорбируются на поверхности оксида цинка с последующим заполнением кислородных вакансий. При этом электроны переходят из зоны проводимости оксида цинка к адсорбированному кислороду, что приводит к увеличению сопротивления. Таким образом, кислородные вакансии играют ключевую роль в стимулировании процесса хемосорбции кислорода. Чем выше концентрация кислородных вакансий, тем больше молекул кислорода адсорбиру-

ется и больше электронов уходит из зоны проводимости оксида. Соответственно, для типичного полупроводника *n*-типа начальное сопротивление в атмосфере воздуха намного выше. На второй стадии при помещении сенсорного слоя в атмосферу паров изопропилового спирта происходит окислительно-восстановительная реакция. В результате электроны возвращаются в объем оксида цинка и сопротивление снижается. Адсорбированные молекулы кислорода принимают участие в окислении молекул изопропилового спирта, при этом в решетке оксида цинка вновь появляются кислородные вакансии.

Заключение. В ходе анализа влияния кислородных вакансий в оксиде цинка на процессы хемосорбции предложены технологические приемы повышения чувствительности. Экспериментально при исследовании отклика сенсоров к изопропиловому спирту установлено, что слои оксида цинка, модифицированные примесями йода и брома, имеют бóльшую газочувствительность. Полученные зависимости обусловлены появлением при добавлении в ростовой раствор прекурсоров, содержащих йод или бром, дополнительных кислородных вакансий, являющихся центрами адсорбции отрицательно заряженных ионов кислорода, принимающих участие в реакциях окисления восстанавливающих газов.

Материалы статьи доложены на 6-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника – 2022» (1–7 февраля 2022 г., Кабардино-Балкарская Республика, пос. Эльбрус).

Литература

1. *Saxena P., Shukla P.* A review on gas sensor technology and its applications // Computational and Experimental Methods in Mechanical Engineering / eds V. V. Rao et al. Singapore: Springer, 2022. P. 165–175. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2857-3_18
2. Resistive gas sensors based on metal-oxide nanowires / *A. Mirzaei, J.-H. Lee, S. M. Majhi et al.* // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126. Iss. 24. Art. No. 241102. <https://doi.org/10.1063/1.5118805>
3. *Chaulya S. K., Prasad G. M.* Gas sensors for underground mines and hazardous areas // Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas / S. K. Chaulya, G. M. Prasad. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 161–212.
4. Advances in designs and mechanisms of semiconducting metal oxide nanostructures for high-precision gas sensors operated at room temperature / *Z. Li, H. Li, Z. Wu et al.* // Mater. Horiz. 2019. Vol. 6. Iss. 3. P. 470–506. <https://doi.org/10.1039/C8MH01365A>
5. Nanomaterial-based gas sensors: A review / *K. Xu, C. Fu, Z. Gao et al.* // Instrumentation Science & Technology. 2018. Vol. 46. Iss. 2. P. 115–145. <https://doi.org/10.1080/10739149.2017.1340896>
6. Investigation of the electrical and ethanol-vapour sensing properties of the junctions based on ZnO nanostructured thin film doped with copper / *D. T. Dimitrov, N. K. Nikolaev, K. I. Papazova et al.* // Applied Surface Science. 2017. Vol. 392. P. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.049>
7. Investigation of the vapor-sensitive properties of zinc oxide layers by impedance spectroscopy / *S. S. Nalimova, I. E. Kononova, V. A. Moshnikov et al.* // Bulgarian Chemical Communications. 2017. Vol. 49 (1). P. 121–126.
8. *Walker J. M., Akbar S. A., Morris P. A.* Synergistic effects in gas sensing semiconducting oxide nano-heterostructures: A review // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 286. P. 624–640. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.049>
9. *Кононова И. Е., Кононов П. В., Мошников В. А.* Развитие модели образования материалов с иерархической структурой пор, созданных в условиях золь-гель-процессов // Неорганические материалы. 2018. Т. 54. № 5. С. 500–512. <https://doi.org/10.7868/S0002337X18050111>
10. Crystal-defect-dependent gas-sensing mechanism of the single ZnO nanowire sensors / *X. Zhou, A. Wang, Y. Wang et al.* // ACS Sens. 2018. Vol. 3. No. 11. P. 2385–2393. <https://doi.org/10.1021/acssens.8b00792>
11. Review of ZnO-based nanomaterials in gas sensors / *Y. Kang, F. Yu, L. Zhang et al.* // Solid State Ionics. 2021. Vol. 360. Art. No. 115544. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2020.115544>
12. Наноструктурированные материалы на основе оксида цинка для гетероструктурных солнечных элементов / *А. А. Бобков, А. И. Максимов, В. А. Мошников и др.* // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 10. С. 1402–1406.

13. Zinc oxide hierarchical nanostructures for photocatalysis / **O. Yukhnovets, A. A. Semenova, E. A. Levkevich et al.** // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. Vol. 993. Art. No. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/993/1/012009>

14. **Wang J., Chen R., Xiang L., Komarneni S.** Synthesis, properties and applications of ZnO nanomaterials with oxygen vacancies: A review // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. Iss. 7. P. 7357–7377. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.013>

15. Формирование литографических рисунков ограниченными микрочастицами оксида цинка на кремниевой подложке / **А. А. Бобков, И. А. Пронин, В. А. Мошников и др.** // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 15. С. 87–92. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2018.15.46445.17281>

16. **Шомахов З. В., Налимова С. С., Бобков А. А., Мошников В. А.** Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия поверхностных слоев ограниченных наностержней оксида цинка // *Изв. вузов. Электроника*. 2021. Т. 26. № 6. С. 481–490. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-481-490>

17. Исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности оксидов ZnO, Fe₂O₃ и ZnFe₂O₄ на их газочувствительность по отношению к парам этанола // **С. С. Налимова, В. А. Мошников, А. И. Максимов и др.** // *Физика и техника полупроводников*. 2013. Т. 47. № 8. С. 1022–1026.

18. The multisensor array based on grown-on-chip zinc oxide nanorod network for selective discrimination of alcohol vapors at sub-ppm range // **A. Bobkov, A. Varezhnikov, I. Plugin et al.** // *Sensors*. 2019. Vol. 19. Iss. 19. Art. No. 4265. <https://doi.org/10.3390/s19194265>

Статья поступила в редакцию 11.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 10.06.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Шомахов Замир Валериевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и цифровых информационных технологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), shozamir@yandex.ru

Налимова Светлана Сергеевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), sskarпова@list.ru

Аубекеров Кирилл – магистрант кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), kika.aubekеров@gmail.com.

Гукетлов Аслан Мухамедович – студент кафедры мехатроники и робототехники Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), guketlovaslan3@gmail.com

Мошников Вячеслав Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), vamoshnikov@mail.ru

References

1. Saxena P., Shukla P. A review on gas sensor technology and its applications. *Computational and Experimental Methods in Mechanical Engineering*, eds V. V. Rao et al. Singapore, Springer, 2022, pp. 165–175. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2857-3_18

2. Mirzaei A., Lee J.-H., Majhi S. M., Weber M., Bechelany M., Kim H. W., Kim S. S. Resistive gas sensors based on metal-oxide nanowires. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126, iss. 24, art. no. 241102. <https://doi.org/10.1063/1.5118805>

3. Chaulya S. K., Prasad G. M. Gas sensors for underground mines and hazardous areas. *Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas*, by S. K. Chaulya, G. M. Prasad. Amsterdam, Elsevier, 2016, pp. 161–212.
4. Li Z., Li H., Wu Z., Wang M., Luo J., Torun H. et al. Advances in designs and mechanisms of semiconducting metal oxide nanostructures for high-precision gas sensors operated at room temperature. *Mater. Horiz.*, 2019, vol. 6, iss. 3, pp. 470–506. <https://doi.org/10.1039/C8MH01365A>
5. Xu K., Fu C., Gao Z., Wei F., Ying Y., Xu C., Fu G. Nanomaterial-based gas sensors: A review. *Instrumentation Science & Technology*, 2018, vol. 46, iss. 2, pp. 115–145. <https://doi.org/10.1080/10739149.2017.1340896>
6. Dimitrov D. T., Nikolaev N. K., Papazova K. I., Krasteva L. K., Pronin I. A., Averin I. A., Bojinova A. S. et al. Investigation of the electrical and ethanol-vapour sensing properties of the junctions based on ZnO nanostructured thin film doped with copper. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 392, pp. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.049>
7. Nalimova S. S., Kononova I. E., Moshnikov V. A., Dimitrov D. T., Kaneva N. V., Krasteva L. K., Syuleyman S. A., Bojinova A. S., Papazova K. I., Georgieva A. Ts. Investigation of the vapor-sensitive properties of zinc oxide layers by impedance spectroscopy. *Bulgarian Chemical Communications*, 2017, vol. 49 (1), pp. 121–126.
8. Walker J. M., Akbar S. A., Morris P. A. Synergistic effects in gas sensing semiconducting oxide nano-heterostructures: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 286, pp. 624–640. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.049>
9. Kononova I. E., Kononov P. V., Moshnikov V. A. Development of a model for the formation of materials with a hierarchical pore structure produced under sol–gel processing conditions. *Inorg. Mater.*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 478–489. <https://doi.org/10.1134/S0020168518050060>
10. Zhou X., Wang A., Wang Y., Bian L., Yang Z., Bian Y., Gong Y., Wu X., Han N., Chen Y. Crystal-defect-dependent gas-sensing mechanism of the single ZnO nanowire sensors. *ACS Sens.*, 2018, vol. 3, no. 11, pp. 2385–2393. <https://doi.org/10.1021/acssensors.8b00792>
11. Kang Y., Yu F., Zhang L., Wang W., Chen L., Li Y. Review of ZnO-based nanomaterials in gas sensors. *Solid State Ionics*, 2021, vol. 360, art. no. 115544. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2020.115544>
12. Bobkov A. A., Maximov A. I., Moshnikov V. A., Somov P. A., Terukov E. I. Zinc-oxide-based nanostructured materials for heterostructure solar cells. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, iss. 10, pp. 1357–1360. <https://doi.org/10.1134/S1063782615100048>
13. Yukhnovets O., Semenova A. A., Levkevich E. A., Maximov A. I., Moshnikov V. A. Zinc oxide hierarchical nanostructures for photocatalysis. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 993, art. no. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/993/1/012009>
14. Wang J., Chen R., Xiang L., Komarneni S. Synthesis, properties and applications of ZnO nanomaterials with oxygen vacancies: A review. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, iss. 7, pp. 7357–7377. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.013>
15. Bobkov A. A., Pronin I. A., Moshnikov V. A., Yakushova N. D., Karmanov A. A., Averin I. A., Somov P. A., Terukov E. I. Creating lithographic pictures using faceted zinc oxide microparticles on a silicon substrate. *Tech. Phys. Lett.*, 2018, vol. 44, iss. 8, pp. 694–696. <https://doi.org/10.1134/S1063785018080047>
16. Shomakhov Z. V., Nalimova S. S., Bobkov A. A., Moshnikov V. A. X-ray photoelectron spectroscopy of surface layers of faceted zinc oxide nanorods. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 481–490. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-481-490>
17. Karpova S. S., Moshnikov V. A., Maksimov A. I., Mjakin S. V., Kazantseva N. E. Study of the effect of the acid-base surface properties of ZnO, Fe₂O₃ and ZnFe₂O₄ oxides on their gas sensitivity to ethanol vapor. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, iss. 8, pp. 1026–1030. <https://doi.org/10.1134/S1063782613080095>
18. Bobkov A., Varezchnikov A., Plugin I., Fedorov F. S., Trouillet V., Geckle U., Sommer M., Goffman V., Moshnikov V., Sysoev V. The multisensor array based on grown-on-chip zinc oxide nanorod network for selective discrimination of alcohol vapors at sub-ppm range. *Sensors*, 2019, vol. 19, iss. 19, art. no. 4265. <https://doi.org/10.3390/s19194265>

The article was submitted 11.04.2022; approved after reviewing 10.06.2022;
accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Zamir V. Shomakhov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), shozamir@yandex.ru

Svetlana S. Nalimova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), sskarpova@list.ru

Kirill Aubekerov – Master's degree student of the of Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), kika.aubekero@gmail.com.

Aslan M. Guketlov – Student of the Mechatronics and Robotics Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, Kabardino-Balkarian Republic, 360004, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), guketlovaslan3@gmail.com

Vyacheslav A. Moshnikov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Prof. of the of Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), vamousnikov@mail.ru

Информация для читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Полные тексты статей журнала с 2007 по 2021 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: <http://ivuz-e.ru>

Особенности структуры и состава пленок, полученных с помощью аэрозольного распыления растворов коллоидного графита

З. М. Хамдохов¹, З. Ч. Маргушев¹, З. Х. Калажоков^{1,2}, Х. Х. Калажоков²,
М. Р. Тленкопачев², Д. Д. Левин³, Х. Х. Лосанов²

¹Институт информатики и проблем регионального управления
Кабардино-Балкарского научного центра Российской
академии наук, г. Нальчик, Россия

²Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х. М. Бербекова, г. Нальчик, Россия

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

hamdohov@mail.ru

Аннотация. Широкое применение углеродных наноструктур, имеющих низкую работу выхода электрона, для изготовления автоэмиссионных катодов ограничивает использование дорогостоящих материалов и оборудования. Научный и практический интерес представляет исследование структуры и состава автоэмиссионных сред, полученных аэрозольным распылением растворов коллоидного графита. В работе методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и комбинационного рассеяния света изучен состав пленок, полученных с помощью аэрозольного распыления растворов коллоидного графита марок Graphite 33 и КГР-1700. Показано, что в исследуемых пленках образуются слабосвязанные чешуйки многослойного графена и функциональные группы C=O, C–H и C–OH. Установлено, что в пленках КГР-1700 образование этих групп проявляется в большей степени.

Ключевые слова: коллоидный графит, графен, катод, автоэлектронная эмиссия

Для цитирования: Особенности структуры и состава пленок, полученных с помощью аэрозольного распыления растворов коллоидного графита / З. М. Хамдохов, З. Ч. Маргушев, З. Х. Калажоков и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 581–590. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-581-590>

Original article

Structure and composition features of films obtained by aerosol spraying of colloidal graphite solutions

Z. M. Khamdokhov¹, Z. Ch. Margushev¹, Z. Kh. Kalazhokov^{1,2}, Kh. Kh. Kalazhokov²,
M. R. Tlenkopacyev², D. D. Levin³, Kh. Kh. Losanov²

¹*Institute for Informatics and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia*

²*Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russia*

³*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

hamdohov@mail.ru

Abstract. The extended application of carbon nanostructures with low electronic work function for field emission cathodes manufacturing reduces the use of expensive materials and equipment. The investigation of structure and composition of autoemission mediums obtained by aerosol spraying of solutions of colloidal graphite is of research and practical interest. In this work, the composition of films obtained by aerosol spraying of solutions of colloidal graphite of grades Graphite 33 and CGS-1700 was studied by XPS and Raman scattering methods. It was demonstrated that weakly bonded flakes of multilayer graphene and functional groups C=O, C–H and C–OH are formed in the films under study. It has been established that in the CGS-1700 films the formation of these groups is manifested to a greater extent.

Keywords: colloidal graphite, graphene, cathode, field emission

For citation: Khamdokhov Z. M., Margushev Z. Ch., Kalazhokov Z. Kh., Kalazhokov Kh. Kh., Tlenkopacyev M. R., Levin D. D., Losanov Kh. Kh. Structure and composition features of films obtained by aerosol spraying of colloidal graphite solutions. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 581–590. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-581-590>

Введение. Углеродные наноструктуры, такие как углеродные нанотрубки, графен, нанографиты, наноалмазы, имеют низкую работу выхода электрона (<1 эВ). Это свойство позволяет снизить напряжение питания автоэмиссионных (холодных) катодов на основе пленок из углеродных наноматериалов [1, 2]. Следует отметить, что в литературе нет достаточных данных о несложных и экономных методах изготовления таких катодов в условиях массового производства.

В работе [3] предлагается для изготовления холодных катодов использовать облегченный способ формирования автоэмиссионной пленки – аэрозольное распыление раствора деметилацетамида с одностенными углеродными нанотрубочками на кремниевую подложку. В [4] в качестве автоэмиссионной среды для холодных катодов применяются пленки из недорогого материала – коллоидного графита. В работе [5] описан способ получения автоэмиссионной среды холодного катода путем нанесения коллоидно-графитового раствора Graphite 33 на микроканальную пластину. Предполагается, что

коллоидно-графитовый раствор Graphite 33 содержит эмиссионные центры – углеродные наноструктуры. Таким образом, изучение пленок из коллоидного графита, пригодных для производства холодных катодов, является актуальной задачей.

Цель настоящей работы – исследование структуры и состава пленок, полученных с помощью аэрозольного распыления растворов коллоидного графита марок Graphite 33 и КГР-1700 [6], широко применяющихся в качестве проводящих клеев в разных областях техники.

Методика эксперимента. Углеродные пленки на стеклянных подложках, полученные с помощью аэрозольного распыления коллоидно-графитовых растворов марок Graphite 33 и КГР-1700, отжигали на воздухе при температуре 90 °С в течение 1 ч. Толщина пленок составляла примерно 5 мкм. Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) получены с использованием спектрометра Centaur U HR (ООО «Нано Скан Технология», г. Долгопрудный, Россия). Длина волны лазера 532,8 нм, мощность лазера 25 мВт.

Исследования методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) выполнены с применением спектрометра K-Alpha фирмы ThermoScientific с источником рентгеновского излучения Al-K α (1486,6 эВ), вакуум не хуже $4,5 \cdot 10^{-9}$ барр. Вычитание фона вторичных электронов проводили методом Ширли. Калибровку спектрометра осуществляли по пикам Au 4f $_{7/2}$, Cu 2p $_{3/2}$, Ag 3d $_{5/2}$ с энергиями связи 83,96; 932,62 и 368,21 эВ соответственно.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 приведены изображения углеродных пленок Graphite 33 и КГР-1700, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA 3LMN. Видно, что слои в пленке состоят из микроблоков и чешуек. На рис. 2 представлены КРС-спектры углеродных пленок Graphite 33 и КГР-1700.

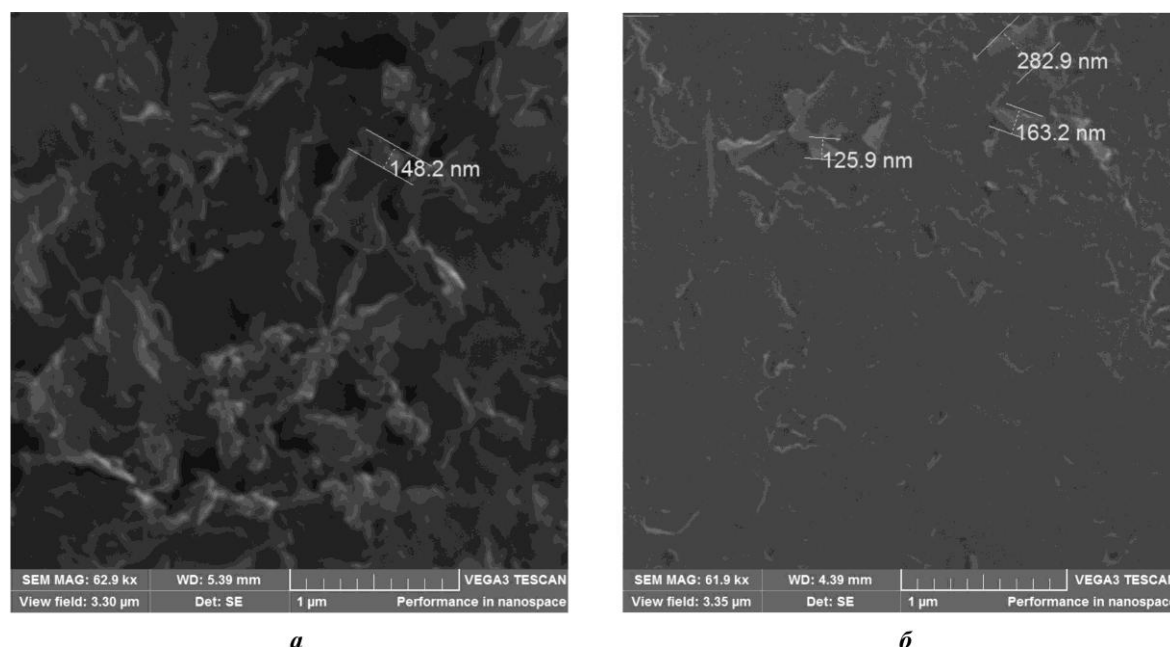


Рис. 1. СЭМ-изображения пленок Graphite 33 (а) и КГР-1700 (б)

Fig. 1. SEM image of Graphite 33 (a) and colloid-graphite solution (CGS-1700) (b) films

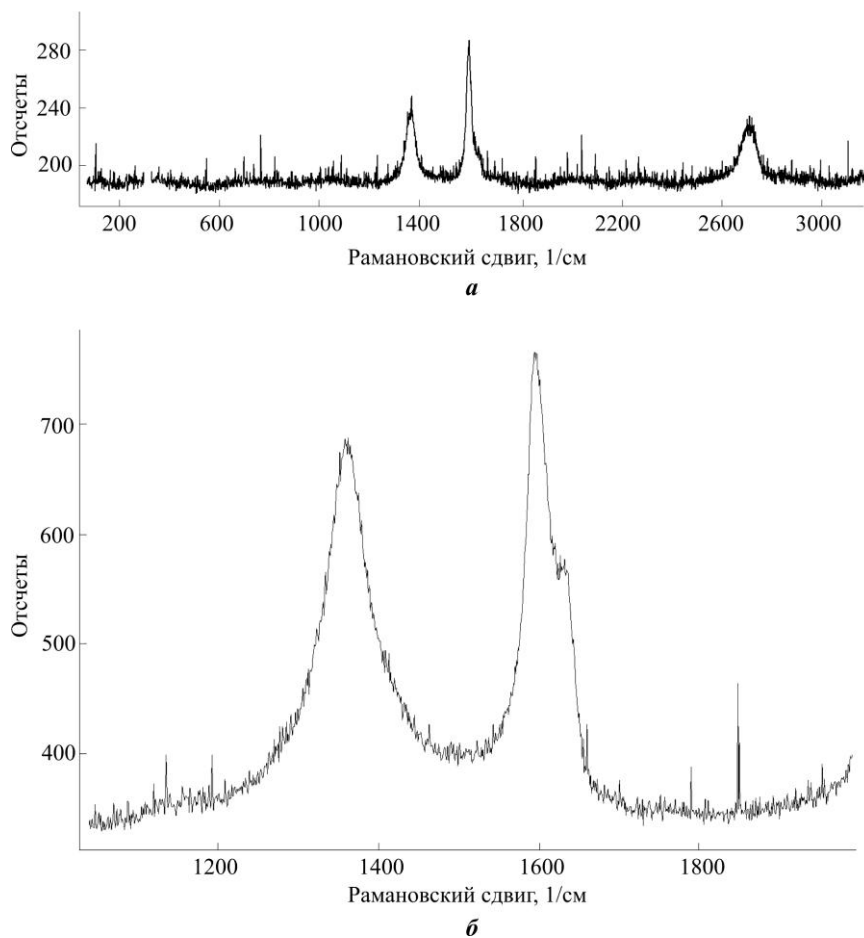


Рис. 2. КРС-спектры пленок Graphite 33 (а) и КГР-1700 (б)
 Fig. 2. Raman spectra of Graphite 33 (a) and CGS-1700 (b) films

Сравнение спектра пленки Graphite 33 с литературными данными [7–10] показало, что пленка состоит из слабо взаимодействующих друг с другом чешуек 2-3-слойного графена. Пленка КГР-1700 содержит многослойный (более 5 слоев) графен.

На рис. 3 показаны обзорные РФЭС-спектры поверхностей пленок Graphite 33 и КГР-1700. В результате анализа установлено что поверхность пленки Graphite 33 содержит три компонента: углерод (76,9 ат.%), кислород (21,65 ат.%) и азот (1,43 ат.%). Для образца КГР-1700 в состав входят те же компоненты в следующем соотношении: углерод (88,15 ат.%), кислород (10,38 ат.%) и азот (1,46 ат.%). На рис. 4 представлены результаты анализа РФЭС-спектров высокого разрешения линии углерода C 1s для углеродных пленок Graphite 33 и КГР-1700. Анализ проведен методом разложения на составляющие.

Из приведенных данных следует, что для образца Graphite 33 заметно преобладают химические соединения атомов углерода с кислородом. Подгонка пиков углерода C 1s для исследуемых образцов проведена с учетом того, что основная матрица углеродной пленки представляет собой кристаллическую структуру графеновых слоев, на что указывает энергия связи 284,4 эВ [11, 12]. Для описания кристаллической структуры углерода использовался асимметричный пик графита вместе с сателлитом плазмонных потерь при энергии ~ 291 эВ [12]. Кислород образует с атомами углерода следующие группы: C–OH (при энергии 285,7 эВ); C–O–C (286,7 эВ); C=O (287,8 эВ); O–C=O (288,4–288,7 эВ). Из разложений спектра C 1s образца Graphite 33 получено, что часть атомов углерода матрицы имеет sp^3 -гибридизацию, которому соответствует симметричный пик при энергии 285,0 эВ [13].

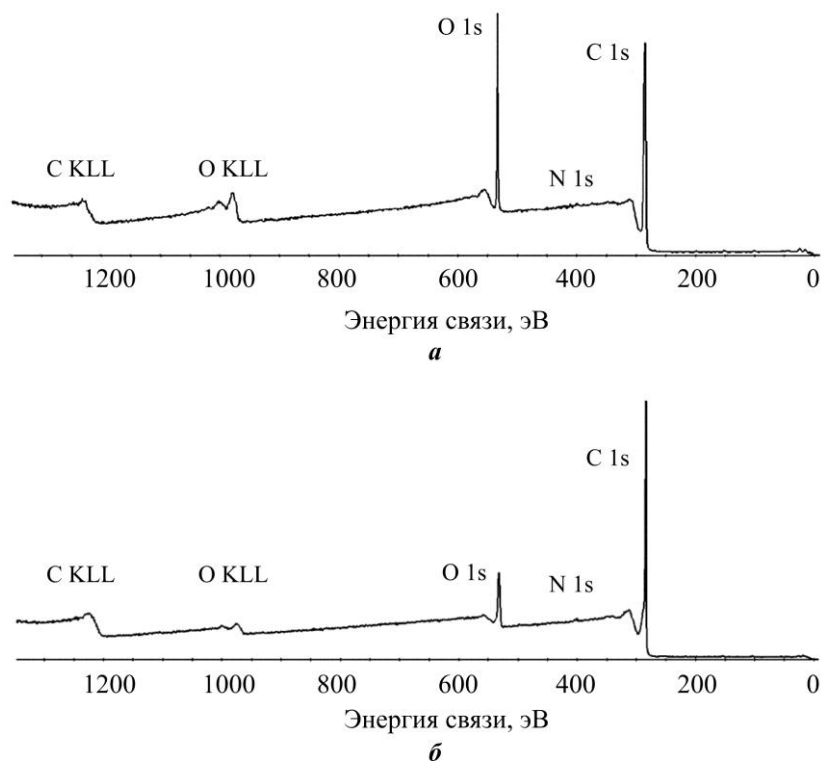


Рис. 3. Обзорные РФЭС-спектры пленок Graphite 33 (а) и КГР-1700 (б)
 Fig. 3. Overview XPS spectra of Graphite 33 (a) and CGS-1700 (b) films

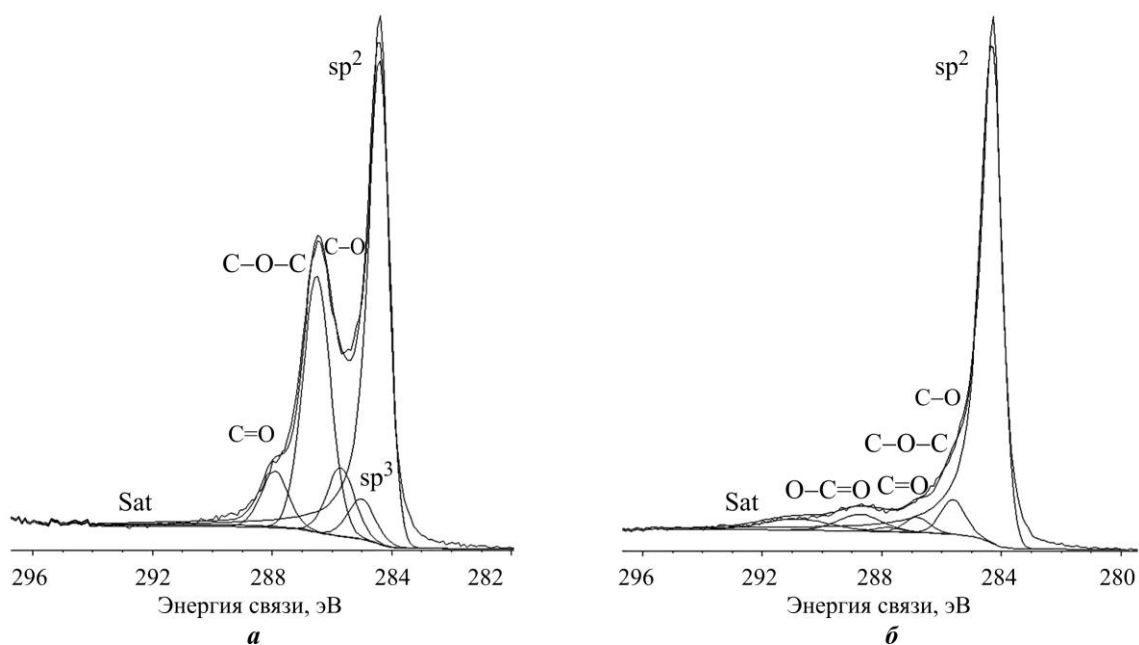


Рис. 4. Разложение пика C 1s для пленок Graphite 33 (а) и КГР-1700 (б)
 Fig. 4. Decomposition of the C 1s peak for Graphite 33 (a) and CGS-1700 (b) films

На рис. 5 показано разложение пика O 1s и результаты анализа химических состояний атомов кислорода на поверхностях пленок Graphite 33 и КГР-1700. При добавлении пиков C–OH и C=O учтено соотношение долей кислорода, участвующих в этих группах и полученных разложением спектра O 1s кислорода на составляющие. Кроме двух указанных групп, атомы кислорода на поверхности углеродного материала также образуют соединения в молекулах воды, о чем свидетельствует наличие плеча на спектре при более высоких энергиях связи (~535 эВ). Результаты анализа химического состояния углерода на поверхности пленок Graphite 33 и КГР-1700 представлены в таблице.

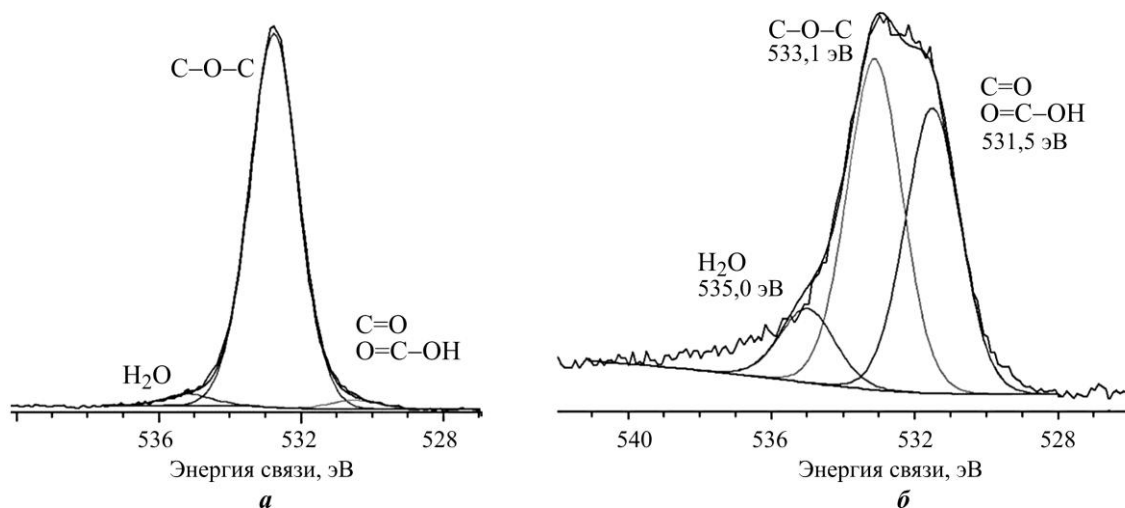


Рис. 5. Разложение пика O 1s для пленок Graphite 33 (а) и КГР-1700 (б)
 Fig. 5. Decomposition of the O 1s peak for Graphite 33 (a) and CGS-1700 (b) films

Химическое состояние углерода на поверхностях пленок Graphite 33 и КГР-1700
Chemical state of carbon on the surface of Graphite 33 and CGS-1700 films

Образец	C–C sp ²	C–C sp ³	C–OH	C–O–C	C=O	O–C=O
Graphite 33	45,64	5,2	8,86	33,03	7,27	–
КГР-1700	84,04	–	6,58	2,91	0,85	5,63

Анализ оже-спектров C KVV исследуемых углеродных покрытий показывает (рис. 6), что спектры смещены в область низких кинетических энергий относительно спектра высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ). Причем большее смещение наблюдается для образца Graphite 33. Также в полученных спектрах отсутствует пик на уровне энергии Ферми E_F , а интенсивность эмиссии в области низких кинетических энергий заметно меньше, чем у спектра ВОПГ. Согласно результатам работы [14] это может быть объяснено уменьшением взаимодействия между слоями графита, причиной которого может быть наличие дефектов, кислородсодержащих групп и молекул воды. Этот эффект больше проявляется для Graphite 33, чем для КГР-1700. Это хорошо согласуется с результатами разложения, представленными на рис. 4, а для Graphite 33, которые показали наличие в большей степени C–O–C групп.

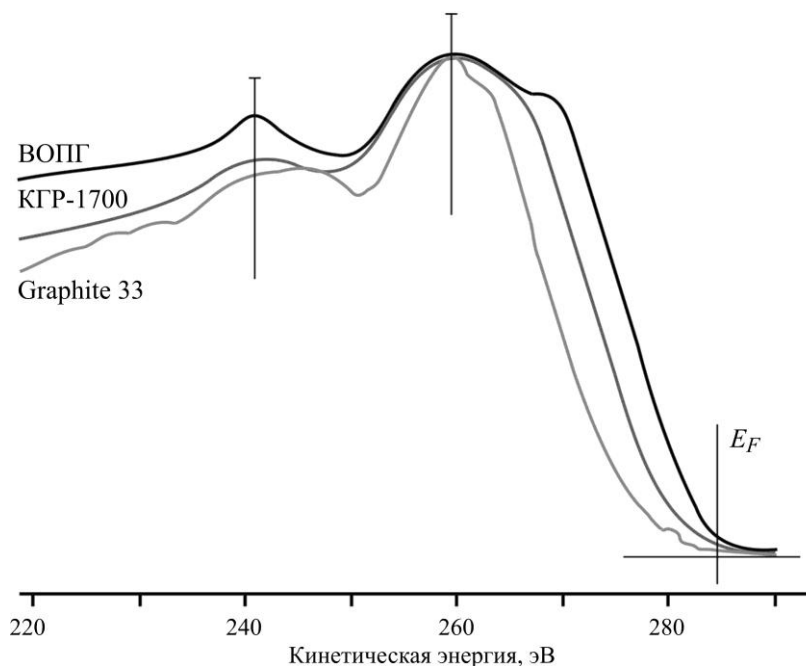


Рис. 6. Оже-пики С KVV углерода на поверхностях пленок Graphite 33 и КГР-1700 по отношению к линии С KVV ВОПГ

Fig. 6. C KVV Auger peaks of carbon on the surfaces of Graphite 33 and CGS-1700 films with respect to the C KVV line of highly oriented pyrolytic graphite

Заключение. В результате анализа измерения эмиссионных токов исследуемых пленок установлено, что пленки Graphite 33 имеют лучшие эмиссионные характеристики по сравнению с пленками КГР-1700. Это можно объяснить тем, что линейные размеры графеновых наночастиц в Graphite 33 меньше, чем в КГР-1700. Естественно предположить, что применение критерия минимального размера наночастиц позволит выбрать наиболее эффективные коллоидно-графитовые растворы для изготовления холодных катодов.

Изучение состава пленок Graphite 33 и КГР-1700 показало, что в них образуются слабосвязанные чешуйки многослойного графена и функциональные группы С=О, С–Н и С–О–С. В пленках Graphite 33 образование этих групп проявляется в большей степени.

Литература

1. *Khamdokhov Z. M., Fedotova G. V., Samodurov P. S., Shermetova M. A.* Cold cathodes based on an assembly of microchannel plates for low-power X-ray tubes // *Instrum. Exp. Tech.* 2021. Vol. 64. Iss. 1. P. 117–120. <https://doi.org/10.1134/S0020441220060172>
2. Характеризация автоэмиссионных катодов на основе пленок графена на SiC / *Р. В. Конакова, О. Б. Охрименко, А. М. Светличный и др.* // *ФТП.* 2015. Т. 49. № 9. С. 1278–1281.
3. Токопроводящее покрытие Kontakt Chemie 76009-010 (33-200) // *Supply24.online* [Электронный ресурс]. URL: https://supply24.online/oborudovanie_masterskih_himicheskie_preparaty_zaschitnye_i_ekraniruyushchie_obolochki_tokoprovodyashee_pokrytie_kontakt_chemie_33-200 (дата обращения: 15.07.2022).
4. *Ferrari A. C.* Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects // *Solid State Communications.* 2007. Vol. 143. Iss. 1-2. P. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>
5. Графен, полученный восстановлением оксида графена / *С. В. Ткачев, Е. Ю. Буслаева, А. В. Намкин и др.* // *Неорганические материалы.* 2012. Т. 48. № 8. С. 909–915.

6. Особенности фазового состава пленок, полученных методом одновременного электродугового распыления графита и хрома из двух испарителей / **З. М. Хамдохов, З. Х. Калажоков, А. В. Наумкин и др.** // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 2. С. 67–72. <https://doi.org/10.31857/S1028096021020060>

7. Ion irradiation-induced, localized sp^2 to sp^3 hybridized carbon transformation in walls of multiwalled carbon nanotubes / **R. Kumari, F. Singh, S. Y. Brajesh et al.** // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B. 2017. Vol. 412. P. 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.09.019>

8. Особенности структуры и трения нанокристаллических частиц терморасширенного графита, обработанных ультразвуком в воде и глицерине / **А. П. Краснов, А. В. Наумкин, В. Н. Адерица и др.** // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 3. С. 217–224.

Статья поступила в редакцию 25.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 11.07.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Хамдохов Залим Мухамедович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360000, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37а), hamdohov@mail.ru

Маргушев Заур Чамилович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360000, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37а), zmargush@yandex.ru

Калажоков Замир Хамидбиевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики наносистем Института физики и математики Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360000, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), старший научный сотрудник отдела компьютерных рентгенооптических систем Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360000, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37а), z-kalazh@yandex.ru

Калажоков Хамидби Хажисмелович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики Института физики и математики Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), khh49@mail.ru

Тленкопачев Мурат Рамазанович – кандидат химических наук, доцент кафедры неорганической и физической химии Института физики и математики Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), tlenkopachev83@mail.ru

Левин Денис Дмитриевич – кандидат технических наук, научный сотрудник Научно-образовательного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), skaldd@yandex.ru

Лосанов Хамидби Хабасович – старший преподаватель кафедры электроники и цифровых информационных технологий Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х. М. Бербекова (Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173), losanovh@mail.ru

References

1. Khamdokhov Z. M., Fedotova G. V., Samodurov P. S., Shermetova M. A. Cold cathodes based on an assembly of microchannel plates for low-power X-ray tubes. *Instrum. Exp. Tech.*, 2021, vol. 64, iss. 1, pp. 117–120. <https://doi.org/10.1134/S0020441220060172>
2. Konakova R. V., Okhrimenko O. B., Svetlichnyi A. M., Ageev O. A., Volkov E. Yu., Kolomiytsev A. S., Jityaev I. L., Spiridonov O. B. Characterization of field-emission cathodes based on graphene films on SiC. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, iss. 9, pp. 1242–1245. <https://doi.org/10.1134/S1063782615090146>
3. Current conducting coating 76009-010 (33-200). *Supply24.online*. (In Russian). Available at: https://supply24.online/oborudovanie_masterskih/himicheskie-preparaty/zaschitnye-i-ekraniruyuschie-obolochki/tokoprovodyashee-pokrytie-kontakt-chemie-33-200 (accessed: 15.07.2022).
4. Ferrari A. C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Communications*, 2007, vol. 143, iss. 1-2, pp. 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2007.03.052>
5. Tkachev S. V., Buslaeva E. Yu., Naumkin A. V., Kotova S. L., Laure I. V., Gubin S. P. Reduced graphene oxide. *Inorg. Mater.*, 2012, vol. 48, iss. 8, pp. 796–802. <https://doi.org/10.1134/S0020168512080158>
6. Khamdokhov Z. M., Kalazhokov Z. Kh., Naumkin A. V., Karamurzov B. S., Kalazhokov Kh. Kh., Tarala V. A., Krandievsky S. O. Features of the phase composition of films prepared by simultaneous electric arc sputtering of graphite and chromium from two evaporators. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neutronnye issledovaniya*, 2021, no. 2, pp. 67–72. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S1028096021020060>
7. Kumari R., Singh F., Yadav B. S., Kotnala R. K., Peta K. R., Tyagi P. K., Kumar S., Puri N. K. Ion irradiation-induced, localized sp² to sp³ hybridized carbon transformation in walls of multiwalled carbon nanotubes. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B*, 2017, vol. 412, pp. 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.09.019>
8. Krasnov A. P., Naumkin A. V., Aderikha V. N., Buyaev D. I., Volkov I. O., Yudin A. S., Goroshkov M. V. Structural and frictional peculiarities of nanocrystalline thermally expanded graphite particles sonicated in water and glycerol. *J. Frict. Wear*, 2017, vol. 38, iss. 3, pp. 202–207. <https://doi.org/10.3103/S1068366617030084>

The article was submitted 25.05.2022; approved after reviewing 11.07.2022;
accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Zalim M. Khamdokhov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Russia, Kabardino-Balkarian Republic, 360000, Nalchik, I. Armand st., 37a), hamdohov@mail.ru

Zaur Ch. Margushev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the Institute of Computer Science and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Russia, Kabardino-Balkarian Republic, 360000, Nalchik, I. Armand st., 37a), zmargush@yandex.ru

Zamir Kh. Kalazhokov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Physics of Nanosystems Department, Institute of Physics and Mathematics, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, Kabardino-Balkarian Republic, 360000, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), Senior Scientific Researcher of the Computer X-ray Optical Systems Department, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Russia, Kabardino-Balkarian Republic, 360000, Nalchik, I. Armand st., 37a), z-kalazh@yandex.ru

Khamidbi Kh. Kalazhokov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Theoretical and Experimental Physics Department, Institute of Physics and Mathematics, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, Kabardino-Balkarian Republic, 360000, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), khh49@mail.ru

Murat R. Tlenkopasyev – Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof. of the Inorganic and Physical Chemistry Department, Institute of Chemistry and Biology, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, Kabardino-Balkarian Republic, 360000, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), tlenkopachev83@mail.ru

Denis D. Levin – Cand. Sci. (Eng.), Researcher of the Center for “Probe Microscopy and Nanotechnology”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), skaldd@yandex.ru

Khamidbi Kh. Losanov – Senior Lecturer of the Electronics and Digital Information Technologies Department, Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov (Russia, Kabardino-Balkarian Republic, 360000, Nalchik, Chernyshevsky st., 173), losanovh@mail.ru

Вниманию читателей журнала

«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- по каталогу «Периодические издания. Газеты и журналы»
ООО «Урал-Пресс Округ». Подписной индекс 47570
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис». Подписной индекс 38934
- через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»: <http://presskiosk.ru/categories>
- через редакцию – с любого номера и до конца года

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

Научная статья

УДК 546.2:537.322

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-5-591-602

Разработка процесса фотолитографии для изготовления гибкого тонкопленочного термоэлектрического генератора

*Д. Ю. Терехов, Д. В. Пепеляев, А. О. Якубов,
А. В. Бабич, А. А. Шерченков*

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

gsm.ads@yandex.ru

Аннотация. Термоэлектрические генераторы (ТЭГ) характеризуются высокой надежностью, длительным сроком эксплуатации и не требуют обслуживания. Гибкие ТЭГ могут стать альтернативой химическим источникам тока. Разработка технологии фотолитографии с использованием компьютерно-перестраиваемого фотошаблона (электронного фотошаблона) для изготовления гибких тонкопленочных ТЭГ – актуальная задача. В работе представлен стенд для проведения экспонирования рисунка на фоторезист без изготовления фотошаблона. Показано, что стенд позволяет формировать элементы с минимальным размером 50×50 мкм. Для формирования ветвей термоэлементов *p*- и *n*-типа гибкого тонкопленочного ТЭГ использованы материалы $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и Bi_2Te_3 соответственно. По результатам исследования температурных зависимостей электропроводности и коэффициента термоЭДС установлено, что фактор мощности тонких пленок Bi_2Te_3 и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ слабо зависит от температуры в исследованных диапазонах и составляет при комнатной температуре 2,9 и 3,0 мВт/м \cdot К⁻² для Bi_2Te_3 и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ соответственно. По результатам исследования адгезии для формирования гибкого тонкопленочного ТЭГ выбрана полиимидная подложка и контактная система на основе токопроводящего слоя Cu и барьерного подслоя Ni. Разработан технологический процесс и изготовлен гибкий тонкопленочный ТЭГ с вертикальным расположением ветвей термоэлементов. Для формирования топологических рисунков всех слоев проведена взрывная фотолитография с использованием разработанного стенда для экспонирования рисунка на фоторезист.

Ключевые слова: технология тонкопленочных термоэлементов, стенд для экспонирования рисунка, процесс фотолитографии, гибкий тонкопленочный термоэлектрический генератор

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-79-10231).

Для цитирования: Разработка процесса фотолитографии для изготовления гибкого тонкопленочного термоэлектрического генератора / Д. Ю. Терехов, Д. В. Пепеляев, А. О. Якубов и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 591–602. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-591-602>

Original article

Development of the photolithography process for the fabrication of flexible thin film thermoelectric generator

D. Yu. Terekhov, D. V. Pepelyaev, A. O. Yakubov,
A. V. Babich, A. A. Sherchenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

gsm.ads@yandex.ru

Abstract. The thermoelectric generators (TEG) are characteristic of high reliability, long term operation and require no maintenance. Flexible TEG can be the alternative to chemical current sources. The development of the technology of computer-tunable photomask for the fabrication of flexible thin film TEG is the relevant objective. In this work, a setup for pattern exposure on a photoresist without preparing a photomask is presented. It was demonstrated that the developed setup allows forming elements with a minimum size of $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ and Bi_2Te_3 thermoelectric materials were used for the formation of the *p*- and *n*-type legs, respectively, in the flexible thin film TEG. Results of the investigations of the temperature dependences of electrical conductivity and Seebeck coefficient for the Bi_2Te_3 and $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films were used to calculate the power factor. It was found that power factors for these films are weakly dependent on temperature in the studied temperature ranges and at room temperature are equal to 2.9 and 3.0 $\text{mW/m} \cdot \text{K}^{-2}$ for Bi_2Te_3 and $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, respectively. Based on the results of the adhesion study, a polyimide substrate and a contact system based on a conducting Cu layer and a Ni barrier sublayer were chosen for the fabrication of the flexible thin film TEG. A technological process has been developed and a flexible thin film TEG with a vertical arrangement of thermoelement legs has been fabricated. For the formation of the topological patterns for all layers, explosive photolithography (5 photolithography processes) was carried out using the developed setup for pattern exposure on the photoresist.

Keywords: thin film thermoelements technology, setup for pattern exposure, photolithography process, flexible thin film thermoelectric generator

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project No. 18-79-10231).

For citation: Terekhov D. Yu., Pepelyaev D. V., Yakubov A. O., Babich A. V., Sherchenkov A. A. Development of the photolithography process for the fabrication of flexible thin film thermoelectric generator. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 591–602. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-591-602>

Введение. Термоэлектрические генераторы (ТЭГ), работающие на эффекте Зеебека, имеют высокую надежность, длительный срок эксплуатации, не требуют обслуживания и применяются для электроснабжения отдельных удаленных потребителей, сигнальных устройств, бортового электроснабжения межпланетных космических аппаратов [1, 2]. На основе ТЭГ реализуется один из самых экологически чистых методов преобразования энергии, что вызывает повышенный интерес к ним как к альтернативным источникам энергии в связи с влиянием ископаемого топлива на окружающую среду [3].

Развитие беспроводных технологий, портативной и носимой электроники привело к росту потребностей в использовании миниатюрных источников энергии, способных длительное время обеспечивать электроэнергией электронные устройства. Для питания подобных устройств в настоящее время применяются химические источники тока, являющиеся самыми габаритными элементами устройств и при этом требующие периодической замены ввиду ограниченного срока эксплуатации. Кроме того, существует экологическая проблема утилизации химических источников тока. Альтернативой используемым химическим источникам тока могут стать разрабатываемые в настоящее время гибкие ТЭГ. Они в определенных пределах принимают неплоскую форму, что позволяет применять их для утилизации тепла живого организма, в том числе человеческого тела [4], а также в различных устройствах со сложной поверхностью [5]. В таких ТЭГ для преобразования в электричество могут использоваться тепловые потоки низкой интенсивности. Гибкие носимые ТЭГ могут применяться в качестве источников питания для высокотехнологичных интеллектуальных систем, приборов бытового и медицинского назначения, например телефонов, смарт-часов, радио-, видео-, аудио- и фотоустройств, фитнес-браслетов, медицинских датчиков и т. д.

При использовании тонких пленок для изготовления гибких носимых ТЭГ возможно создание миниатюрных термоэлектрических генераторов и применение дешевой рулонной технологии [6, 7]. Технология изготовления таких ТЭГ совместима с технологией микроэлектроники, однако на сегодняшний день она не отработана. Кроме того, широкое распространение тонкопленочных ТЭГ сдерживается ввиду низкой эффективности применяемых термоэлектрических материалов (ТЭМ), требуется поиск специфических низкотемпературных ТЭМ высокой эффективности. Следует отметить, что до настоящего времени, несмотря на многочисленные исследования, твердые растворы на основе Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 остаются наилучшими низкотемпературными ТЭМ и имеют самые высокие значения безразмерной термоэлектрической добротности $ZT = 1$ в области температур 200–600 К [8]. В то же время для изготовления гибких и пленочных ТЭГ применяются халькогенидные полупроводники системы Ge–Sb–Te. В работах [9, 10] отмечается высокий потенциал использования $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ в качестве низкотемпературного ТЭМ p -типа.

Существует также проблема, связанная с тем, что тепловой поток в обычных тонкопленочных ТЭГ направлен перпендикулярно плоскости пленки. Это существенно ограничивает возможность увеличения градиента температур, определяющего величину вырабатываемой электрической мощности [11]. Важная задача в данном случае – повышение плотности упаковки элементов для увеличения вырабатываемой мощности гибкого ТЭГ. В связи с этим изготовление гибких носимых ТЭГ с вертикальным расположением ветвей термоэлементов обусловлено необходимостью поиска оптимальной конструкции термоэлектрического устройства и отработки технологии их изготовления. Отсюда возникает проблема разработки технологии формирования элементов ТЭГ с использованием фотолитографии. На этапе отработки технологии и изготовления ма-

кетов гибких ТЭГ процессы фотолитографии являются дорогостоящими, для них характерны и длительные технологические этапы, требующие нескольких итераций при изготовлении фотошаблонов. Применение методов проекционной фотолитографии позволяет оперативно, без фотошаблонов, формировать необходимый топологический рисунок.

Цель настоящей работы – разработка технологии фотолитографии с использованием компьютерно-перестраиваемого фотошаблона для изготовления гибкого тонкопленочного термоэлектрического генератора с вертикальным расположением ветвей термоэлементов на основе слоев $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и Bi_2Te_3 *p*- и *n*-типа соответственно.

Методика эксперимента. Формирование пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ *p*-типа осуществляли методом магнетронного распыления мишени из поликристаллического $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Процесс проводили в атмосфере аргона при давлении $5,8 \cdot 10^{-1}$ Па, расходе Ar $\sim 0,6$ л/ч. Толщина пленки составляла 1 мкм. Слой Bi_2Te_3 также осаждали методом магнетронного распыления; толщина пленки 1 мкм. Исследование температурных зависимостей электропроводности и коэффициента термоЭДС проводили на разработанном стенде в диапазоне температур от комнатной до 300 °С для тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и от комнатной до 100 °С для тонких пленок Bi_2Te_3 .

При формировании гибкого тонкопленочного ТЭГ необходимо обеспечить высокую адгезию коммутационной матрицы. Адгезия коммутационных слоев является лимитирующим фактором, определяющим механическую прочность термоэлемента в целом. Особенно важно обеспечение высокой адгезии в гибких тонкопленочных ТЭГ, которые могут подвергаться многократным нагрузкам на изгиб. Для изготовления токопроводящих слоев выбрана медь (Cu), имеющая высокую проводимость. Для повышения адгезии тонких пленок Cu к прилегающим слоям использовали буферный подслои никеля (Ni). Кроме того, у Ni высокие барьерные свойства, препятствующие диффузии Cu в термоэлектрический материал. С использованием динамометра PCE-FM50 проведено исследование адгезии тонких пленок Cu и Ni к следующим подложкам: окисленная кремниевая подложка (Si/SiO₂), ситалл (СТ50-1-1-0,6), полиимид. Для увеличения рабочего диапазона прикладываемых усилий до 12,5 кгс на динамометре PCE-FM50 использован блок, позволяющий увеличивать прикладываемое усилие в два раза. Все указанные подложки с нанесенным слоем металла методом магнетронного распыления через маску приклеивали к алюминиевому основанию цианоакрилатным клеем. К слою металла в виде круга диаметром 1,8 мм приклеивали металлический штамп, подсоединенный к динамометру с помощью медной проволоки.

Для формирования элементов ТЭГ с помощью фотолитографии разработан рабочий настольный макет установки контактной фотолитографии с использованием компьютерно-перестраиваемого фотошаблона – стенд, обеспечивающий рабочее проекционное поле размером 120 960 × 68 049 мкм с предельным разрешением 50 × 50 мкм. Схема стенда для экспонирования рисунка на фоторезист представлена на рис. 1, общий вид стенда показан на рис. 2.

Блок засветки содержит матрицу светодиодов с длиной волны излучения 395–400 нм и пиковой мощностью 100 Вт, установленную на обдуваемом алюминиевом радиаторе. Концентрация светового потока обеспечивается короткофокусной конденсорной линзой, размещенной над светодиодной матрицей на расстоянии ~ 1 мм. Линза выполнена из полиметилметакрилата (ПММА) и обеспечивает пропускание более 70 % излучаемого светового потока. Блок формирования и проецирования рисунка включает в себя линзу Френеля из ПММА, обеспечивающую коллимацию светового потока и равномерное освещение всего поля изображения. Полупрозрачный жидкокристаллический

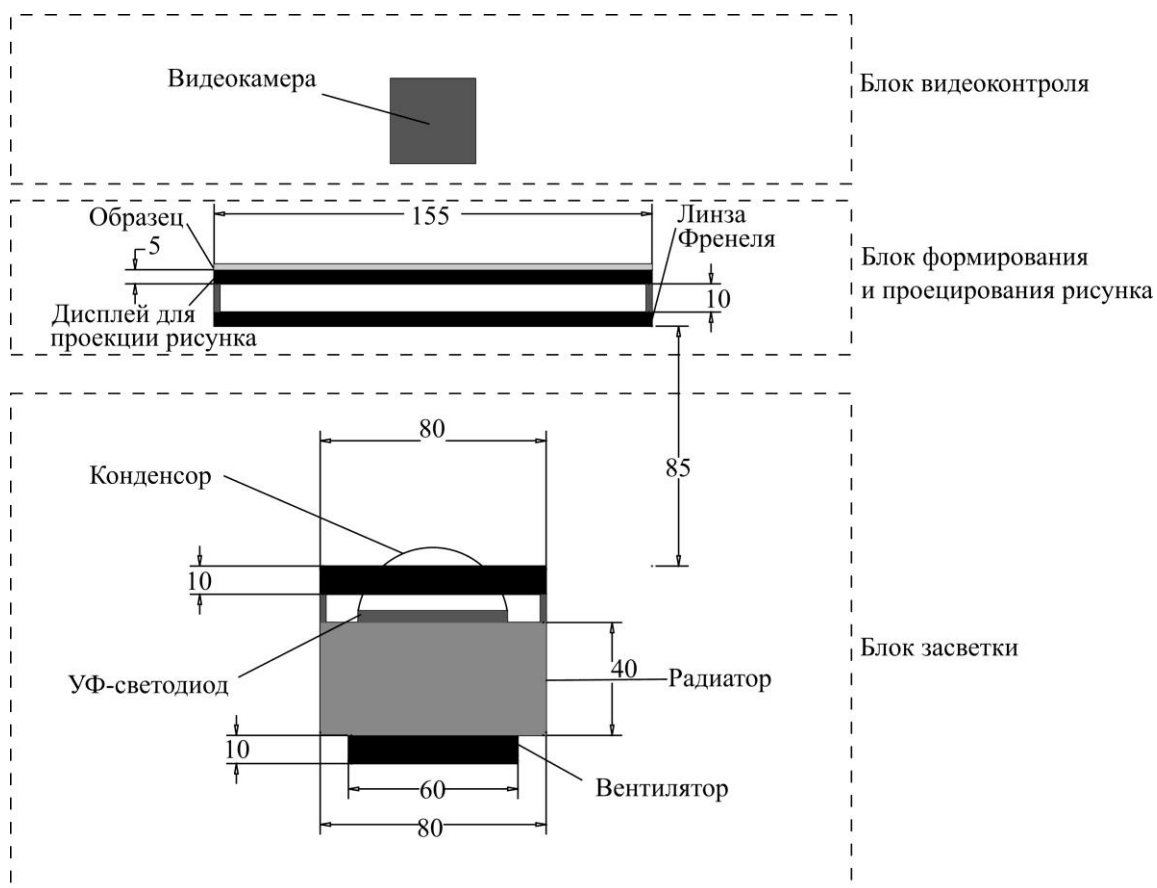


Рис. 1. Схема станда для экспонирования рисунка на фоторезист (размеры даны в миллиметрах)
 Fig. 1. Scheme of the stand for exposing the pattern to the photoresist (the dimensions are given in millimeters)



Рис. 2. Общий вид станда для экспонирования рисунка
 Fig. 2. General view of the stand for exposing the picture

дисплей установлен над линзой Френеля. Дисплей выполняет роль компьютерно-перестраиваемого фотошаблона. Блок управления дисплеем подключается к персональному компьютеру посредством HDMI (High Definition Multimedia Interface). Зонды на магнитных держателях обеспечивают фиксацию экспонируемых образцов. Блок видеоконтроля включает в себя видеокамеру USB CMOS с разрешением 2 Мп и объектив, обеспечивающий фокусирование на пластинах с различными геометрическими размерами.

Подложки с нанесенным фоторезистом установлены на поверхность дисплея и зафиксированы с помощью прижимных зондов. Образцы установлены тыльной стороной наружу, а совмещение рисунка проведено с помощью видеокамеры по внешним меткам на дисплее и краю подложки. При этом точность совмещения рисунка снижается незначительно.

Результаты и их обсуждение. По результатам исследования температурных зависимостей электропроводности и коэффициента термоЭДС рассчитаны температурные зависимости фактора мощности ($PF = S^2\sigma$, где S – коэффициент термоЭДС; σ – электропроводность) для тонких пленок Bi_2Te_3 и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Установлено, что фактор мощности для тонкопленочных образцов Bi_2Te_3 и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ слабо зависит от температуры в исследованных диапазонах температур и составляет 2,9 и 3,0 мВт/м·К⁻² для Bi_2Te_3 и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ соответственно при комнатной температуре. В таблице представлены результаты измерения электропроводности, коэффициента термоЭДС и фактора мощности для тонких пленок Bi_2Te_3 и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при комнатной температуре.

Значения параметров тонких пленок Bi_2Te_3 и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при комнатной температуре
Electrical conductivity σ , thermopower factor S and power factor PF for Bi_2Te_3 and $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films at room temperature

Состав	σ , Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	S , мкВ/К	PF , мкВт/м·К ²
Bi_2Te_3	1180	-152,2	27
$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$	2670	227,6	140

Исследование адгезии тонких пленок металлов показало, что слои Cu толщиной 1 мкм имеют высокую адгезионную прочность к полиимидной подложке (170 кгс/см²). Для слоев Ni получены следующие значения адгезионной прочности: к полиимидной подложке 200 кгс/см², к подложке Si/SiO₂ 140 кгс/см², к ситалловой подложке 100 кгс/см². Проведен отжиг образцов при температуре 150 °С в течение 5 ч в атмосфере Ar, который не привел к изменению адгезионных свойств и проводимости пленок. С учетом полученных результатов для формирования гибкого тонкопленочного ТЭГ выбраны полиимидная подложка и контактная система на основе токопроводящего слоя Cu и барьерного подслоя Ni.

Согласно температурным зависимостям электропроводности и коэффициента термоЭДС для тонких пленок Bi_2Te_3 и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ сначала была отработана более простая технология формирования и изготовлен макет гибкого тонкопленочного ТЭГ с горизонтальным расположением ветвей p - и n -типа на основе тонких пленок Bi_2Te_3 и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. По результатам моделирования ТЭГ разработаны и выполнены три варианта макетов ТЭГ с горизонтальным расположением ветвей термоэлементов, отличающиеся различной длиной их рабочей зоны – 1,2; 5; 10 мм. На рис. 3 схематически представлена структура трех ТЭГ, формируемых одновременно на полиимидной подложке.

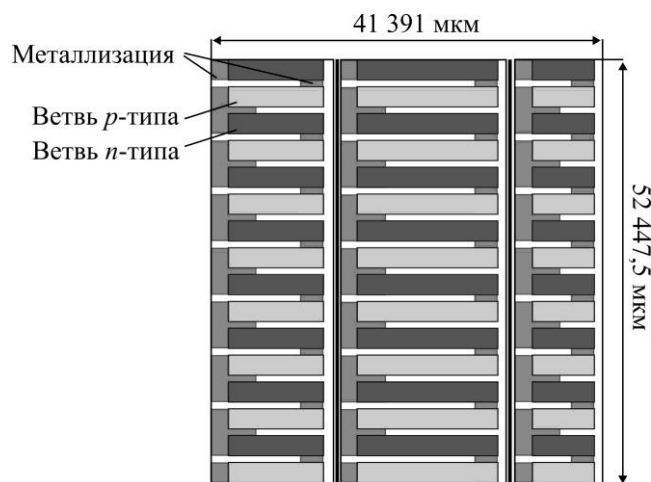


Рис. 3. Структура гибкого пленочного ТЭГ с горизонтальным расположением термоэлектрических ветвей
 Fig. 3. The structure of a flexible film thermoelectric generator with a horizontal arrangement of thermoelectric legs

Для изготовления ТЭГ использовали полиимидную подложку толщиной 200 мкм и размером $45 \times 55 \text{ мм}^2$, на которую наносили три структуры тонкопленочных ТЭГ. Гибкий пленочный ТЭГ содержит восемь термоэлементов, соединение которых обеспечивается расположенной ниже на подложке коммутационной матрицей. Изготовление ТЭГ осуществляли следующим образом. Проводили отмывку полиимидной подложки в растворе Каро, для приготовления которого использовали перекись водорода H_2O_2 и серную кислоту H_2SO_4 в пропорции 1:1. В приготовленный раствор при температуре кипения помещали полиимидные подложки. Время отмывки составляло 40 мин. По истечении времени подложки промывали в деионизованной воде и сушили в парах изопропилового спирта.

Далее проводили ламинирование подложки – накатку пленочного фоторезиста на отмытую подложку. Ламинирование подложки осуществляли пленочным фоторезистом Ordyl Alpha 340 (Италия) толщиной 40 мкм, обеспечивающим минимальное разрешение дорожки 40 мкм и зазора 60 мкм. Для достижения лучшей адгезии при ламинировании температуру подложки поддерживали в диапазоне температур 105–125 °С. Для формирования топологического рисунка коммутационной матрицы методом взрывной фотолитографии проводили засветку фоторезиста на разработанном стенде. При этом мощность, подаваемая на светодиодную матрицу, составляла 65 Вт, время экспонирования рисунка 2 мин. Затем осуществляли задубливание фоторезиста при температуре 95 °С в течение 40–60 мин и его проявление (удаление незасвеченных участков) в водном растворе Na_2CO_3 (0,8–1,2 %) при температуре 50–60 °С, время проявления 50–60 с. Для удаления остатков Na_2CO_3 использовали раствор анионоактивного и неионогенного ПАВ с последующей отмывкой в деионизованной воде при температуре 100 °С в течение 60 мин и сушкой.

Слой металлизации для формирования коммутационной матрицы осаждали в следующем порядке: основной токопроводящий слой Cu толщиной 1 мкм; барьерный подслой Ni толщиной 200 нм. Последующее удаление фоторезиста в водном растворе NaOH (2,5 %) или водном растворе Na_2CO_3 (5 %) позволило сформировать методом взрывной фотолитографии рисунок коммутационной матрицы. Для отмывки подложки со сформированным рисунком коммутационной матрицы использовали раствор ПАВ с

последующей промывкой в деионизованной воде и сушкой. С помощью взрывной фотолитографии последовательно формировали рисунки ветвей p - и n -типа. Следует отметить, что после формирования коммутационной матрицы удаление засвеченных участков всех последующих фоторезистов при взрывной фотолитографии проводили с учетом результатов исследования химической стойкости тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [12] с использованием этилового спирта. Это необходимо для предотвращения разрушения слоя $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Гибкий тонкопленочный ТЭГ с горизонтальным расположением ветвей p - и n -типа имеет существенный недостаток, связанный с высоким внутренним сопротивлением (более 40 кОм), которое определяется в основном большой длиной ветвей p - и n -типа и их малой толщиной. Кроме того, результаты проведенного компьютерного моделирования теплообмена в таком пленочном ТЭГ показали, что основной вклад в тепловой поток через термоэлемент вносит подложка [13]. Более перспективным для минимизации сопротивления ветвей термоэлемента и снижения паразитных тепловых потоков через подложку являются пленочные ТЭГ с вертикальным расположением ветвей.

С учетом отработанной технологии изготовления гибкого тонкопленочного ТЭГ с горизонтальным расположением ветвей и результатов его моделирования разработан и изготовлен макет гибкого тонкопленочного ТЭГ с вертикальным расположением ветвей p - и n -типа. ТЭГ содержит 112 термоэлементов, соединение которых обеспечивается нижней и верхней коммутационными матрицами. Структура тонкопленочного термоэлемента с вертикальным расположением ветвей термоэлементов представлена на рис. 4.

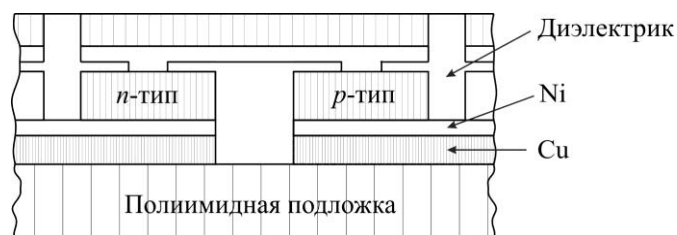


Рис. 4. Структура двух ветвей термоэлементов p - и n -типа гибкого тонкопленочного ТЭГ с вертикальным расположением ветвей термоэлемента

Fig. 4. The structure of two branches of p - and n -type thermoelements of a flexible thin-film TEG with a vertical arrangement of thermoelement branches

Разработанный технологический процесс, с использованием которого изготовлен гибкий тонкопленочный ТЭГ с вертикальным расположением ветвей термоэлементов, включает в себя следующие этапы: подготовка (отмывка) полиимидной подложки; формирование нижней коммутационной матрицы, ветвей термоэлементов p - и n -типа, межэлементной изоляции и верхнего слоя металлизации (верхняя коммутационная матрица). Для формирования топологических рисунков указанных слоев проводили взрывную фотолитографию (пять процессов) с использованием разработанного стенда для экспонирования рисунка на фоторезист. Для изготовления гибкого тонкопленочного ТЭГ использовали полиимидную подложку размером $60 \times 48 \text{ мм}^2$, на которую нанесли вертикальную структуру гибкого тонкопленочного ТЭГ. Для формирования нижней коммутационной матрицы, термоэлектрических ветвей p - и n -типа и верхней коммутационной матрицы использовали описанные технологические процессы и отра-

ботанные при изготовлении ТЭГ с горизонтальным расположением ветвей. Диэлектрический изолирующий слой толщиной 700 нм осаждали методом реактивного магнетронного распыления Si мишени в атмосфере Ar–O₂ (давление $4,0 \cdot 10^{-1}$ Па, содержание O₂ 10–15 %). Для формирования рисунка изолирующего слоя применяли отработанную технологию взрывной фотолитографии. На рис. 5 представлен сформированный гибкий тонкопленочный ТЭГ с вертикальным расположением ветвей термоэлементов *p*- и *n*-типа.

Разработанный и изготовленный гибкий ТЭГ способен генерировать порядка 1 мВ выходного напряжения в режиме холостого хода при касании пальцем. Для дальнейшего увеличения генерируемого напряжения необходимо совершенствование геометрии ТЭГ, в частности значительное увеличение количества термоэлементов и уменьшение расстояния между соседними ветвями термоэлементов, это позволит снизить паразитные тепловые потоки.

Заключение. Разработанная технология фотолитографии с использованием компьютерно-перестраиваемого фотошаблона позволяет изготавливать гибкие тонкопленочные ТЭГ с вертикальным расположением ветвей термоэлементов на основе слоев Bi₂Te₃ и Ge₂Sb₂Te₅. Разработанный и изготовленный стенд для проведения экспонирования рисунка на фоторезист без фотошаблона дает возможность формировать элементы с минимальным размером 50 × 50 мкм.

Литература

1. Thermoelectric generator (TEG) market by material (bismuth telluride, lead telluride, and others), application (waste heat recovery, consumer harvesting, direct power generation, and co-generation), and end-use industry (automotive, aerospace, industrial, consumer, and healthcare): global opportunity analysis and industry forecast, 2021–2030 // Allied Market Research [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/thermoelectric-generator-market> (дата обращения: 01.04.2022).
2. He R., Schierning G., Nielsch K. Thermoelectric devices: a review of devices, architectures, and contact optimization // Adv. Mater. Technol. 2018. Vol. 3. Iss. 4. Art. No. 1700256. <https://doi.org/10.1002/admt.201700256>
3. Review of experimental approaches for improving zT of thermoelectric materials / Z. Ma, J. Wei, P. Song et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. 2021. Vol. 121. Art. No. 105303. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105303>
4. Flexible thermoelectric generators with inkjet-printed bismuth telluride nanowires and liquid metal contacts / B. Chen, M. Kruse, B. Xu et al. // Nanoscale. 2019. Vol. 11. Iss. 12. P. 5222–5230. <https://doi.org/10.1039/C8NR09101C>
5. Trung N. H., Toan N. V., Ono T. Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process // Applied Energy. 2018. Vol. 210. P. 467–476. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.005>
6. Tappura K. A numerical study on the design trade-offs of a thin-film thermoelectric generator for large-area applications // Renewable Energy. 2018. Vol. 120. P. 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.063>

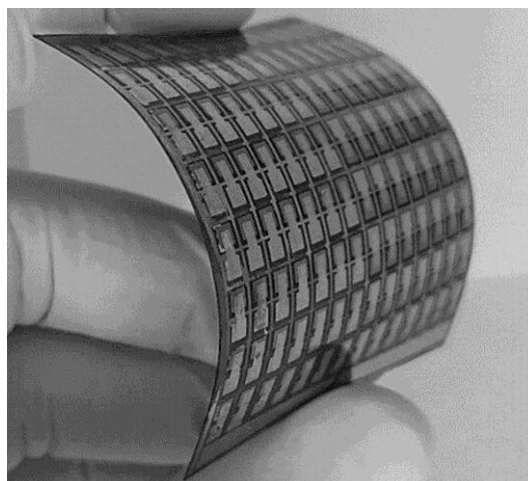


Рис. 5. Гибкий тонкопленочный ТЭГ с вертикальным расположением ветвей *p*- и *n*-типа

Fig. 5. Flexible thin-film thermoelectric generator with vertical arrangement of *p*- and *n*-type branches

7. Thermoelectric thin films: materials and devices / eds P. Mele, D. Narducci, M. Ohta et al. Cham: Springer, 2019. XV, 211 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20043-5>

8. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements / *M. Shtern, M. Rogachev, Y. Shtern et al.* // Journal of Alloys and Compounds. 2021. Vol. 877. Art. No. 160328. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160328>

9. Исследование температурных зависимостей коэффициента термоЭДС и электропроводности тонких пленок материала фазовой памяти GeSbTe / *Д. Ю. Терехов, П. И. Лазаренко, А. А. Шерченков и др.* // Изв. вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 6. С. 518–527. На англ. яз. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-6-518-527>

10. Effect of Ag mixing in thermoelectric Ge₂Sb₂Te₅ thin films / *A. Vora-ud, M. Horprathum, M. Kumar et al.* // Materials Letters. 2019. Vol. 234. P. 229–232. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.105>

11. High-performance flexible thermoelectric power generator using laser multiscanning lift-off process / *S. J. Kim, H. E. Lee, H. Choi et al.* // ACS Nano. 2016. Vol. 10. Iss. 12. P. 10851–10857. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05004>

12. *Voloshchuk I. A., Terekhov D. Y.* Investigation of the electrical contact to the thermoelectric legs fabricated by screen-printing method // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2021. P. 2501–2505. <https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396295>

13. Перспективное развитие тонкопленочных и гибких термоэлектрических устройств / *Д. Ю. Терехов, А. А. Шерченков, И. А. Волощук и др.* // Российские нанотехнологии. 2021. Т. 16. № 3. С. 429–438. <https://doi.org/10.1134/S1992722321030183>

Статья поступила в редакцию 18.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 03.05.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Терехов Дмитрий Юрьевич – младший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gsm.ads@yandex.ru

Пепеляев Дмитрий Валерьевич – аспирант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), perelyaev-dima@mail.ru

Якубов Алексей Олегович – младший научный сотрудник Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), alexsey007@mail.ru

Бабич Алексей Вальтерович – кандидат технических наук, доцент Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), drent@yandex.ru

Шерченков Алексей Анатольевич – доктор технических наук, профессор Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), aa_sherchenkov@rambler.ru

References

1. Thermoelectric generator (TEG) market by material (bismuth telluride, lead telluride, and others), application (waste heat recovery, consumer harvesting, direct power generation, and co-generation), and end-use industry (automotive, aerospace, industrial, consumer, and healthcare): global opportunity analysis and industry forecast, 2021–2030. *Allied Market Research*. 2021. Available at: <https://www.alliedmarketresearch.com/thermoelectric-generator-market> (accessed: 01.04.2022).

2. He R., Schierning G., Nielsch K. Thermoelectric devices: a review of devices, architectures, and contact optimization. *Adv. Mater. Technol.*, 2018, vol. 3, iss. 4, art. no. 1700256. <https://doi.org/10.1002/admt.201700256>
3. Ma Z., Wei J., Song P., Zhang M., Yang L., Ma J., Liu W., Yang F., Wang X. Review of experimental approaches for improving zT of thermoelectric materials. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, vol. 121, art. no. 105303. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105303>
4. Chen B., Kruse M., Xu B., Tutika R., Zheng W., Bartlett M. D., Wu Y., Claussen J. C. Flexible thermoelectric generators with inkjet-printed bismuth telluride nanowires and liquid metal contacts. *Nanoscale*, 2019, vol. 11, iss. 12, pp. 5222–5230. <https://doi.org/10.1039/C8NR09101C>
5. Trung N. H., Toan N. V., Ono T. Flexible thermoelectric power generator with Y-type structure using electrochemical deposition process. *Applied Energy*, 2018, vol. 210, pp. 467–476. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.005>
6. Tappura K. A numerical study on the design trade-offs of a thin-film thermoelectric generator for large-area applications. *Renewable Energy*, 2018, vol. 120, pp. 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.063>
7. Mele P., Narducci D., Ohta M., Biswas K., Morante J., Saini S., Endo T. (eds.). *Thermoelectric thin films: materials and devices*. Cham, Springer, 2019, xv, 211 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20043-5>
8. Shtern M., Rogachev M., Shtern Y., Sherchenkov A., Babich A., Korchagin E., Nikulin D. Thermoelectric properties of efficient thermoelectric materials on the basis of bismuth and antimony chalcogenides for multisection thermoelements. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 877, art. no. 160328. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160328>
9. Terekhov D. Yu., Lazarenko P. I., Sherchenkov A. A., Shtern Yu. I., Kozyukhin S. A., Filatov S. A., Babich A. V., Pepelyaev D. V., Presnukhina A. A. Investigation of temperature dependencies of Seebeck coefficient and electrical conductivity of Ge₂Sb₂Te₅ thin films. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 6, pp. 518–527. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2017-22-6-518-527>
10. Vora-ud A., Horprathum M., Kumar M., Muthitamongkol P., Chananonawathorn C., Saekow B., Nualkham I., Thaowonkaew S., Thanachayanont C., Seetawan T. Effect of Ag mixing in thermoelectric Ge₂Sb₂Te₅ thin films. *Materials Letters*, 2019, vol. 234, pp. 229–232. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.105>
11. Kim S. J., Lee H. E., Choi H., Kim Y., We J. H., Shin J. S., Lee K. J., Cho B. J. High-performance flexible thermoelectric power generator using laser multiscanning lift-off process. *ACS Nano*, 2016, vol. 10, iss. 12, pp. 10851–10857. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.6b05004>
12. Voloshchuk I. A., Terekhov D. Y. Investigation of the electrical contact to the thermoelectric legs fabricated by screen-printing method. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2021, pp. 2501–2505. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396295>
13. Terekhov D. Yu., Sherchenkov A. A., Voloshchuk I. A., Pepelyaev D. V., Stern M. Yu., Lazarenko P. I., Yakubov A. O., Babich A. V. Perspective development of thin-film and flexible thermoelectric devices. *Rossiyskiye nanotekhnologii = Russian Nanotechnologies*, 2021, vol. 16, no. 3, pp. 429–438. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S1992722321030183>

The article was submitted 18.04.2022; approved after reviewing 03.05.2022;
accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Dmitry Yu. Terekhov – Junior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gsm.ads@yandex.ru

Dmitry V. Pepelyaev – PhD student of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pepelyaev-dima@mail.ru

Aleksey O. Yakubov – Junior Scientific Researcher of the Institute of Advanced Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alexsey007@mail.ru

Aleksey V. Babich – 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), drent@yandex.ru

Aleksey A. Sherchenkov – 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), aa_sherchenkov@rambler.ru

**Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- по каталогу «Периодические издания. Газеты и журналы»
ООО «Урал-Пресс Округ». Подписной индекс 47570
- по объединенному каталогу «Пресса России» ООО «Агентство
«Книга-Сервис». Подписной индекс 38934
- через Агентство «ПРЕССИНФОРМ»: <http://presskiosk.ru/categories>
- через редакцию – с любого номера и до конца года

**Подписку на электронную версию журнала
можно оформить на сайтах:**

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

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья
УДК 621.3.087.92
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-5-603-612

Исследование методов тестирования SINAD аналого-информационных преобразователей

М. Н. Полунин, В. В. Лосев, Ю. А. Чаплыгин

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

mpolunin@elvees.com

Аннотация. В основе работы аналого-информационного преобразователя (АИП) лежит теория сжатой дискретизации, которая позволяет обрабатывать сигнал малым количеством отчетов при условии сжимаемости входного сигнала. В связи с этим собранные данные не могут обладать всей информацией о спектре входного сигнала и стандартный метод оценки отношения сигнал / шум и коэффициент искажения (Signal-to-Noise and Distortion Ratio, SINAD), используемый для аналого-цифрового преобразователя (АЦП), не применим. В работе представлен новый метод нахождения SINAD АИП. Суть метода заключается в подборе параметров белого шума, мощность которого равна мощности искажений и шума АИП. Для исследования предлагаемого метода выполнено математическое моделирование АИП и эталонного АЦП с одинаковыми характеристиками. Проведена оценка SINAD АИП с помощью описанных в литературе методов и предлагаемого метода. Рассчитаны значения SINAD АИП и АЦП. Представленный метод показал стабильный результат: значение SINAD АИП совпадает со значением SINAD АЦП.

Ключевые слова: аналого-информационный преобразователь, аналого-цифровой преобразователь, сжатая дискретизация, неравномерная дискретизация, случайный демодулятор, отношение сигнал / шум и коэффициент искажения, SINAD

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20 37 90095).

Для цитирования: Полунин М. Н., Лосев В. В., Чаплыгин Ю. А. Исследование методов тестирования SINAD аналого-информационных преобразователей // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 603–612. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-603-612>

Original article

Research of analog-to-information converters SINAD testing techniques

M. N. Polunin, V. V. Losev, Yu. A. Chaplygin

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

mpolunin@elvees.com

Abstract. The operation of the analog-to-information converter (AIC) is based on the theory of compressed sensing that allows processing a signal with a small number of samples, provided the input signal is compressible. In this regard, the collected data may not have all the information about the spectrum of the input signal and the standard methodology for estimating the signal-to-noise and distortion ratio (SINAD) used for analog-to-digital converter (ADC) is not applicable. In this work, a new technique of calculating SINAD of the AIC is presented. The idea of this technique is to select the parameters of flat noise, the power of which is equal to the power of distortion and AIC noise. To study the results of the new technique, mathematical modeling of the AIC and the reference ADC with the same characteristics has been carried out. The SINAD of the AIC was evaluated using the techniques presented in the literature and a new technique. The SINAD of the ADC was calculated for comparison. The new technique showed a stable result, SINAD of the AIC coincides with SINAD of the ADC.

Keywords: analog-to-information converter, analog-to-digital converter (ADC), compressed sampling, nonuniform sampling, random demodulator, signal-to-noise and distortion ratio, SINAD

Finding: the work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-37-90095).

For citation: Polunin M. N., Losev V. V., Chaplygin Yu. A. Research of analog-to-information converters SINAD testing techniques. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 603–612. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-603-612>

Введение. Использование теории сжатой дискретизации позволяет уменьшить затрачиваемую энергию на обработку данных в случае разреженности входного сигнала за счет уменьшения частоты дискретизации [1–4]. Сигнал называется разреженным, если существует такое Ψ^{-1} -преобразование сигнала x , имеющего в дискретном представлении длину N , что представление сигнала в преобразованной области α такой же длины имеет S больших элементов и $N - S \gg S$ элементов пренебрежимо малых к S наибольшим. Однако для оценки стандартным способом ключевых параметров систем обработки данных, таких как SINAD (Signal-to-Noise and Distortion Ratio), собранной информации недостаточно.

В настоящей работе исследуются методы оценки SINAD из собранных данных для устройств, основанных на теории сжатой дискретизации, и предлагается новая методика оценки SINAD.

Постановка задачи. Для восстановления полезной информации из собранных данных, кроме разреженности входного сигнала, требуется, чтобы способ сбора данных Φ

был линейным и несогласованным с Ψ^{-1} -преобразованием в разреженную область входного сигнала, т. е. данные Φ в преобразованной области не должны содержать пренебрежимо малых коэффициентов либо их количество K должно удовлетворять неравенству $N - K \gg K$. Для восстановления полезной информации из собранных данных $y = \Phi x$ требуется решить оптимизационную задачу [1–4]:

$$\min \|\alpha\|_{l_1} \text{ при условии, что } \|\Phi\Psi\alpha - y\|_{l_2} < \varepsilon \text{ или } \|\Phi\Psi\alpha - y\|_{l_2} \rightarrow 0, \quad (1)$$

где α – решение оптимизационной задачи в разреженной области; ε – допустимый уровень шума; $\|\cdot\|_{l_p}$ – норма вектора (общий случай), которая находится по формуле

$$\|\alpha\|_{l_p} = \sqrt[p]{\sum_{i=0}^N \alpha_i^p}.$$

Устройства, функционирующие на принципах теории сжатой дискретизации, называются аналого-информационными преобразователями (АИП). Основные составные части АИП: система сжатого считывания, описываемая способом считывания Φ и сжимающая входной сигнал; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для оцифровки сжатого сигнала; система восстановления данных, решающая оптимизационную задачу (1). В работе [5] рассмотрены разные архитектуры систем считывания АИП и особенности их работы, в работе [6] представлены алгоритмы решения оптимизационной задачи (1).

АИП разрабатываются как устройства, альтернативные АЦП и позволяющие обрабатывать сигналы из полосы входных частот, превышающих среднюю частоту дискретизации АИП. Соответственно, для успешного применения АИП необходимо оценить его чувствительность системы сжатого считывания и АЦП. Для этих целей существуют следующие оценки чувствительности АЦП, или качества его работы: отношение сигнал / шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) и отношение сигнал / шум и коэффициент искажения (SINAD) [7]:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} = 20 \log_{10} \frac{A_{\text{signalrms}}}{A_{\text{noiserms}}}, \quad (2)$$

$$\text{SINAD} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}} + P_{\text{distortion}}} = 20 \log_{10} \frac{A_{\text{signalrms}}}{\sqrt{A_{\text{noiserms}}^2 + A_{\text{distortionrms}}^2}}, \quad (3)$$

где P_{signal} – мощность сигнала; P_{noise} – мощность шума; $P_{\text{distortion}}$ – мощность искажений; $A_{\text{signalrms}}$ – среднеквадратичное значение амплитуды сигнала; A_{noiserms} – среднеквадратичное значение амплитуды шума; $A_{\text{distortionrms}}$ – среднеквадратичное значение амплитуды искажений.

Чувствительность АИП определяется системой сжатого считывания и АЦП, так как непосредственно эта часть АИП взаимодействует с входным сигналом. Соответственно, зная, как работает каждая часть в отдельности, можно определить, как работает устройство в целом. Однако в большинстве случаев нельзя провести оценку качества работы составных частей АИП. Вся считывающая конструкция АИП сжимает входной сигнал, и собранные данные несут в себе только часть информации о сигнале. Следовательно, используя формулы (2) и (3) напрямую, можно получить некорректный результат.

Обзор существующих методов оценки SINAD. Существует несколько методов оценки качества работы АИП. В работе [8] предлагается оценивать отношение сигнал / шум восстановленного сигнала (Reconstructed Signal-to-Noise Ratio, RSNR) по аналогии с АЦП. Для этого вычисляются мощность полезного сигнала и мощность шума спектра восстановленного сигнала, находится десятичный логарифм отношения мощностей аналогично АЦП:

$$RSNR = 10 \log_{10} \frac{P_{signal}}{P_{noise}}.$$

Спектр восстановленного сигнала зависит от алгоритма решения оптимизационной задачи. Это может привести к следующему: RSNR АИП будет значительно выше SNR используемого в АИП АЦП, что невозможно.

В работах [3, 4] предлагается оценивать SINAD по собранным данным y . В основе оценки лежит стандартная методика оценки SINAD АЦП, описанная в работе [9]. На вход АИП подается гармонический сигнал $x(t)$ с известной частотой. АИП выдает набор выходных данных y . К собранным данным применяется метод синусоидальной подгонки для нахождения такого $x(t) = D0 \cdot s0$, чтобы разница $\|x(t) - x(t)\|_{l_2}$ была минимальной. Здесь

$$s0 = \begin{pmatrix} A0 \\ B0 \\ C0 \end{pmatrix};$$

$$D0 = \begin{pmatrix} \cos(2\pi f_{in} t_1) & \sin(2\pi f_{in} t_1) & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \cos(2\pi f_{in} t_N) & \sin(2\pi f_{in} t_N) & 1 \end{pmatrix};$$

N – длина входного сигнала в тактах опорной частоты АИП; f_{in} – частота входного гармонического сигнала; f_{ref} – частота опорного сигнала; $t_{i+1} - t_i = \frac{1}{f_{ref}}$.

Для нахождения $s0$ необходимо решить оптимизационную задачу:

$$s0 = \arg \min_{s0} \|y - \Phi\Psi D0 \cdot s0\|^2.$$

После нахождения вектора $s0$ вычисляется SINAD:

$$SINAD = 10 \log_{10} \frac{A0^2 + B0^2}{2NAD}, \tag{5}$$

$$NAD = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{M-1} (y_m - \sum_{n=0}^{N-1} \phi_{m,n} x(t_n))^2,$$

где NAD – некомпенсированная ошибка восстановления, описывающая шум и искажения входного сигнала.

В данном подходе SINAD не зависит от результата восстановления и определяется только системой считывания и АЦП. Однако не учитывается, что вследствие уменьшения частоты дискретизации система считывания сигнала захватывает только часть информации. Кроме этого, данный подход можно применять только при условии, что входной сигнал разрежен в частотной области.

Метод расчета SINAD через шумовую «подгонку». По определению SINAD показывает, во сколько раз мощность полезного сигнала больше шума и искажений. Для

нахождения мощности полезного сигнала предлагается использовать результат решения оптимизационной задачи (1) – вектор α . Таким образом, данный метод может применяться для разных способов разреженного представления входного сигнала. Обязательное условие: входной сигнал должен иметь минимальную разреженность, например один гармонический сигнал. Так как α может содержать другие ненулевые коэффициенты из-за настроек оптимизатора, будем использовать вектор α_{nospur} , который содержит только полезную информацию о сигнале (S наибольших коэффициентов α в области максимального по модулю коэффициента вектора α). Все остальные коэффициенты равны нулю. Исходный входной сигнал в разреженном представлении α можно записать в виде суммы

$$\alpha = \alpha_{nospur} + \alpha_{noise},$$

где α_{noise} – вектор, описывающий шум и искажения входного сигнала.

Собранные данные y – это сжатый входной сигнал, следовательно информацию о шуме и искажениях имеем в сжатом виде:

$$y - \Phi\Psi\alpha_{nospur} = \Phi\Psi(\alpha - \alpha_{nospur}) = \Phi\Psi\alpha_{noise}.$$

Согласно теории сжатой дискретизации полезный сигнал разрежен в некотором базисе, поэтому возможно восстановить полезную информацию о сигнале. Вектор α_{noise} не разрежен, соответственно оптимизационная задача (1) для данного вектора недоопределенная и имеет бесконечное число решений. Вследствие этого восстановить спектр α_{noise} невозможно, но для оценки SINAD требуется определить мощность или среднеквадратичную амплитуду шума и искажений. Предполагая, что шум и искажения могут быть описаны эквивалентным по мощности белым шумом, мощность шума и искажений на всем диапазоне входного сигнала можно оценить как

$$P_{noise} + P_{distortion} = K_n \|\alpha_{noise}\|_{l_2}^2,$$

где K_n – доля собранных данных о сигнале, обрабатываемом системой считывания информации.

Для оценки представим α_{noise} в виде

$$\alpha_{noise} = A_{noiserm} \alpha_1,$$

где α_1 – ортонормированный с равными коэффициентами вектор в разреженной области длиной N . Тогда $A_{noiserm}$ можно вычислить как

$$A_{noiserm} = \frac{\|y - \Phi\Psi\alpha_{nospur}\|_{l_2}}{\|\Phi\Psi\alpha_1\|_{l_2}}.$$

Используя формулу (4) и приведенные рассуждения, определим SINAD АИП:

$$\text{SINAD} = 10 \log_{10} \frac{\|\alpha_{nospur}\|_{l_2}^2}{K_n A_{noiserm}^2}. \quad (6)$$

Коэффициент K_n зависит от архитектуры системы сжатого считывания. Обычно способ сбора данных Φ описывается матрицей размером $M \times N$. Действие этой матрицы на входной сигнал x длиной N сжимает его в M измерений. Рассмотрим примеры матриц для наиболее популярных архитектур АИП.

Для архитектуры с неравномерной дискретизацией (НРД) матрица сжатого считывания размером 3×9 может выглядеть как

$$\Phi = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Для архитектуры со случайным демодулятором матрица сжатого считывания тех же размеров может выглядеть как

$$\Phi = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

Коэффициент K_n вычисляется по формуле

$$K_n = N / clm,$$

где clm – число ненулевых столбцов Φ -матрицы.

Для архитектуры НРД $K_n = N/M$, для архитектуры со случайным демодулятором $K_n = 1$.

Сравнение методов расчета SINAD. Для сравнения методов проведен следующий эксперимент. Исследовалась модель АИП НРД, описанная в работе [10], для произвольной опорной частоты f_{ref} . В состав данного АИП входит АЦП. При изменении разрядности АЦП будет меняться уровень шума в собранных данных. Так как и SINAD характеризуется мощностью нелинейных искажений, то сделаем данный АЦП нелинейным. Пусть нелинейность описывается следующим многочленом:

$$f(x) = \frac{x + c \cdot x^2 + 0,1c \cdot x^3 + 0,01c \cdot x^4 + 0,001c \cdot x^5}{1 + 1,11c}, \quad (7)$$

где c – коэффициент нелинейных искажений (при $c = 0$ сигнал не искажается); x – исходный сигнал.

Для того чтобы наблюдать все нелинейные искажения до 5-го порядка, выберем частоту входного сигнала равной $\sim 0,1f_{ref}$ с заданным уровнем шума $SNR = 60$ дБ. Для сравнения получаемых результатов SINAD АИП параллельно вычислим SINAD для эталонного АЦП с частотой дискретизации, равной f_{ref} , с такой же разрядностью, как АЦП АИП, и нелинейностью, описываемой формулой (7). Так как качественные характеристики эталонного АЦП и АЦП, входящего в состав АИП НРД, одинаковые, то результат вычисления SINAD для АЦП и для АИП должен совпадать. На рис. 1 представлены спектры входного сигнала: исходный сигнал, сигнал после оцифровки АЦП, спектр восстановленного сигнала АИП из собранных данных. Разрядность АЦП равна 12 бит, коэффициент нелинейных искажений $c = 0,01$.

Для исследования влияния алгоритма восстановления на SINAD АИП рассматривали три разных алгоритма восстановления: алгоритм ортонормированного «жадного» приближения (Orthogonal Matching Pursuit, OMP), алгоритм выпуклой оптимизации (Convex Optimization Approach, CVX) и итеративный пороговый алгоритм (Iterative Hard Thresholding, ИТ) [6]. Так как шум и искажения вносятся системой сжатого считывания и АЦП в данные y , то SINAD АИП для разных алгоритмов должен совпадать. На рис. 2 представлены зависимости SINAD АИП от разрядности АЦП при $c = 0,01$: расчет SINAD АИП по методикам [8, 9] (см. формулы (4) и (5)) и расчет SINAD АИП по предложенной методике (см. формулу (6)). На рис. 3 представлены зависимости SINAD АИП от коэффициента нелинейных искажений c для разных методик расчета SINAD и от отношения опорной частоты f_{ref} и средней частоты дискретизации АИП $\langle f_s \rangle$.

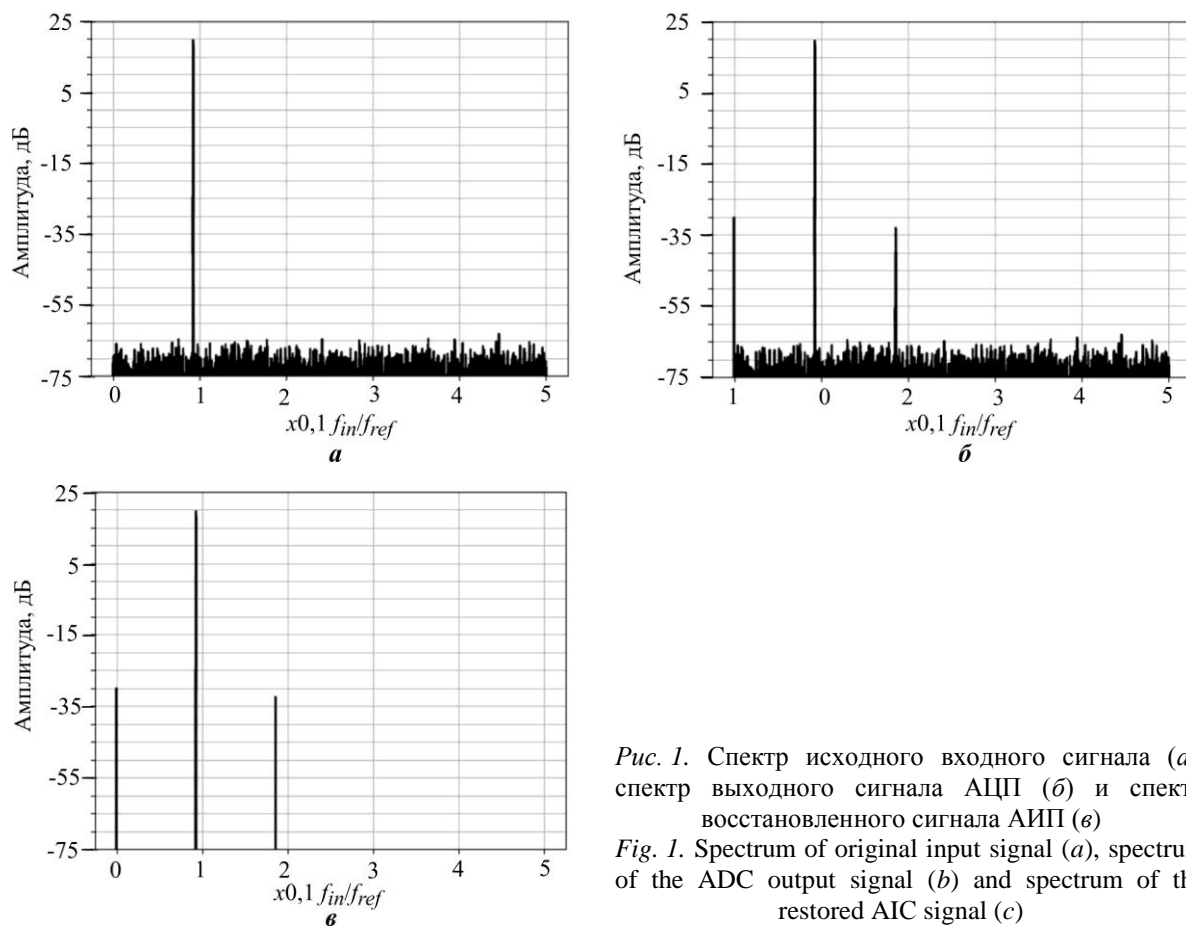


Рис. 1. Спектр исходного входного сигнала (а), спектр выходного сигнала АЦП (б) и спектр восстановленного сигнала АИП (в)
 Fig. 1. Spectrum of original input signal (a), spectrum of the ADC output signal (b) and spectrum of the restored AIC signal (c)

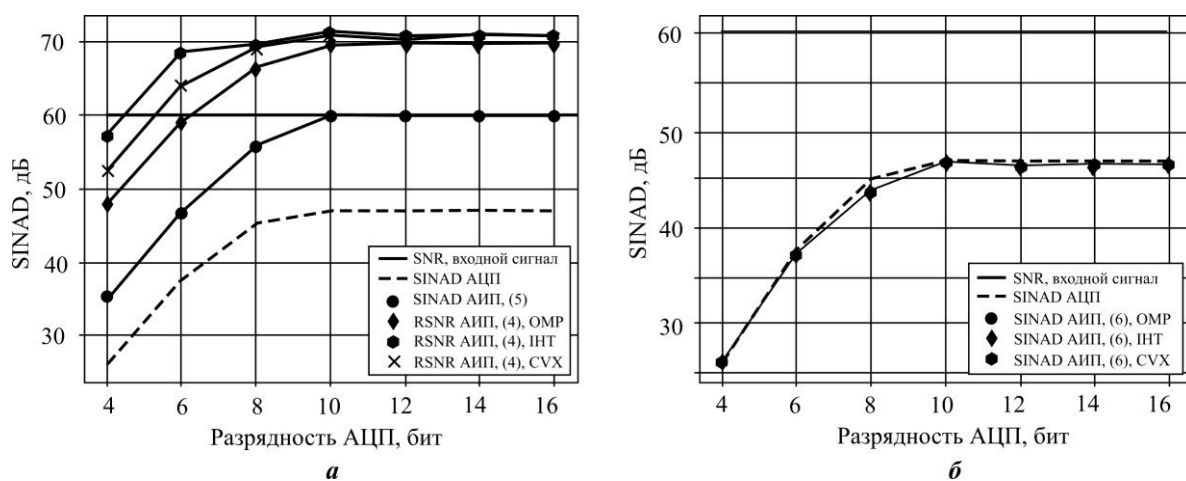


Рис. 2. Зависимости SINAD АИП от разрядности АЦП при $c = 0,01$: а – расчет по методикам [8, 9]; б – расчет по предложенной методике
 Fig. 2. The dependences of the SINAD of the AIC on the bit depth of the ADC at $c = 0.01$: a – calculation of the SINAD of the AIC according to the methods [8, 9]; b – calculation of the SINAD of the AIC according to the proposed method

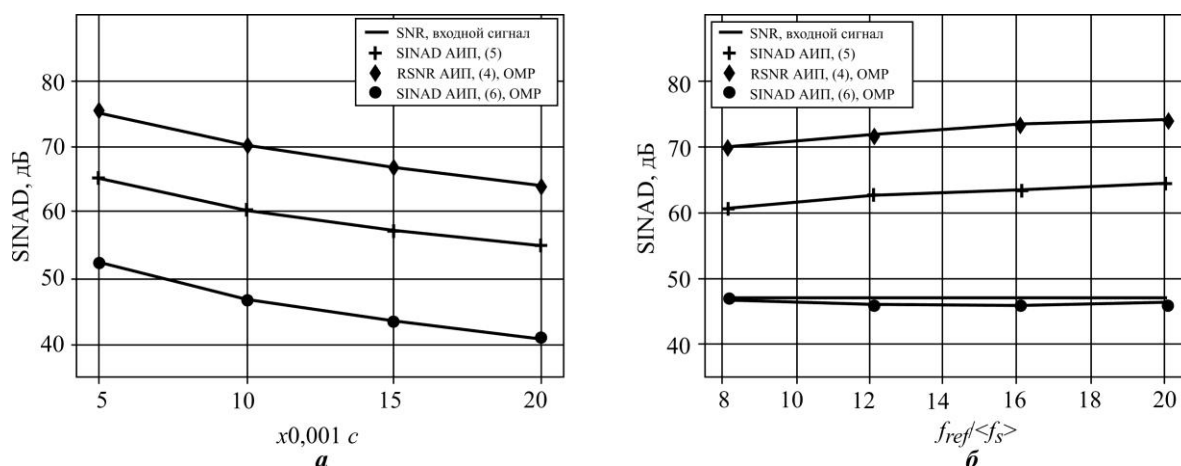


Рис. 3. Зависимости SINAD АИП от коэффициента нелинейных искажений c для разных методик расчета (а) и от $f_{ref}/\langle f_s \rangle$ (б)

Fig. 3. Dependences of SINAD AIC on the coefficient of nonlinear distortion c for different SINAD calculation methods (a) and on $f_{ref}/\langle f_s \rangle$ (b)

Таким образом, значения SINAD АИП, полученные по формулам (4) и (5), значительно выше значений SINAD АЦП с частотой дискретизации f_{ref} , но зависимости от разрядности АЦП и коэффициента нелинейных искажений похожи на зависимость SINAD АЦП от этих же параметров. Кроме того, RSNR (4) восстановленного сигнала зависит от алгоритма восстановления, наиболее существенные различия наблюдаются при разрядности АЦП менее 10. С ростом значения отношения $f_{ref}/\langle f_s \rangle$ SINAD АИП растет, хотя качественные характеристики системы считывания и АЦП неизменны.

SINAD АИП, полученный с помощью шумовой «подгонки», практически совпадает с результатами SINAD АЦП. SINAD АИП не зависит от типа алгоритма восстановления и от отношения $f_{ref}/\langle f_s \rangle$.

Заключение. Для адекватного использования АИП в целях обработки данных необходимо знать, какие ограничения на чувствительность налагаются системой сжатого считывания и АЦП АИП. С помощью предложенного метода можно подобрать эквивалентный белый шум, мощность которого будет характеризовать шум и искажения АИП. Математическое моделирование АИП НРД для проверки методов оценки SINAD для АИП показало, что предложенный метод имеет ряд преимуществ перед существующими, а именно: оценка SINAD АИП не зависит от типа алгоритма восстановления сигнала; метод можно использовать для сигналов, имеющих разреженные представления в любых областях. Полученные результаты SINAD АИП и SINAD АЦП с одинаковыми параметрами нелинейности и разрядности АЦП совпадают.

Литература

1. Donoho D. L. Compressed sensing // IEEE Trans. Inf. Theory. 2006. Vol. 52. No. 4. P. 1289–1306. <https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582>
2. Mallat S. A wavelet tour of signal processing: the sparse way. 3rd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2009. 832 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8>
3. Candes E. J., Romberg J., Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information // IEEE Trans. Inf. Theory. 2006. Vol. 52. No. 2. P. 489–509. <https://doi.org/10.1109/TIT.2005.862083>
4. Rani M., Dhok S. B., Deshmukh R. B. A systematic review of compressive sensing: concepts, implementations and applications // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 4875–4894. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793851>

5. Полунин М. Н., Быкова А. В. Обзор архитектур аналого-информационных преобразователей // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 8. С. 6–12. <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2019-8-6-12>
6. Быкова А. В., Полунин М. Н. Критерии численной оценки алгоритмов восстановления данных для аналого-информационных преобразователей // Проблемы разработки перспективных микро- и нано-электронных систем (МЭС). 2020. № 3. С. 224–229. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-3-224-229>
7. Analog-digital conversion / ed. W. Kester. Norwood, MA: Analog Devices, 2004. 1142 p.
8. *Rapiano S.* Analog-to-information converters: research trends and open problems // 2016 26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA). Kosice: IEEE, 2016. P. 10–17. <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2016.7477445>
9. IEEE standard for terminology and test methods for analog-to-digital converters: IEEE Std. 1241-2010 (rev. of IEEE Std. 1241-2000). New York: IEEE Instrument. & Meas. Soc., 2011. X, 127 p. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.5692956>
10. *Быкова А. В., Полунин М. Н.* Аналого-информационный преобразователь с неравномерной дискретизацией на базе АЦП последовательного приближения // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S5-2 (102). С. 325–332. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.5s.325.332>

Статья поступила в редакцию 13.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 25.04.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Полунин Михаил Николаевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), mpolunin@elvees.com

Лосев Владимир Вячеславович – доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), dsd@miee.ru

Чаплыгин Юрий Александрович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ar@miee.ru

References

1. Donoho D. L. Compressed sensing. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2006, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306. <https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582>
2. Mallat S. *A wavelet tour of signal processing: the sparse way*. 3rd ed. Burlington, MA, Academic Press, 2009. 832 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8>
3. Candes E. J., Romberg J., Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 2006, vol. 52, no. 2, pp. 489–509. <https://doi.org/10.1109/TIT.2005.862083>
4. Rani M., Dhok S. B., Deshmukh R. B. A systematic review of compressive sensing: concepts, implementations and applications. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 4875–4894. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793851>
5. Polunin M. N., Bykova A. V. Review of analog-to-information converters. *Voprosy radioelektroniki = Questions of Radio Electronics*, 2019, no. 8, pp. 6–12. (In Russian). <https://doi.org/10.21778/2218-5453-2019-8-6-12>
6. Bykova A. V., Polunin M. N. Criteria for the numerical evaluation of data recovery algorithms for analogue-information converters. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of development of advanced micro- and nanoelectronics systems (MES)*, 2020, no. 3, pp. 224–229. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-3-224-229>
7. Kester W. (ed.) *Analog-digital conversion*. Norwood, MA, Analog Devices, 2004. 1142 p.

8. Rapuano S. Analog-to-information converters: research trends and open problems. *2016 26th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. Kosice, IEEE, 2016, pp. 10–17. <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2016.7477445>

9. *IEEE standard for terminology and test methods for analog-to-digital converters: IEEE Std. 1241-2010 (rev. of IEEE Std. 1241-2000)*. New York, IEEE Instrument. & Meas. Soc., 2011. x, 127 p. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2011.5692956>

10. Bykova A. V., Polunin M. N. An analog-to-information converter with non-uniform sampling based on SAR ADC. *Nanoindustriya = Nanoindustry*, 2020, vol. 13, no. S5-2 (102), pp. 325–332. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.5s.325.332>

The article was submitted 13.04.2022; approved after reviewing 25.04.2022;
accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Mikhail N. Polunin – PhD student of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), mpolunin@elvees.com

Vladimir V. Losev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dsd@miee.ru

Yuri A. Chaplygin – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Integrated Electronics and Microsystems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ar@miee.ru

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 – 2021 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

<http://ivuz-e.ru>

Расчетная модель оптической системы для одноканального двухспектрального приемника архитектуры электронно-оптического преобразователя

А. В. Попов

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва,
Россия*

alexcoretex@gmail.com

Аннотация. Проблема регистрации и распознавания тепловых (3–15 мкм) либо ультрафиолетовых (0,15–0,25 мкм) объектов на окружающей их местности (0,8–1,1 мкм) решается посредством использования двухканальных двухспектральных оптических систем. Для реализации инновационных одноканальных двухспектральных эмиссионных приемников изображений, выполненных в архитектуре электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и позволяющих осуществить привязку изображений теплового или ультрафиолетового объекта к изображению местности, необходима разработка единой оптико-механической системы. В работе для инновационных одноканальных двухспектральных эмиссионных приемников изображений ЭОП-архитектуры предложена и теоретически исследована единая оптическая система, которая позволяет формировать изображения объектов, излучающих в тепловом либо ультрафиолетовом диапазоне, в привязке их изображений к окружающей местности. Подход к выбору базового материала – фторида бария BaF_2 – и геометрии основан на значительной величине дисперсии показателя преломления вещества линз и входного окна эмиссионного приемника изображений ЭОП-архитектуры. При расчетах использованы метод Ньютона для решения систем неоднородных уравнений и язык Python (библиотека SciPy). Определены значения оптимальных параметров оптической системы: толщины линз и входного окна ЭОП, расстояние между ними, радиусы кривизны поверхностей линз. Результаты расчетов могут быть использованы в практических работах по созданию одноканальных двухспектральных эмиссионных приемников изображений ЭОП-архитектуры тепловых и ультрафиолетовых объектов в привязке к изображениям окружающей их местности.

Ключевые слова: фокальная плоскость, оптическая плоскость, задний фокальный отрезок, кривизна линзы, показатель преломления, ультрафиолетовое излучение, инфракрасное излучение, фторид бария

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-38-90125).

Для цитирования: Попов А. В. Расчетная модель оптической системы для одноканального двухспектрального приемника архитектуры электронно-оптического преобразователя // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 613–623. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-613-623>

Calculation model of the optical system for a single-channel dual-spectrum receiver of the image intensifier tube architecture

A. V. Popov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

alexcoretex@gmail.com

Abstract. The problem of registration and recognition of thermal (3–15 μm) or ultraviolet (0.15–0.25 μm) objects in the surrounding area (0.8–1.1 μm) is solved by using two-channel dual spectrum optical systems. In order to implement innovative single-channel dual spectrum emission image detectors implemented in image intensifier tube architecture that make it possible to link images of a thermal or ultraviolet object to an image of a terrain, it is necessary to develop a unified optical-mechanical system. In this work, an approach to the development of a unified optical system for single-channel dual spectrum emission image detectors of the image intensifier tube architecture is proposed and theoretically investigated. The proposed optical system makes it possible to form images of objects emitting in the thermal or ultraviolet range, in relation to the image of the surrounding area. The choice of base material (BaF_2) and geometry is based on the significant dispersion of the refractive index of the lens material. When performing calculations of the optical system, Newton's method and the Python language (SciPy library) were used. The optimal values of the thickness of the lenses and the input window of the image intensifier tube, the distance between them, and the radii of curvature of the lens surfaces have been calculated. The calculation results can be used in practical work on the creation of single-channel dual spectrum emission receivers of the image intensifier tube architecture for images of thermal and ultraviolet objects, in relation to the images of their surroundings.

Keywords: focal plane, optical plane, back focal length, lens curvature, refractive index, ultraviolet radiation, infrared radiation, barium fluoride

Funding: the work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-38-90125).

For citation: Popov A. V. Calculation model of the optical system for a single-channel dual-spectrum receiver of the image intensifier tube architecture. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 613–623. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-613-623>

Введение. На сегодняшний день актуальна разработка функционально эффективных и бюджетно-экономных неохлаждаемых приемников изображений объектов, излучающих в тепловом или ультрафиолетовом (УФ) диапазонах, в привязке изображений объектов к изображению окружающей местности [1–3]. В работах [4, 5] предложены и теоретически исследованы инновационные конструкции одноканальных двухспектральных эмиссионных приемников изображений, выполненных в архитектуре электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и предназначенных для регистрации и распознавания УФ- и тепловых объектов, в привязке к окружающей местности.

В конструкциях инновационных одноканальных двухспектральных приемников изображений [4–6] формирование изображений объектов и местности их расположения осуществляется единой оптической системой в фокальных плоскостях, отстоящих друг от друга на расстояние ~ 1 мм. Разнесение в пространстве фокальных плоскостей изображений объекта и окружающей местности возможно вследствие разницы показателей преломления вещества линз для спектральных полос, излучаемых объектом (15–260 нм или 3–13 мкм) и местностью (1,25–1,60 мкм). Оптическая система включает в себя две линзы и входное окно ЭОП, выполненные из фторида бария BaF_2 (диапазон прозрачности 0,15–13 мкм [6]). В двухспектральном одноканальном эмиссионном приемнике, чувствительном к излучению в УФ-диапазоне [4], изображение объекта фокусируется на поверхность алмазного фотокатода, расположенного на тыльной стороне входного окна ЭОП, изображение окружающей местности (1,25–1,60 мкм) проецируется в фокальную плоскость с германиевым фотокатодом. В одноканальном двухспектральном эмиссионном приемнике изображений [5], чувствительном к распознаванию «тепловых» объектов (3–13 мкм), изображения потока излучений от теплового объекта фокусируются на поверхность пироэлектрического сенсора, а изображение местности (1,25–1,60 мкм) проецируется на поверхность германиевого фотокатода, расположенного на тыльной стороне входного окна ЭОП.

Цель настоящей работы – поиск и расчет оптимальных параметров единой оптической системы, позволяющей разнести фокальные плоскости изображений объекта и местности на расстояние, удобное для реализации одноканальных двухспектральных приемников изображений объектов.

Модель и расчет оптической системы. Для разнесения в пространстве фокальных плоскостей изображений объектов и окружающей местности на удобное для реализации прибора расстояние ~ 1 мм предложена оптическая система, состоящая из двух одинаковых собирающих линз (рис. 1).

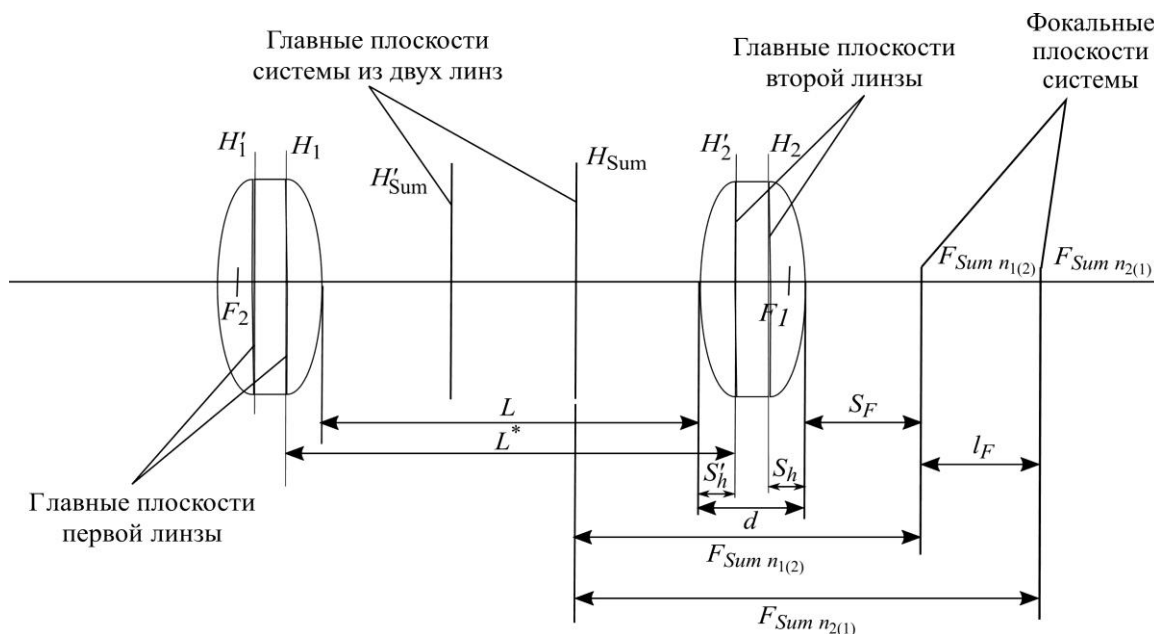


Рис. 1. Схематическое изображение оптической системы из двух линз
 Fig. 1. Schematic representation of the optical system of two lenses

Фокусные расстояния F_1 (F_2) линз рассчитываются относительно их ближайшей главной плоскости H_1 (H'_2) соответственно. Фокусные расстояния оптической системы $F_{Sum n_{1(2)}}$ положения фокальных плоскостей системы изображения объекта и окружающей местности зависят от конструкций приемников изображения и их спектрального диапазона работы. Для изображения в привязке к окружающей местности объекта, излучающего в тепловом диапазоне, либо объекта, излучающего в УФ-диапазоне, фокальные плоскости системы расположатся соответственно в точках $F_{Sum n_{1(2)}}$ и $F_{Sum n_{2(1)}}$ (см. рис. 1). Здесь $n_{1(2)}$ – показатели преломления линз для объекта и местности.

Расчет оптической системы из двух линз. Поиск оптимальных параметров оптической системы осуществляли с учетом толщины линз, расстояния между линзами, радиусов кривизны линз и показателя преломления вещества линз по отношению к спектральным диапазонам излучений объекта и окружающей местности. Алгоритм расчета параметров оптической системы представлен в форме блок-схемы на рис. 2.

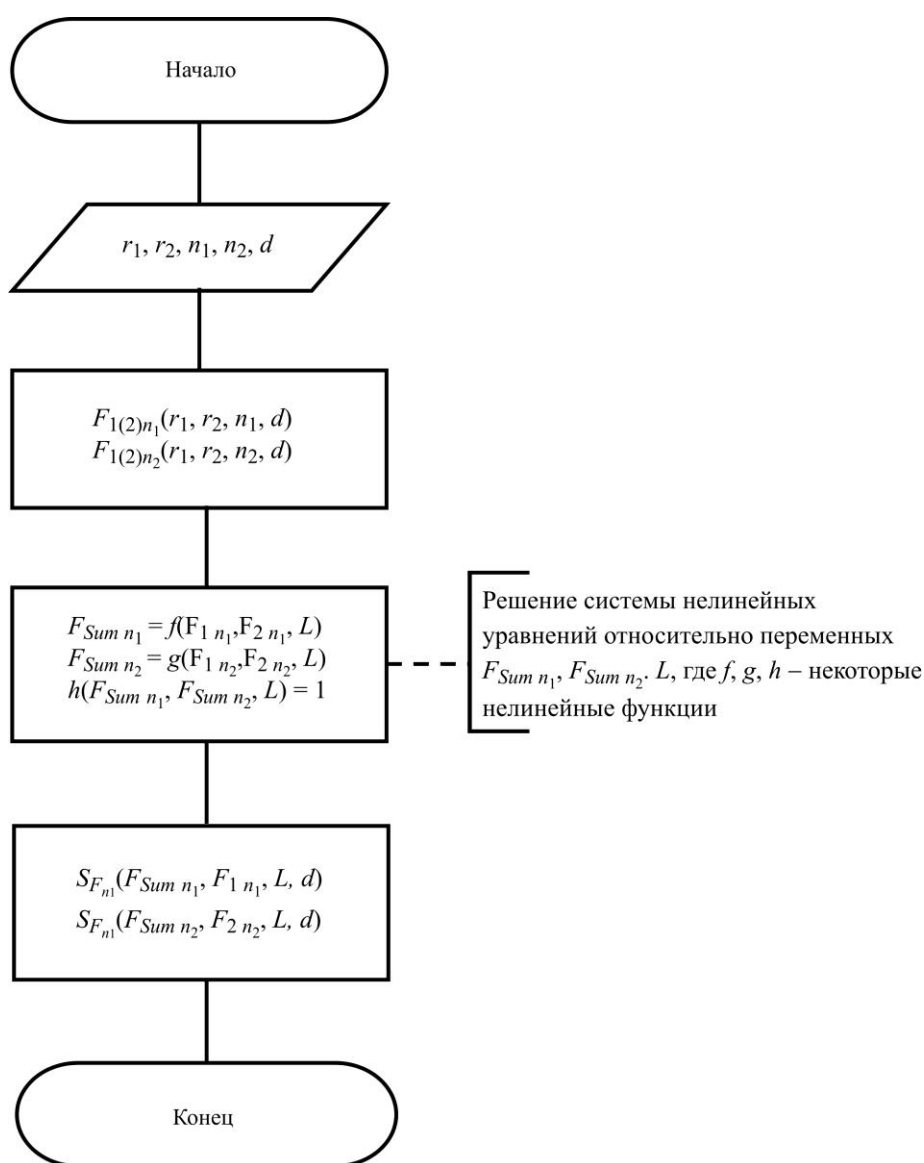


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета фокальных плоскостей
Fig. 2. Block diagram of the algorithm for calculating focal planes

Расчеты параметров оптической системы выполнены в три этапа.

На первом этапе, исходя из заданной апертуры приемника изображений, выбраны диапазоны радиусов кривизны и толщин линз, учтены их показатели преломления n_1 и n_2 . С использованием следующего уравнения рассчитаны фокусные расстояния линз [7]:

$$F_{1(2)n_{1(2)}} = (n_{1(2)} - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + (n_{1(2)} - 1) \frac{d}{n_{1(2)} r_1 r_2} \right),$$

где F_{in} – фокусные расстояния линз, $F_{1n_{1(2)}} = F_{2n_{1(2)}}$, поскольку линзы одинаковые; $n_{1(2)}$ – показатели преломления линз для указанных спектральных диапазонов излучений объекта и местности; $r_{1(2)}$ – радиусы кривизны для левой и правой стороны линз; d – толщина линзы.

При расчете зависимости толщины линзы от радиуса ее кривизны использовали уравнение

$$d = d_1(r_1) + d_2(r_2) + d_3,$$

где $d_1(r_1)$ и $d_2(r_2)$ – компоненты толщины секторов левой и правой частей линзы, зависящие от их радиусов и апертуры; d_3 – плоскопараллельный сектор, соединяющий сектора $d_1(r_1)$ и $d_2(r_2)$.

Зависимость толщины $d_{1(2)}$ линз от соответствующего радиуса ее кривизны $r_{1(2)}$ определена графически (рис. 3). Окружность имеет радиус $r_{1(2)}$, хорда h является диаметром апертуры линзы.

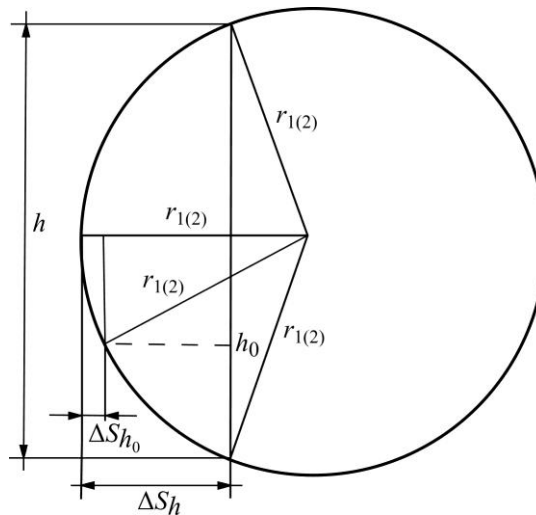


Рис. 3. Окружность для определения толщины $d_{1(2)}$ от радиуса кривизны линзы $r_{1(2)}$

Fig. 3. Circle to determine the thickness $d_{1(2)}$ from the radius of curvature of the lens $r_{1(2)}$

Из рис. 3 следует соотношение

$$d_{1(2)} = \Delta S_h = r_{1(2)} - \frac{\sqrt{4r_{1(2)}^2 - h^2}}{2}.$$

На втором этапе решали систему нелинейных уравнений с использованием библиотеки SciPy, разработанной для языка программирования Python, с применением решателя fsolve:

$$\begin{cases} \frac{1}{F_{Sum\ n_1}} = \frac{1}{F_{1n_1}} + \frac{1}{F_{2n_1}} - \frac{L_{n_1}^*}{F_{1n_1} F_{2n_1}}, \\ \frac{1}{F_{Sum\ n_2}} = \frac{1}{F_{1n_2}} + \frac{1}{F_{2n_2}} - \frac{L_{n_2}^*}{F_{1n_2} F_{2n_2}}, \\ S_{Fn_2} - S_{Fn_1} = l_F, \end{cases} \quad (1)$$

где $F_{Sum\ n_1}$ и $F_{Sum\ n_2}$ – фокусные расстояния оптической системы при показателях преломления n_1 и n_2 соответственно; l_F – расстояние между двумя фокальными плоскостями линз (см. рис. 1); $L_{n_{1(2)}}^*$ – расстояние между ближайшими главными плоскостями линз, которое связано с расстоянием между линзами L выражением [7]

$$L_{n_{1(2)}}^* = L + S'_{hm_{1(2)}} + S_{hm_{1(2)}}.$$

Здесь $S'_{hm_{1(2)}}$ и $S_{hm_{1(2)}}$ – расстояния от края линзы до ближайшей главной плоскости для первой (с правой стороны линзы) и второй линз (с левой стороны линзы) соответственно [8]:

$$\begin{aligned} S_{hm_{1(2)}} &= F_{2n_{1(2)}} \frac{n_{1(2)} - 1}{n_{1(2)} r_1} d, \\ S'_{hm_{1(2)}} &= F_{1n_{1(2)}} \frac{n_{1(2)} - 1}{n_{1(2)} r_2} d, \end{aligned}$$

где r_1 и r_2 – радиусы кривизны левой и правой частей линзы (см. рис. 1).

На третьем этапе полученные значения фокусных расстояний $F_{Sum\ n_1}$, $F_{Sum\ n_2}$ оптической системы использовали для расчета фокальных отрезков S_{Fn_1} и S_{Fn_2} при показателях преломления n_1 и n_2 соответственно [9]:

$$S_{Fn_{1(2)}} = \frac{1 - \left(L_{n_{1(2)}}^* / F_{1n_{1(2)}} \right)}{F_{Sum\ n_{1(2)}}} - S_{hm_{1(2)}}. \quad (2)$$

Расчет оптической системы из двух линз с входным окном. Фокальные плоскости, в которые проецируются изображения объектов и местности, излучающие в различных спектральных диапазонах, должны быть спроецированы в вакуумно-плотный корпус сквозь входное окно приемника изображений ЭОП-архитектуры. Наличие в оптической схеме дополнительно к рассматриваемым линзам входного окна приведет к смещению фокальных плоскостей вдоль оптической оси прибора. Таким образом, в рабочих условиях оптическую схему из двух линз необходимо дополнить входным окном. Схематическое изображение оптической системы, содержащей входное окно толщиной d_{window} , представлено на рис. 4. На рисунке изображена траектория движения

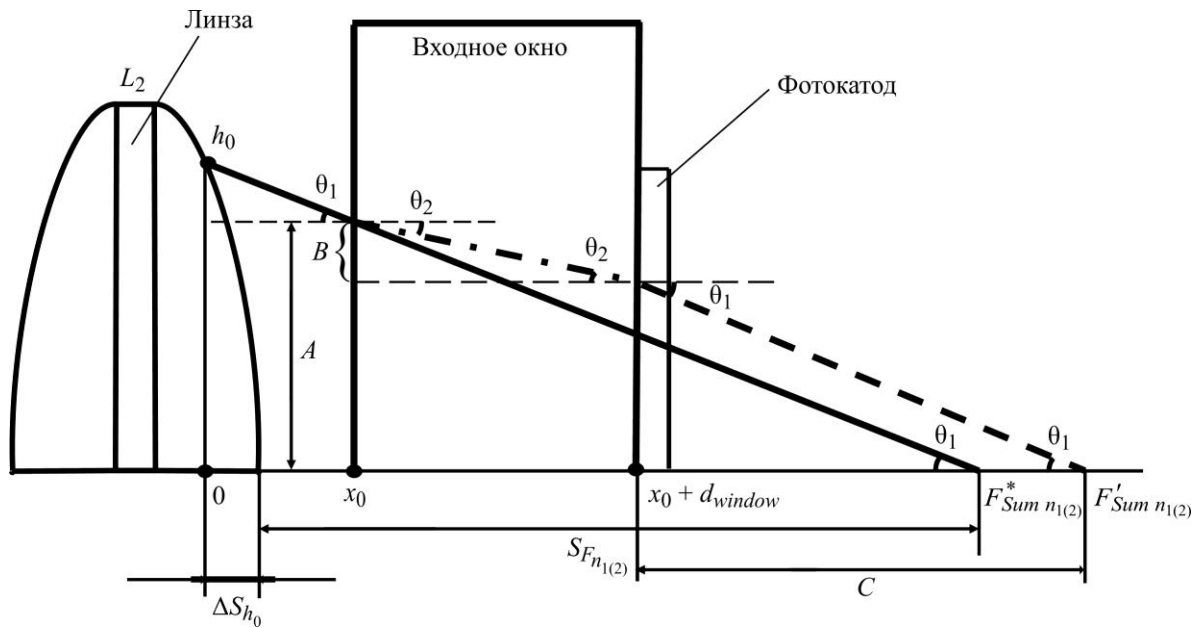


Рис. 4. Схематическое изображение фрагмента модифицированной оптической системы в составе входного окна и правой линзы оптической системы
 Fig. 4. Schematic representation of a fragment of the modified optical system, as part of the entrance window and the right lens of the optical system

луча света, выходящего из произвольной точки h_0 поверхности правой линзы L_2 оптической системы (см. рис. 1) и фокусирующегося либо в точке F^*_{Sum} при отсутствии входного окна, либо в точке F'_{Sum} при его наличии. Обозначим показатели преломления вещества линз и входного окна \bar{n}_2 , а показатель преломления среды \bar{n}_1 . Согласно конструкции приемника изображений необходимо одну из фокальных плоскостей оптической системы совместить с фотокатодом, расположенным на тыльной поверхности входного окна ЭОП (см. рис. 4). Данная фокальная плоскость отстоит от проекции точки h_0 на оптическую ось системы на расстоянии $x_0 + d_{window}$. Расстояние между выбранной точкой h_0 и точкой центра (полюса) поверхности линзы L_2 , обеспечивающее выполнение граничного условия (см. рис. 3, 4), определяется соотношением

$$\Delta S_{h_0} = r_2 - \sqrt{r_2^2 - h_0^2}. \quad (3)$$

Используя соотношение (3) и данные по геометрии конструкции, представленной на рис. 4, для расстояния от точки h_0 до точки фокуса F^*_{Sum} при отсутствии входного окна получаем

$$F^*_{Sum n_1(2)} = S_{Fn_1(2)} + \Delta S_{h_0} = S_{Fn_1(2)} + r_2 - \sqrt{r_2^2 - h_0^2}.$$

Отметим, что $F^*_{Sum n_1(2)}$ (см. рис. 4) не тождественно $F_{Sum n_1(2)}$ (рис. 1), так как система $F^*_{Sum n_1(2)}$ включает окно.

Для учета смещения фокальной плоскости при наличии в оптической системе входного окна с применением теоремы синусов рассчитаем длину отрезка A (см. рис. 4). Уравнение, описывающее траекторию светового луча при отсутствии входного окна, представляет собой уравнение прямой:

$$y(x) = h_0 - \frac{h_0}{F_{Sum\ n_{1(2)}}^*} x, \quad (4)$$

где x – координата точки положения светового луча на оптической оси.

Подставив в (4) координаты положения входного окна, получим длину отрезка A :

$$A = h_0 - \frac{h_0}{F_{Sum\ n_{1(2)}}^*} x_0. \quad (5)$$

С учетом представленной конструкции единой системы входной оптики для проецирования изображения объекта либо местности в фокальную плоскость фотокатода, расположенного на пьедестале внутренней стороны входного окна ЭОП (см. рис. 4), необходимо, чтобы отрезок A был равен отрезку B . Связь длины отрезка B с толщиной входного окна может быть получена из треугольника, построенного внутри входного окна (см. рис. 4, пунктирные линии):

$$B = d_{window} \operatorname{tg} \theta_2. \quad (6)$$

Выразим θ_2 через θ_1 и, используя закон синусов (закон преломления), получим

$$\sin \theta_2 = \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} \sin \theta_1.$$

Следующее выражение устанавливает зависимость угла θ_1 от величин отрезков Oh_0 и $F_{Sum\ n_{1(2)}}^*$ (см. рис. 4):

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{h_0}{F_{Sum\ n_{1(2)}}^*} \quad (7)$$

или

$$\sin \theta_2 = \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{h_0}{F_{Sum\ n_{1(2)}}^*} \right) \right) = \frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_2} \frac{h_0}{\sqrt{F_{Sum\ n_{1(2)}}^{*2} + h_0^2}}. \quad (8)$$

Выразив $\sin \theta_2$ через $\cos \theta_2$, имеем

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} = \sqrt{\frac{\bar{n}_2^2 F_{Sum\ n_{1(2)}}^{*2} + h_0^2 (\bar{n}_2^2 - \bar{n}_1^2)}{\bar{n}_2^2 (F_{Sum\ n_{1(2)}}^{*2} + h_0^2)}}. \quad (9)$$

Используя выражения (8) и (9), получаем

$$\operatorname{tg} \theta_2 = \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} = \sqrt{\frac{h_0^2 \bar{n}_1^2}{\bar{n}_2^2 F_{Sum\ n_{1(2)}}^{*2} + h_0^2 (\bar{n}_2^2 - \bar{n}_1^2)}}. \quad (10)$$

При подстановке выражения (10) в выражение (6) с учетом того, что $A = B$, выражение для первого граничного условия принимает вид

$$h_0 - \frac{h_0}{F_{Sum\ n_{1(2)}}^*} x_0 = d_{window} \sqrt{\frac{h_0^2 \bar{n}_1^2}{\bar{n}_2^2 F_{Sum\ n_{1(2)}}^{*2} + h_0^2 (\bar{n}_2^2 - \bar{n}_1^2)}}. \quad (11)$$

Используя уравнения (5)–(7), (10), найдем отрезок C , определяющий разнесение двух фокусных плоскостей на расстояние l_F (см. рис. 1 и 4):

$$C = (A - B) \operatorname{ctg} \theta_1 = F_{Sum\ n_{1(2)}}^* - x_0 - d_{window} \sqrt{\frac{h_0^2 F_{Sum\ n_{1(2)}}^{*2}}{\bar{n}_2^2 F_{Sum\ n_{1(2)}}^{*2} + h_0^2 (\bar{n}_2^2 - \bar{n}_1^2)}}. \quad (12)$$

Используя выражения (11) и (12) и граничные условия, можно модифицировать систему нелинейных уравнений (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{F_{Sum\ n_1}} = \frac{1}{F_{1n_1}} + \frac{1}{F_{2n_1}} - \frac{L_{n_1}^*}{F_{1n_1} F_{2n_1}}, \\ \frac{1}{F_{Sum\ n_2}} = \frac{1}{F_{1n_2}} + \frac{1}{F_{2n_2}} - \frac{L_{n_2}^*}{F_{1n_2} F_{2n_2}}, \\ h_0 - \frac{h_0}{F_{Sum\ n_1}^*} x_0 = d_{window} \sqrt{\frac{h_0^2}{n_1^2 F_{Sum\ n_1}^{*2} + h_0^2 (n_1^2 - 1)}}, \\ F_{Sum\ n_2}^* - x_0 - d_{window} \sqrt{\frac{h_0^2 F_{Sum\ n_2}^{*2}}{n_2^2 F_{Sum\ n_2}^{*2} + h_0^2 (n_2^2 - 1)}} = l_F, \end{array} \right. \quad (13)$$

где $\bar{n}_1 = 1$, $\bar{n}_2 = n_1$ и $\bar{n}_2 = n_2$ для выражений (11) и (12) соответственно.

Тогда результаты расчетов, выполненных на этапе 3 без входного окна в оптической системе, изменятся в силу необходимости замены уравнения (2) на уравнение

$$F_{Sum\ n_{1(2)}}' = F_{Sum\ n_{1(2)}}^* + d_{window} \left(1 - \sqrt{\frac{h_0^2 F_{Sum\ n_{1(2)}}^{*2}}{n_{1(2)}^2 F_{Sum\ n_{1(2)}}^{*2} + h_0^2 (n_{1(2)}^2 - 1)}} \right).$$

Для нахождения расстояния от края ближайшей к входному окну линзы до точки фокуса $F_{Sum\ n_{1(2)}}'$ использовали выражение $x = x_0 - \Delta S_{h_0}$.

Результаты расчетов. С использованием решателя `fsolve` из библиотеки `SciPy` для языка программирования `Python` найдены корни систем нелинейных уравнений (1) и (13). Отбор корней для рассматриваемых систем нелинейных уравнений выполнен при следующих (выбранных из практических соображений) условиях: $S_{F_{n_{1(2)}}} > 5$ мм, $r_{1(2)} > 15$ мм. Длина объектива L_{obj} оптической системы приемника выбрана минимально возможной: $L_{obj} = S_{F_{n_1}} + 2d + L - d_{window}$, $L_{obj} = (x_0 + d_{window}) + 2d + L$, где показатель преломления для $S_{F_{n_{1(2)}}}$ соответствует первой фокальной плоскости.

Результаты расчетов параметров оптической системы для одноканальных двух-спектральных приемников изображений объектов, излучающих в УФ- и тепловом спектральных диапазонах, в привязке к окружающей местности представлены в табл. 1, 2. При расчетах в качестве материала для линз использовали BaF₂. Толщина средней части линзы $d_3 = 0,25$ мм, $h = 25$ мм, $h_0 = h/4$, толщина входного окна ЭОП $d_{window} = 5$ мм.

Таблица 1
Параметры оптической системы (мм) из двух линз, выполненных из BaF₂

Table 1

Parameters of the optical system (mm) of two lenses made of BaF₂

$F_{Sum n_1}$	$F_{Sum n_2}$	$F_{1(2)n_1}$	$F_{1(2)n_2}$	S_{Fn_1}	S_{Fn_2}	r_1	r_2	L	d	L_{obj}
УФ-диапазон, $n_1(\lambda = 0,26 \text{ мкм}) = 1,51$; $n_2(\lambda = 0,26 \text{ мкм}) = 1,51$ [10]										
14,918	15,703	21,021	22,710	10,302	11,302	16	26	5,637	9,464	34,867
Тепловой диапазон, $n_1(\lambda = 1,6 \text{ мкм}) = 1,47$; $n_2(\lambda = 8 \text{ мкм}) = 1,43$ [6]										
13,182	14,158	21,860	23,768	11,704	12,704	23	16	0,092	9,956	31,708

Таблица 2

Параметры оптической системы (мм) из двух линз с входным окном, выполненных из BaF₂

Table 2

Parameters of the optical system (mm) of two lenses with an entrance window made of BaF₂

$F'_{Sum n_1}$	$F'_{Sum n_2}$	$F^*_{Sum n_1}$	$F^*_{Sum n_2}$	r_1	r_2	L	d	x	L_{obj}
УФ-диапазон, $n_1(\lambda = 0,26 \text{ мкм}) = 1,51$; $n_2(\lambda = 1,6 \text{ мкм}) = 1,47$ [10]									
15,570	16,570	13,7033	14,819	78	16	1,323	7,271	9,298	31,434
Тепловой диапазон, $n_1(\lambda = 1,6 \text{ мкм}) = 1,47$; $n_2(\lambda = 8 \text{ мкм}) = 1,43$ [6]									
15,603	16,603	13,832	14,954	27	18	0,594	8,366	9,484	32,929

Заключение. Рассчитанная единая оптическая система для инновационных одноканальных двухспектральных эмиссионных приемников изображений позволяет разнести фокальные плоскости изображений объектов (0,15–0,25 мкм либо 3–13 мкм) и местности (1,25–1,6 мкм) на расстояния, удобные для реализации приборов. Результаты исследований будут полезны при практических разработках одноканальных двухспектральных неохлаждаемых приемников изображений объектов в привязке к окружающей местности.

Литература

1. *Adomeit U.* IR dual-band camera demonstrator and dual-band image fusion techniques // SENSOR+TEST Conf.: Proc. OPTO 2009 & IRS² 2009. Wunstorf: AMA, 2009. P. 221–226. <https://doi.org/10.5162/irs09/i2.3>
2. QWIP compact thermal imager: Catherine-XP and its evolution / *O. Cocle, C. Rannou, B. Forestier et al.* // Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XXXIII. 2007. Vol. 6542. Art. ID: 654234. <https://doi.org/10.1117/12.723720>
3. *Vogel H., Schlemmer H.* Dual-band infrared camera // Proc. SPIE. Detectors and Associated Signal Processing II. 2005. Vol. 5964. Art. ID: 59640S. <https://doi.org/10.1117/12.625180>
4. Расчетная модель приемника тепловых изображений в архитектуре электронно-оптического преобразователя / *А. С. Гревцев, П. А. Золотухин, Э. А. Ильичев и др.* // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 4. С. 507–519. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.04.52237.270-21>

5. Исследование процессов считывания изображений тепловых объектов приемником, выполненным в архитектуре электронно-оптического преобразователя / А. С. Гревцев, П. А. Золотухин, Э. А. Ильичев и др. // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 5. С. 649–659. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.05.52368.338-21>
6. Материалы – BaF₂: фтористый барий. Оптика из BaF₂, BaF₂ линзы, окна на заказ // Алкор Текно-лоджиз [Электронный ресурс]. URL: <https://www.alkor.net/alkorru/BaF21.html> (дата обращения: 20.04.2022).
7. Турыгин И. А. Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1965–1966. В 2 кн.
8. Бегунов Б. Н. Геометрическая оптика. 2-е изд., перераб. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. 210 с.
9. Герцбергер М. Современная геометрическая оптика / пер. с англ. Е. Д. Трифонова. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 487 с.
10. BaF₂ (фторид бария) // ООО «Тидекс» [Электронный ресурс]. URL: http://www.tydexoptics.com/ru/materials/for_transmission_optics/baf2/ (дата обращения: 20.04.2022).

Статья поступила в редакцию 29.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 05.05.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторе

Попов Александр Владимирович – аспирант кафедры квантовой физики и наноэлектроники, ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории функциональной электроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), alexcoretex@gmail.com

References

1. Adomeit U. IR dual-band camera demonstrator and dual-band image fusion techniques. *SENSOR+TEST Conf.: Proc. OPTO 2009 & IRS² 2009*. Wunstorf, AMA, 2009, pp. 221–226. <https://doi.org/10.5162/irs09/i2.3>
2. Cogle O., Rannou C., Forestier B., Jouglia P., Bois P. F., Costard E. M., Manissadjian A., Gohier D. QWIP compact thermal imager: Catherine-XP and its evolution. *Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XXXIII*, 2007, vol. 6542, art. ID: 654234. <https://doi.org/10.1117/12.723720>
3. Vogel H., Schlemmer H. Dual-band infrared camera. *Proc. SPIE. Detectors and Associated Signal Processing II*, 2005, vol. 5964, art. ID: 59640S. <https://doi.org/10.1117/12.625180>
4. Grevcev A. S., Zolotukhin P. A., Il'ichev E. A., Petruhin G. N., Popov A. V., Rychkov G. S. The thermal image receiver realized in the electron-optical converter architecture. *Technical Physics*, 2022, vol. 92, no. 4, pp. 507–519. (In Russian). <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.04.52237.270-21>
5. Grevcev A. S., Zolotukhin P. A., Il'ichev E. A., Petrukhin G. N., Popov A. V., Rychkov G. S. An investigation of reading thermal images processes by a thermal image receiver made in the electron-optical converter architecture. *Technical Physics*, 2022, vol. 92, no. 5, pp. 649–659. (In Russian). <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.05.52368.338-21>
6. Materials – BaF₂. Barium fluoride: BaF₂ windows and BaF₂ lenses. *Alkor Technologies*. Available at: <https://www.alkor.net/BaF2.html> (accessed: 20.04.2022).
7. Turygin I. A. *Applied optics*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1965–1966. In 2 books.
8. Begunov B. N. *Geometric optics*. 2nd ed., rev. Moscow, Moscow State University Publ., 1966. 210 p. (In Russian).
9. Herzberger M. *Modern geometrical optics*. New York, London, Interscience Publ., 1958. xii, 504 p.
10. BaF₂ (Barium Fluoride). *Tydex*. Available at: http://www.tydexoptics.com/materials1/for_transmission_optics/baf2/ (accessed: 20.04.2022).

The article was submitted 29.04.2022; approved after reviewing 05.05.2022; accepted for publication 25.08.2022.

Information about the author

Alexander V. Popov – PhD student of the Quantum Physics and Nanoelectronics Department, Lead Engineer of the Functional Electronics Research Laboratory, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alexcoretex@gmail.com

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Научная статья

УДК 004.312.2:004.032.34

doi:10.24151/1561-5405-2022-27-5-624-634

Самосинхронный троичный сумматор с повышенной сбоеустойчивостью

*Ю. А. Степченков, Ю. Г. Дьяченко, Ю. В. Рождественский,
Н. В. Морозов, А. В. Рождественскене, Д. Ю. Степченков*

*Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук, г. Москва, Россия*

YStepchenkov@ipiran.ru

Аннотация. Самосинхронные (СС) схемы, благодаря СС-кодированию информационных сигналов, двухфазной дисциплине функционирования и запрос-ответному взаимодействию частей СС-схемы, имеют преимущества по сравнению с их синхронными аналогами: корректная работа при любых условиях эксплуатации, отсутствие «дерева» глобальной синхронизации, способность к обнаружению любой константной неисправности и большая устойчивость к кратковременным логическим сбоям. Естественная сбоеустойчивость СС-схем может быть дополнительно повышена с помощью специальных схемотехнических приемов. В работе предложен схемотехнический способ повышения помехоустойчивости одноразрядного троичного СС-сумматора за счет незначительного усложнения индикаторной подсхемы троичного СС-сумматора. Приведены оценки устойчивости вариантов троичных СС-сумматора и умножителя к кратковременным одиночным логическим сбоям. Показано, что увеличение на 28 % аппаратных затрат троичного СС-сумматора обеспечивает увеличение времени бессбойной работы в 4,7 раза как сумматора, так и умножителя на его основе при наличии источников кратковременных однократных логических сбоев.

Ключевые слова: самосинхронная схема, самосинхронное кодирование, сбоеустойчивость, троичный сумматор, умножитель, индикация

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-19-00237).

Для цитирования: Самосинхронный троичный сумматор с повышенной сбоеустойчивостью / Ю. А. Степченков, Ю. Г. Дьяченко, Ю. В. Рождественский и др. // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 624–634. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-624-634>

© Ю. А. Степченков, Ю. Г. Дьяченко, Ю. В. Рождественский, Н. В. Морозов, А. В. Рождественскене, Д. Ю. Степченков, 2022

Original article

Ternary self-timed adder with improved soft error tolerance

*Yu. A. Stepchenkov, Yu. G. Diachenko, Yu. V. Rogdestvenski,
N. V. Morozov, A. V. Rogdestvenskene, D. Yu. Stepchenkov*

*FRC “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

YStepchenkov@ipiran.ru

Abstract. Self-timed (ST) circuits have some advantages compared to their synchronous counterparts. They operate correctly at any application conditions and detect any constant fault. They do not contain a global synchronization tree. Besides, ST circuits are more short-term soft error tolerant. These features are able due to ST coding of information signals, two-phase operation discipline, and request-acknowledge interaction of ST circuit’s parts. The natural soft error tolerance can be further increased by the special circuitry techniques. In this work, the new circuitry method for increasing ST ternary adder’s tolerance to the soft errors due to some complication of its indication subcircuit is proposed. The classical ST indication detects a single spacer state of the information ST signal both in dual-rail and ternary cases. It assumes that the remaining states are only allowed working states and invalid states never appear. However, a soft error can cause invalid state that is illegal in normal conditions. The article presents soft error tolerance estimates for the original and some improved adder circuits. It has been shown that complication of a one-bit adder’s indication leading to 28 % increase in its hardware costs ensures rising of its failure-free operation time by 4.7 times if appeared soft errors are incompatible. ST multiplier based on suggested ST ternary adder demonstrates the same improvement of the soft error tolerance feature.

Keywords: self-timed circuit, self-timed coding, soft error tolerance, ternary adder, multiplier, indication

Funding: the work has been supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-19-00237).

For citation: Stepchenkov Yu. A., Diachenko Yu. G., Rogdestvenski Yu. V., Morozov N. V., Rogdestvenskene A. V., Stepchenkov D. Yu. Ternary self-timed adder with improved soft error tolerance. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 624–634. doi: <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-624-634>

Введение. В цифровых микроэлектронных устройствах возникает проблема помехо- и сбоеустойчивости [1]. На интегральные микросхемы оказывают влияние как внешние воздействия (высокоэнергичные ядерные частицы, космические лучи, сильные электромагнитные импульсы), так и внутренние помехи (шумовые наводки от соседних трасс, по подложке и т. д.). Все это может привести к кратковременному логическому сбою – инверсии состояния цепи схемы, а при высокой энергетике воз-

действия – к отказу. На практике логические сбои возникают на несколько порядков чаще, чем отказы [1]. Сбой является критичным, если искажены результаты обработки информации и произошло его распространение по схеме. Сбой, имеющий локальные последствия, не затрагивающие корректность результата обработки данных, некритичен.

Самосинхронные (СС) схемы имеют преимущества по сравнению с синхронными аналогами благодаря двухфазной дисциплине функционирования, избыточному кодированию информационных сигналов и запрос-ответному взаимодействию [2, 3], в том числе большей естественной устойчивости к сбоям [4]. Использование некоторых схемотехнических методов позволяет дополнительно повысить сбоеустойчивость СС-схем [5]. В комбинационных СС-схемах обычно используется парафазное кодирование [2] в качестве избыточного. При этом парафазный сигнал имеет два рабочих состояния и одно спейсерное. Четвертое возможное состояние считается запрещенным. В арифметических многоразрядных СС-схемах эффективным оказывается троичное СС-кодирование [6], основанное на методологии избыточного кодирования в синхронных схемах [7]. Оно ограничивает длину сквозного переноса в многоразрядном сумматоре тремя соседними разрядами, существенно повышая быстродействие суммирующих схем. Троичный СС-сигнал имеет три рабочих, одно спейсерное и четыре запрещенных состояния. При нормальной (бессбойной) работе запрещенные состояния не должны возникнуть в СС-схеме. Поэтому классическая индикация СС-схем предусматривает дифференциацию спейсерного и всех остальных состояний. Однако логический сбой может привести к появлению запрещенного состояния парафазного или троичного СС-сигнала, которое будет проиндцировано как рабочее. В связи с этим основной способ повышения сбоеустойчивости СС-схем с парафазным кодированием – индикация сбойного состояния парафазного сигнала как спейсера [5]. Реализация аналогичного принципа индикации троичных СС-сигналов также повышает сбоеустойчивость СС-схем с троичным кодированием.

В настоящей работе предлагается способ повышения устойчивости одноразрядного СС-сумматора с троичным СС-кодированием входов и выходов к однократному кратковременному логическому сбою. Дается оценка уровня устойчивости для сумматора и СС-умножителя на его основе, исходя из базовых определений показателей надежности цифровых схем [8].

Троичный самосинхронный сумматор. Основой СС-умножителя из нечувствительного к задержкам блока умножения – сложения – вычитания с плавающей точкой [9] служит одноразрядный сумматор с троичным СС-кодированием входных операндов и выхода суммы. Схема такого сумматора с нулевым спейсером слагаемых и суммы показана на рис. 1. Элементы, обведенные пунктирными овалами, образуют индикаторную подсхему сумматора. Элементы G являются гистерезисными триггерами (G -триггерами) [2]. Здесь (A_p, A_m, A_0) , (B_p, B_m, B_0) – троичные слагаемые; (D_p, D_m, D_0) – троичная сумма; (B_i, B_iB) , (H_i, H_iB) – входные парафазные межразрядные переносы; (B_o, B_oB) , (H_o, H_oB) – выходные парафазные межразрядные переносы; Ind – индикаторный выход. В таблице приведено троичное СС-кодирование с нулевым спейсером. При бессбойной работе выход (D_p, D_m, D_0) может принимать только одно из трех рабочих состояний или спейсерное состояние («000»), индицируемое элементом ЗИЛИ-НЕ.

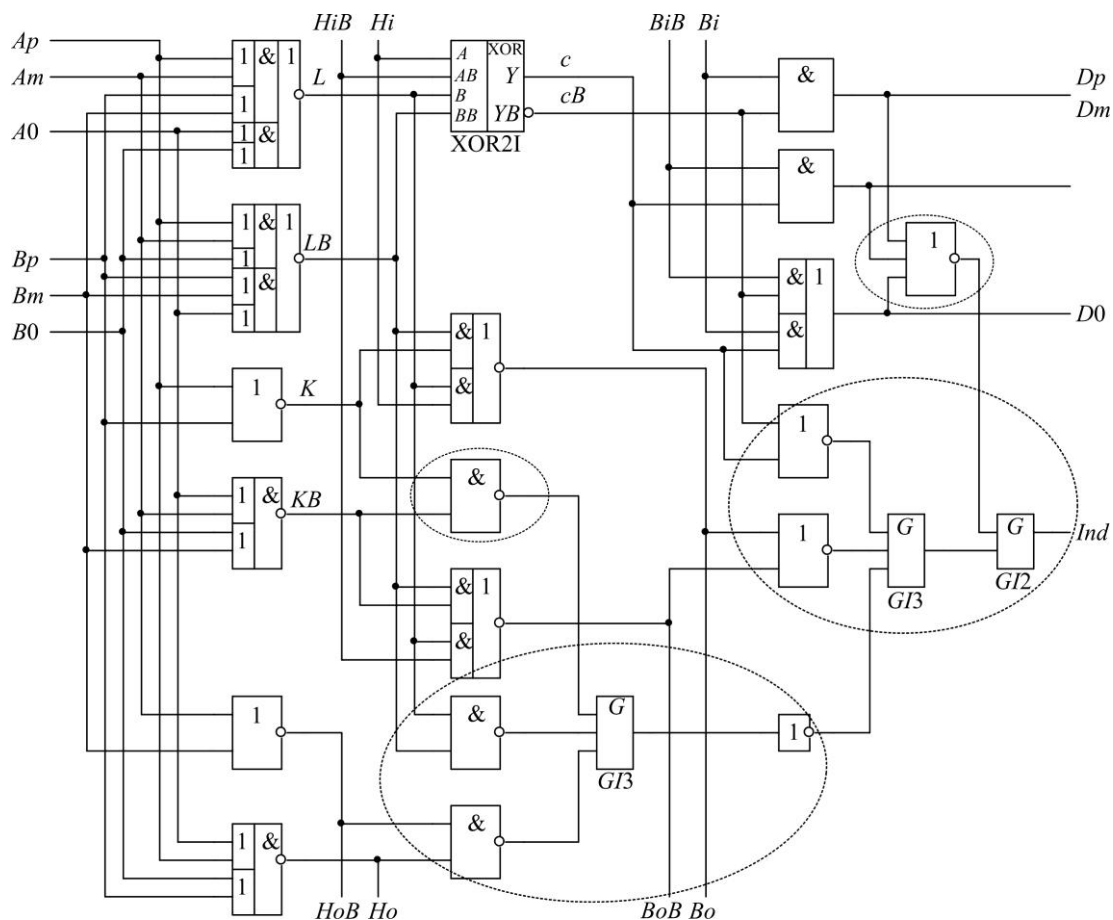


Рис. 1. Троичный одноразрядный СС-сумматор
 Fig. 1. Ternary one-bit self-timed adder

Сбой внутри сумматора может привести к переключению выхода сумматора в любое из восьми возможных значений трехбитовой переменной: спейсер, рабочее состояние, антиспейсер или запрещенное состояние. В первом приближении будем считать, что исходы любого события, связанного с возникновением сбоя, равновероятны. В момент возникновения сбоя выход сумматора может находиться в спейсере или корректном рабочем состоянии с вероятностью 0,5. При соблюдении правил проектирования топологии СС-схем [5] в спейсере критичным может быть некорректное (отличное от ожидаемого) рабочее состояние (с вероятностью 2/8 – два возможных значения из восьми значений трехбитовой переменной) или запрещенное состояние (с вероятностью 4/8). В рабочей фазе критичными будут запрещенные состояния с вероятностью 4/8. Тогда вероятность того, что возникший сбой станет критичным, можно оценить как 5/8 [10].

Уменьшение вероятности критической ошибки достигается индикацией запрещенных состояний троичного выхода как спейсера. Эту проблему решает добавление элемента 2221И-ИЛИ-НЕ в схему индикации (рис. 2). Любое запрещенное состояние выхода (D_p, D_m, D_0) переключит индикаторный выход I в спейсер ($I = 1$).

**Троичное СС-кодирование
 Ternary self-timed coding**

X_p	X_m	X_0	Состояние
1	0	0	+1
0	0	1	0
0	1	0	-1
0	0	0	Спейсер
Остальные комбинации			Запрещено

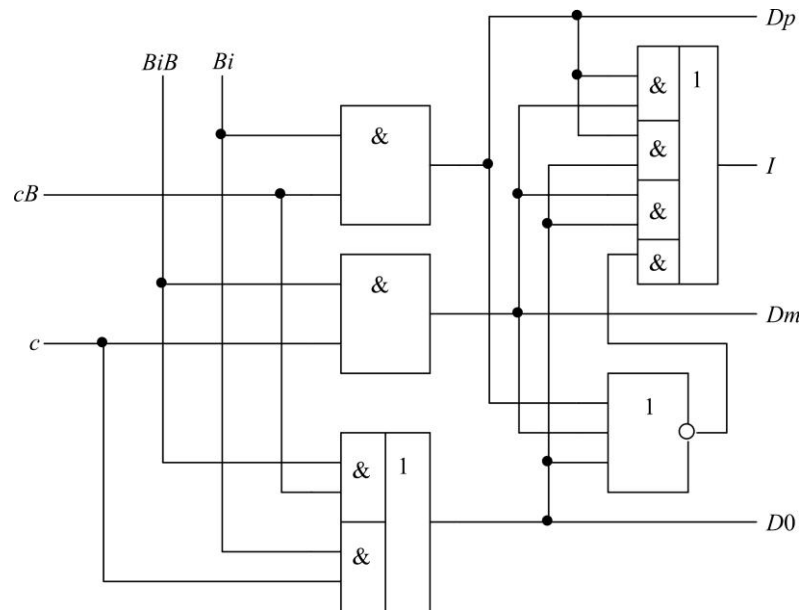


Рис. 2. Сбоеустойчивая индикация троичного выхода суммы с нулевым спейсером
 Fig. 2. Fault-tolerant indication of ternary adder output with null spacer

Оценим количественно улучшение сбоеустойчивости троичного СС-сумматора и умножителя на его основе.

Сбоеустойчивость исходного варианта троичного самосинхронного сумматора. Будем считать сбой некритичным (замаскированным), если он сопровождается спейсерным значением индикаторного выхода *Ind* сумматора. Оценим вероятность возникновения критичного сбоя в сумматоре вследствие следующих событий: сбойное состояние одного из входов, внутренний сбой, сбойное состояние выходов. Для простоты будем считать, что поток однократных кратковременных сбойных событий распределен равномерно по площади кристалла. Однократность означает, что до окончания фактического действия данного сбоя другой сбой в схеме не возникнет. Тогда вероятность сбоя на выходе элемента будет определяться площадью его топологической реализации, а при использовании библиотеки стандартных элементов – числом транзисторов в схеме элемента. Будем также считать, что в заданном технологическом процессе (при заданных топологических нормах) и надлежащем размещении элементов в топологии кристалла сбойное событие затронет только один элемент схемы. Тогда возникновение сбоев будет однократным и кратковременным для данной схемы. Сбой также может иметь место и в индикаторной подсхеме в виде преждевременного переключения индикаторного сигнала. Такой сбой может стать критичным (с вероятностью 0,5) в правильно спроектированной индикаторной подсхеме только в том случае, если он произойдет на выходе ее самого последнего элемента, формирующего общий индикаторный выход СС-схемы. Тогда сбойное подтверждение завершения процесса переключения СС-схемы в очередную фазу работы может вызвать преждевременное изменение ее входов и привести к останову общей СС-схемы.

Индикаторная подсхема считается спроектированной правильно, если входы всех ее элементов имеют небольшой разброс по времени формирования. Индикаторная подсхема строится из *G*-триггеров, выход которых переключается в то состояние, в котором находятся все его входы. Поэтому преждевременное переключение одного из его входов будет замаскировано остальными входами.

Рассмотрим ситуацию, когда при заданной плотности сбойных событий в исходной схеме троичного сумматора (см. рис. 1) на интервале времени T происходит один сбой, который с вероятностью P_0 становится критичным. Тогда можно сказать, что при заданной плотности сбойных событий за время T происходит $N_0 = kTP_0$ критичных сбоев, где k – коэффициент пропорциональности. Очевидно, что в аналогичной схеме большей площади в том же интервале времени и при той же плотности событий возникнет $N = \frac{S}{S_0} N_0$ сбоев, где S и S_0 – площадь топологической реализации сравниваемой и исходной схем сумматора соответственно. Отметим, что в число элементов, в которых может возникнуть критичный сбой, входят все элементы логической части сумматора и выходной G -триггер индикаторной подсхемы, поэтому площадь всего сумматора не учитывает площади индикаторной подсхемы, за исключением ее последнего G -триггера.

Повышение сбоеустойчивости троичного самосинхронного сумматора. Рассмотрим схемотехнические решения, позволяющие распознать большее число сбойных ситуаций и уменьшить число критичных сбоев за то же время T по сравнению с классической индикацией троичного СС-сумматора. Антиспейсерное состояние парафазного сигнала может быть успешно детектировано за счет использования элемента «неравнозначность» XOR или «равнозначность» XNOR в первом каскаде индикаторной подсхемы [5]. Тогда состояние антиспейсера будет индицироваться как спейсер. Аналогичное решение есть и для троичного СС-сигнала.

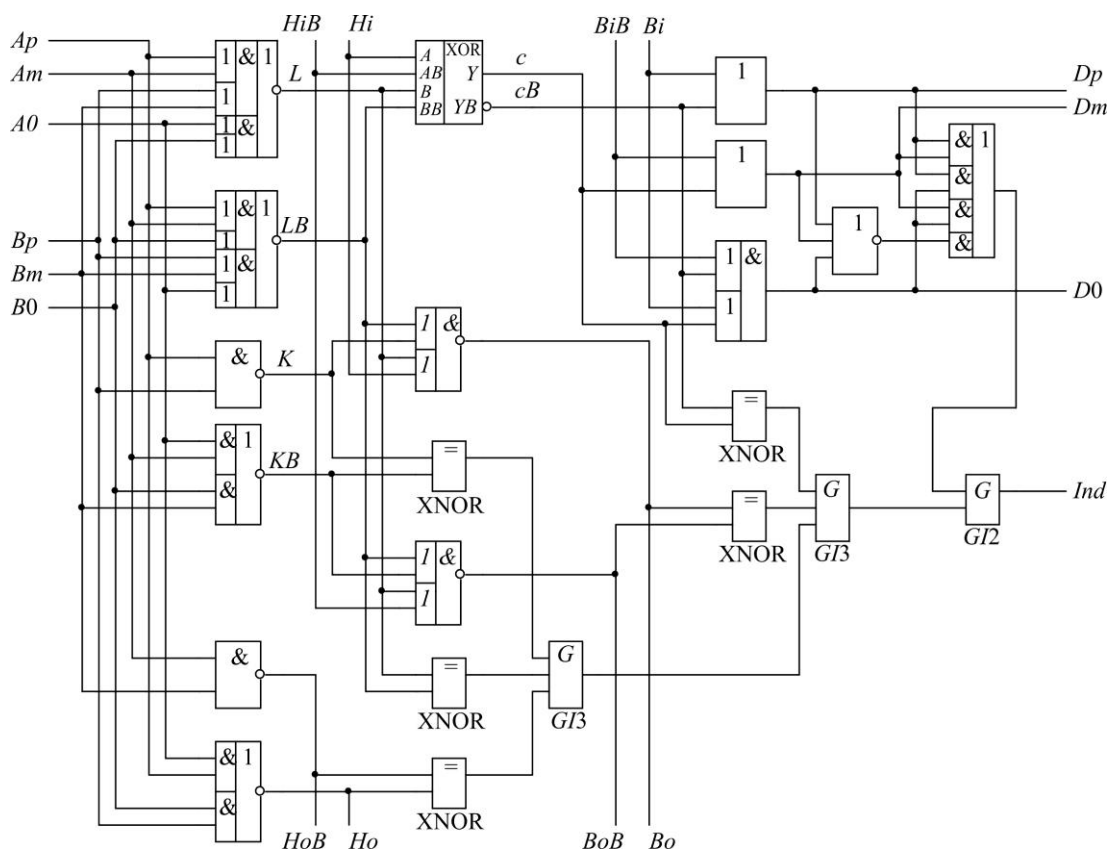


Рис. 3. Сбоеустойчивый троичный одноразрядный СС-сумматор
 Fig. 3. Fault-tolerant ternary one-bit self-timed adder

Реализация одного разряда троичного СС-сумматора представлена на рис. 3. Она обеспечивает маскирование запрещенных состояний, появляющихся на троичных и парафазных информационных выходах, с помощью индикаторного выхода за счет использования элементов XNOR и 2221И-ИЛИ-НЕ. Критичным останется лишь некорректное рабочее состояние в спейсерной фазе. Запрещенные состояния окажутся замаскированными в любой фазе работы СС-схемы. Тогда число сбойных состояний, которые могут привести к критичному сбою в логической части СС-сумматора, уменьшится в 5 раз. Соответственно, сократится и количество критичных сбоев в логической части сумматора за время T (см. рис. 3). Поскольку площадь двухвходового G -триггера в СС-библиотеке стандартных элементов относится к площади элементов логической части (не включающей в себя индикаторную подсхему) как 6 : 49 и схемы на рис. 1 и 3 отличаются только индикаторной подсхемой, то число критичных сбоев в схеме на рис. 3 за время T можно оценить следующим образом:

$$N_1 = \frac{(49/5) + 6}{49 + 6} N_0 = 0,29N_0,$$

так как повышение сложности и увеличение площади топологической реализации сумматора происходит за счет индикаторной подсхемы.

Таким образом, предлагаемая индикация троичного СС-сумматора в 3,4 раза снижает вероятность появления критичных сбоев на его выходах за счет увеличения аппаратных затрат на 16 % (с 170 КМДП-транзисторов до 197).

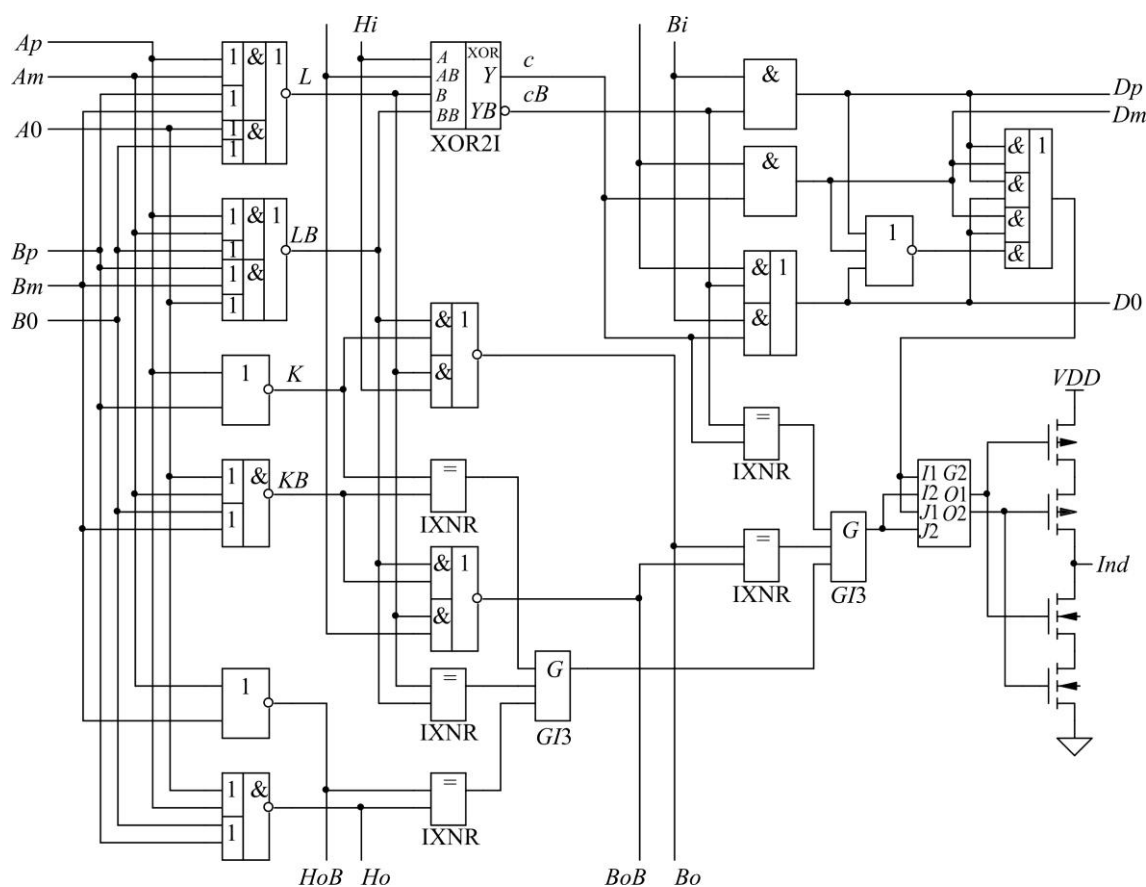


Рис. 4. Сбоеустойчивый троичный СС-сумматор с DICE-подобной индикаторной подсхемой
 Fig. 4. Fault-tolerant ternary self-timed adder with DICE-like indication subcircuit

Сбоеустойчивость троичного СС-сумматора может быть дополнительно повышена за счет защиты от сбоев выходного индикаторного элемента с помощью его DICE-реализации с синфазными входами [11], как показано на рис. 4. В результате число критических сбоев в СС-сумматоре за время T снизится до величины

$$N_1 = \frac{(49/5) + 2}{49 + 6} N_0 \cong 0,21N_0,$$

поскольку критичным становится четырехтранзисторный конвертер вместо двенадцатитранзисторного двухвходового G -триггера на выходе индикаторной подсхемы, что почти в 5 раз меньше, чем для исходного варианта.

Сравним времена бессбойной работы рассмотренных вариантов троичного СС-сумматора. Время бессбойной работы определяется как интервал времени до появления первого сбоя и пропорционально величине T/N исходя из введенных понятий. Тогда отношение времен бессбойной работы для вариантов СС-сумматора, показанных на рис. 1 и 4, будет равно:

$$K_{TA} = \frac{TN_0}{N_1T} = \frac{N_0}{N_1} \cong 4,7.$$

Сложность реализации СС-сумматора, представленного на рис. 4, составляет 217 КМДП-транзисторов. Таким образом, за счет увеличения в 1,28 раза аппаратных затрат предлагаемый вариант троичного СС-сумматора оказывается почти в 5 раз более устойчивым к одиночным логическим сбоям на своих входах и в своих элементах. Аналогичное свойство имеет и СС-умножитель, построенный на троичном СС-сумматоре [9]. Он является в значительной степени однородной структурой, и события, приводящие к возникновению однократного сбоя в его разных элементах, тоже можно считать несовместными. Поэтому вероятность возникновения критического сбоя в умножителе при использовании сбоеустойчивого СС-сумматора уменьшается, а время его бессбойной работы увеличивается в такое же число раз, как и в модифицированном сумматоре, – в 4,7 раза.

Заключение. Обнаружение некорректных состояний парафазных и троичных сигналов и индикация их как спейсера, а также использование DICE-подобного G -триггера на выходе индикаторной подсхемы обеспечивают повышение сбоеустойчивости троичного СС-сумматора. За счет повышения на 28 % сложности реализации одноразрядного троичного СС-сумматора и умножителя на его основе их устойчивость к кратковременным одиночным логическим сбоям и время бессбойной работы увеличиваются в 4,7 раза.

Предложенные методы, однако, не гарантируют защиты от сбойных некорректных рабочих состояний в троичном сумматоре. Поэтому дальнейшая работа будет направлена на поиск более эффективных схемотехнических решений, обеспечивающих повышение устойчивости СС-схем к одиночным логическим сбоям.

Литература

1. Викторова В. С., Лубков Н. В., Степанянц А. С. Анализ надежности отказоустойчивых управляющих вычислительных систем. М.: ИПУ РАН, 2016. 119 с.
2. Kishinevsky M., Kondratyev A., Taubin A., Varshavsky V. Concurrent hardware: Theory and practice of self-timed design. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 1994. 388 p.

3. *Zakharov V., Stepchenkov Yu., Diachenko Yu., Rogdestvenski Yu.* Self-timed circuitry retrospective // 2020 International Conference Engineering Technologies and Computer Science (EnT). Moscow: IEEE, 2020. P. 63–69. <https://doi.org/10.1109/EnT48576.2020.00018>
4. Fault-tolerance of self-timed circuits / *Yu. A. Stepchenkov, A. N. Kamenskih, Yu. G. Diachenko et al.* // 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). Leeds: IEEE, 2019. P. 41–44. <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8770047>
5. Improvement of the natural self-timed circuit tolerance to short-term soft errors / *Yu. A. Stepchenkov, A. N. Kamenskih, Yu. G. Diachenko et al.* // Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J. 2020. Vol. 5. Iss. 2. P. 44–56. <https://doi.org/10.25046/aj050206>
6. Умножитель с накоплением: методологические аспекты / *И. А. Соколов, Ю. А. Степченков, С. Г. Бобков и др.* // Системы и средства информатики. 2014. Т. 24. № 3. С. 44–62. <https://doi.org/10.14357/08696527140304>
7. An 8.8-ns 54/spl times/54-bit multiplier with high speed redundant binary architecture / *H. Makino, Y. Nakase, H. Suzuki et al.* // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1996. Vol. 31. No. 6. P. 773–783. <https://doi.org/10.1109/4.509863>
8. *Dubrova E.* Fault-tolerant design. New York: Springer, 2013. XV, 185 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2113-9>
9. Energy efficient speed-independent 64-bit fused multiply-add unit / *Yu. Stepchenkov, D. Stepchenkov, Yu. Rogdestvenski et al.* // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2019. P. 1709–1714. <https://doi.org/10.1109/EIconRus.2019.8657207>
10. Повышение сбоеустойчивости самосинхронного троичного умножителя / *Ю. А. Степченков, Ю. В. Рождественский, Ю. Г. Дьяченко и др.* // Проблемы разработки перспективных микро- и нано-электронных систем (МЭС). 2021. № 2. С. 70–76. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-70-76>
11. Increasing self-timed circuit soft error tolerance / *I. Sokolov, Yu. Stepchenkov, Yu. Diachenko et al.* // 2020 IEEE EastWest Design & Test Symposium (EWDTS). Varna: IEEE, 2020. P. 450–454. <https://doi.org/10.1109/EWDTS50664.2020.9224705>

Статья поступила в редакцию 04.02.2022 г.; одобрена после рецензирования 11.02.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Степченков Юрий Афанасьевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2), YStepchenkov@ipiran.ru

Дьяченко Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2), YDiachenko@ipiran.ru

Рождественский Юрий Владимирович – ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2), YRogdest@ipiran.ru

Морозов Николай Викторович – старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2), NMorozov@ipiran.ru

Рождественскене Аста Винченцо – ведущий программист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2), ARogdest@ipiran.ru

Степченко Дмитрий Юрьевич – старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, стр. 2), Stepchenkov@mail.ru

References

1. Viktorova V. S., Lubkov N. V., Stepanyants A. S. *Reliability analysis of fault-tolerant control computing systems*. Moscow, Institute of Control Sciences of RAS, 2016. 119 p. (In Russian).
2. Kishinevsky M., Kondratyev A., Taubin A., Varshavsky V. *Concurrent hardware: Theory and practice of self-timed design*. Hoboken, NJ, Wiley-Blackwell, 1994. 388 p.
3. Zakharov V., Stepchenkov Yu., Diachenko Yu., Rogdestvenski Yu. Self-timed circuitry retrospective. *2020 International Conference Engineering Technologies and Computer Science (EnT)*. Moscow, IEEE, 2020, pp. 63–69. <https://doi.org/10.1109/EnT48576.2020.00018>
4. Stepchenkov Yu. A., Kamenskih A. N., Diachenko Yu. G., Rogdestvenski Yu. V., Diachenko D. Yu. Fault-tolerance of self-timed circuits. *2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. Leeds, IEEE, 2019, pp. 41–44. <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8770047>
5. Stepchenkov Yu. A., Kamenskih A. N., Diachenko Yu. G., Rogdestvenski Yu. V., Diachenko D. Yu. Improvement of the natural self-timed circuit tolerance to short-term soft errors. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, 2020, vol. 5, iss. 2, pp. 44–56. <https://doi.org/10.25046/aj050206>
6. Sokolov I. A., Stepchenkov Yu. A., Bobkov S. G., Rogdestvenski Yu. V., Diachenko Yu. G. Fused multiply-add: methodological aspects. *Sistemy i sredstva informatiki = Systems and Means of Informatics*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 44–62. <https://doi.org/10.14357/08696527140304>
7. Makino H., Nakase Y., Suzuki H., Morinaka H., Shinohara H., Mashiko K. An 8.8-ns 54/spl times/54-bit multiplier with high speed redundant binary architecture. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1996, vol. 31, no. 6, pp. 773–783. <https://doi.org/10.1109/4.509863>
8. Dubrova E. *Fault-tolerant design*. New York, Springer, 2013. xv, 185 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2113-9>
9. Stepchenkov Yu., Stepchenkov D., Rogdestvenski Yu., Shikunov Yu., Diachenko Yu. Energy efficient speed-independent 64-bit fused multiply-add unit. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2019, pp. 1709–1714. <https://doi.org/10.1109/EIconRus.2019.8657207>
10. Stepchenkov Yu. A., Rogdestvenski Yu. V., Diachenko Yu. G., Morozov N. V., Stepchenkov D. Yu., Rogdestvenski A. V. Improvement of ternary self-timed multiplier soft error tolerance. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2021, no. 2, pp. 70–76. (In Russian). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-70-76>
11. Sokolov I., Stepchenkov Yu., Diachenko Yu., Rogdestvenski Yu., Diachenko D. Increasing self-timed circuit soft error tolerance. *2020 IEEE EastWest Design & Test Symposium (EWDTS)*. Varna, IEEE, 2020, pp. 450–454. <https://doi.org/10.1109/EWDTS50664.2020.9224705>

The article was submitted 04.02.2022; approved after reviewing 11.02.2022;
accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Yuri A. Stepchenkov – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of Department of the Institute of Computer Science Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119333, Moscow, Vavilov st., 44, bld. 2), YStepchenkov@ipiran.ru

Yuri G. Diachenko – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the Institute of Computer Science Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119333, Moscow, Vavilov st., 44, bld. 2), YDiachenko@ipiran.ru

Yuri V. Rogdestvenski – Leading Researcher of the Institute of Computer Science Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119333, Moscow, Vavilov st., 44, bld. 2), YRogdest@ipiran.ru

Nikolay V. Morozov – Senior Scientific Researcher of the Institute of Computer Science Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119333, Moscow, Vavilov st., 44, bld. 2), NMorozov@ipiran.ru

Asta V. Rogdestvenskene – Lead Programmer of the Institute of Computer Science Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119333, Moscow, Vavilov st., 44, bld. 2), ARogdest@ipiran.ru

Dmitri Yu. Stepchenkov – Senior Scientific Researcher of the Institute of Computer Science Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119333, Moscow, Vavilov st., 44, bld. 2), Stepchenkov@mail.ru



Издательско-полиграфический комплекс
Национального исследовательского университета «МИЭТ»
информирует



Вышло в свет учебное пособие

Ермаков И.В., Ильин С.А., Крупкина Т.Ю., Лосев В.В., Недашковский Л.В.
Топологическое проектирование систем на кристалле: учеб. пособие.
М.: МИЭТ, 2022. 96 с.: ил.



Содержит методические материалы к семинарским занятиям по дисциплине «Топологическое проектирование систем на кристалле». Знакомит с маршрутом проектирования топологии систем на кристалле с помощью системы автоматизированного проектирования Cadence Virtuoso.

Для студентов, обучающихся по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника» программы магистратуры «Проектирование приборов и систем». Может быть полезно слушателям курсов повышения квалификации и специалистам, занимающимся проектированием топологии интегральных схем.

ISBN 978-5-7256-0984-4

Моделирование широкополосного усилителя на печатной плате с диэлектриком повышенной проводимости

Д. А. Абрамешин, Е. Д. Пожидаев, В. С. Саенко, С. Р. Тумковский

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа
экономики», г. Москва, Россия*

Dabrameshin@hse.ru

Аннотация. На космические аппараты воздействуют электроны космической плазмы, что обуславливает электризацию их диэлектрических материалов. В результате возникают электростатические разряды, приводящие к отказам в работе бортовой радиоэлектроники, уменьшающим сроки активного существования космических аппаратов. Один из перспективных методов защиты от воздействия электростатических разрядов – применение композитных полимерных диэлектриков с повышенной проводимостью. В работе изложены результаты моделирования характеристик широкополосного усилителя, выполненного на печатной плате с использованием композитного диэлектрика повышенной проводимости. В модель протекающих электрических процессов добавлены сопротивления, характеризующие токовые утечки с узлов схемы на нулевой проводник, обусловленные уменьшением удельного объемного сопротивления материала печатной платы. Проведены компьютерное моделирование широкополосного усилителя и экспериментальное исследование его рабочих характеристик в полосе рабочих частот 0,5–70 МГц. Показано, что изменение полосы пропускания и коэффициента усиления происходит только тогда, когда проводимость становится выше $6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Результаты экспериментального исследования широкополосного усилителя показали, что предложенная модель учета удельного объемного сопротивления материала печатной платы адекватно описывает его характеристики. При проводимости $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ исключается возникновение электростатических разрядов, что указывает на возможность защиты широкополосных усилителей в составе радиоэлектронных устройств космических аппаратов от электризации при использовании композитных диэлектриков повышенной проводимости.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, радиоэлектронные устройства космических аппаратов, радиационная электризация, электростатические разряды, композитные полимерные диэлектрики повышенной проводимости

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Для цитирования: Абрамешин Д. А., Пожидаев Е. Д., Саенко В. С., Тумковский С. Р. Моделирование широкополосного усилителя на печатной плате с диэлектриком повышенной проводимости // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 635–644. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-635-644>

Original article

Modeling of a broadband amplifier made on a printed circuit board with an increased conductivity dielectric

D. A. Abrameshin, E. D. Pozhidaev, V. S. Saenko, S. R. Tumkovskiy

National Research University “Higher School of Economics”, Moscow,
Russia

Dabrameshin@hse.ru

Abstract. The electrons of the cosmic plasma act on spacecraft, causing the electrification of their dielectric materials. The result of the accumulation of charge is the occurrence of electrostatic discharges leading to failures in the operation of on-board radio electronics, and this phenomenon significantly reduces the duration of the active existence of spacecraft. One of the promising methods of protection against the effects of electrostatic discharges is the use of composite polymer dielectrics with increased conductivity. In this work, the results of modeling the characteristics of a broadband amplifier made on a printed circuit board using such a composite dielectric are presented. The resistances have been added to the model of electrical processes occurring in this amplifier, characterizing current leaks from the circuit nodes to the zero conductor, due to a decrease in the specific volume resistance of the printed circuit board material. A computer simulation of a broadband amplifier and an experimental study of its performance characteristics in the operating frequency band of 0.5–70 MHz were carried out. It was demonstrated that the change in bandwidth and gain occurs only when the conductivity becomes higher than $6 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. The results of an experimental study of a broadband amplifier have shown that the proposed model of accounting for the specific volume resistance of the printed circuit board material adequately describes its characteristics. The fact that even with a conductivity of $10^{-9} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, the possibility of electrostatic discharges is excluded indicates the possibility of protecting broadband amplifiers as part of radio electronic devices of spacecraft from electrification when using composite dielectrics with increased conductivity.

Keywords: computer modeling, spacecraft radio electronic devices, radiation electrization, electrostatic discharges, composite polymer dielectrics with increased conductivity

Finding: the work has been supported by the HSE Fundamental Research Program.

For citation: Abrameshin D. A., Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Tumkovskiy S. R. Modeling of a broadband amplifier made on a printed circuit board with an increased conductivity dielectric. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 635–644. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-635-644>

Введение. Электризация диэлектрических материалов [1–3] приводит к сбоям в работе и катастрофическим отказам радиоэлектронных средств, находящихся на борту космического аппарата. Существует ряд достаточно эффективных методов защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия электростатических разрядов (ЭСР) [4], когда она находится на внешней поверхности космического аппарата. Но когда электризации подвергаются диэлектрики радиоэлектроники, находящейся внутри космиче-

ского аппарата, за счет проникающего высокоэнергетического электронного излучения, защитить ее от разрядов из объема пластмассового корпуса непосредственно на полупроводниковый кристалл очень трудно [5]. В этом случае электризацию обычно называют внутренней и для защиты от нее предлагается использовать композитные полимерные диэлектрики повышенной проводимости. Такие композиты получают путем добавления в полимер определенного количества проводящего материала (нанотрубок, графитированной сажи, металлического порошка) [6]. Тем самым увеличивается темновая проводимость полимера, что значительно снижает максвелловское время релаксации накапливаемого заряда и, таким образом, исключается физическая возможность возникновения ЭСР. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования показали, что увеличение удельной объемной проводимости диэлектриков до значений порядка $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ исключает возможность возникновения ЭСР.

Создание условий, при которых не будут возникать электростатические разряды, – важный этап при разработке радиоэлектронной аппаратуры космического назначения. Также необходимо убедиться, что увеличение проводимости композитного диэлектрика не приводит к изменению рабочих характеристик радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата. Выполнены исследования возможности увеличения удельной объемной проводимости диэлектриков печатных плат изделий космической техники до $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ [7]. Расчеты, проведенные с помощью компьютерной программы LT-Spice, и результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность применения диэлектриков повышенной проводимости в печатных платах с печатными проводниками обычных размеров.

В работе [8] в печатной плате низкочастотного мультивибратора использован композитный диэлектрик повышенной проводимости. Установлено, что его рабочие характеристики начинали изменяться только при удельной объемной проводимости диэлектрика $\gamma = 1,55 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Это подтвердило возможность использования в печатных платах диэлектриков повышенной проводимостью для защиты мультивибраторов от воздействия ЭСР. Следует отметить, что мультивибратор является типичным устройством цифровой техники, достаточно помехоустойчивой, так как соответствующие устройства имеют относительно высокий уровень сигнала. Более чувствительными и критичными к помехам являются аналоговые схемы, применяющиеся, например, в навигационных системах. В качестве объекта исследования в работе [9] выбрано типовое аналоговое устройство, работающее в приемно-передающей аппаратуре космического аппарата, – гетеродин. Показано, что в диапазоне частот 9–37 МГц рабочие характеристики гетеродина меняются только тогда, когда удельная объемная проводимость начинает превышать $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

В настоящей работе методом наихудшего случая получен разброс амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) широкополосного усилителя, изготовленного на печатной плате, с композитным диэлектриком повышенной проводимостью.

Компьютерное моделирование характеристик широкополосного усилителя на печатной плате с композитным диэлектриком повышенной проводимости. Исследование проводили на примере широкополосного усилителя с полосой пропускания от 0,5 до 70 МГц, использовали схему (рис. 1) с перекрестными обратными связями [10]. Основными характеристиками широкополосного усилителя являются: АЧХ; фазочастотная характеристика; ширина полосы пропускания; коэффициент усиления в полосе пропускания. Конструктивно широкополосный усилитель выполнен в виде печатного узла (рис. 2).

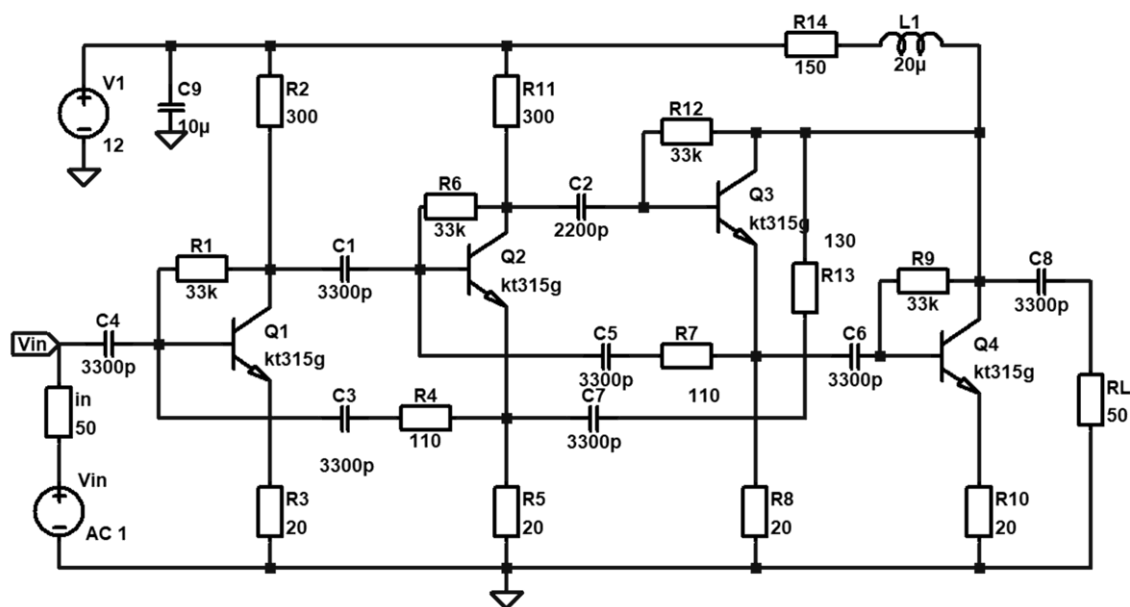


Рис. 1. Электрическая схема широкополосного усилителя
 Fig. 1. Electrical diagram of a broadband amplifier

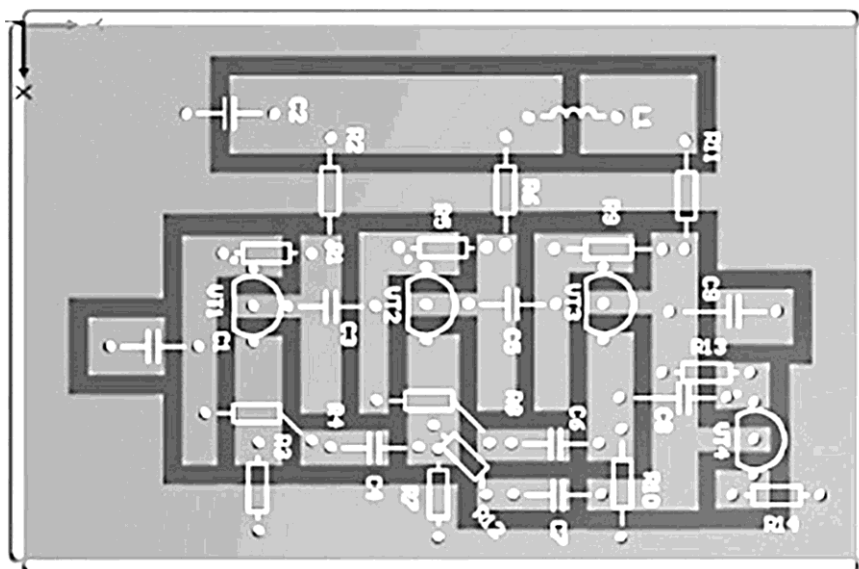


Рис. 2. Конструкция широкополосного усилителя
 Fig. 2. Broadband amplifier design

Для устранения паразитных резонансов трассировка печатных проводников выполнена следующим образом: нижняя сторона печатной платы представляет собой сплошную металлизацию, которая покрывает всю ее площадь, а в верхней части двусторонней платы располагаются печатные проводники. В процессе исследования проведены компьютерное моделирование и экспериментальное определение АЧХ рассматриваемого широкополосного усилителя с композитным полимерным диэлектриком в печатном узле. Соответствующая схемотехническая модель представлена на рис. 3. Резисто-

ры, моделирующие утечку на проводник нулевого потенциала, на рис. 3 обозначены RLD. В модели принято, что все сопротивления утечек между узлами одинаковые. Это позволяет оценить удельную объемную проводимость композитного полимерного диэлектрика, при которой начинает наблюдаться изменение рабочих характеристик усилителя.

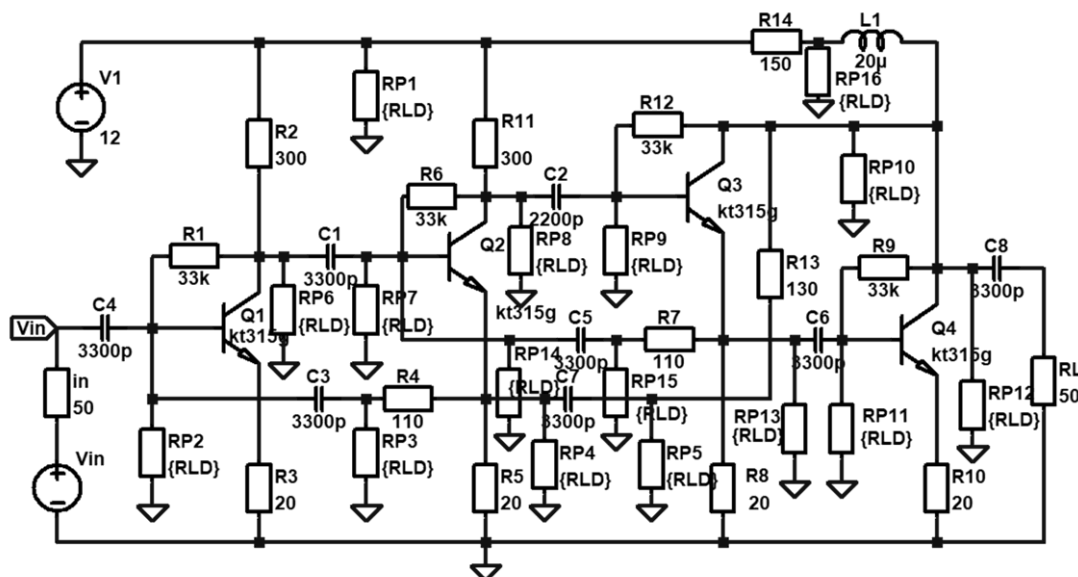


Рис. 3. Электрическая схема широкополосного усилителя с утечками на проводник нулевого потенциала (RLD – соответствующие сопротивления утечки)

Fig. 3. Electrical diagram of a broadband amplifier with leaks on a conductor of zero potential (the corresponding leakage resistances are designated as RLD)

Результаты моделирования АЧХ при изменении сопротивления каналов утечки на нулевой проводник в диапазоне 200 МОм – 4 кОм приведены на рис. 4. Установлено, что АЧХ в диапазоне утечек 200 МОм – 7 кОм практически не изменяются. Изменения АЧХ начинаются, когда сопротивление утечки становится равным 7 кОм. На рис. 5 представлены результаты расчета коэффициента усиления на частоте 20 МГц. Из графика видно, что пока сопротивление утечки превышает 7 кОм, коэффициент усиления остается неизменным и начинает резко уменьшаться, когда становится меньше этого значения.

Оценим удельную объемную проводимость диэлектрика печатной платы с полимерным композитом, который создает сопротивление утечки между выбранными узлами схемы и нулевым потенциалом R_m , равное 7 кОм. При трассировке печатных проводников, которая показана на рис. 2, утечки тока при использовании композитного диэлектрика с повышенной проводимостью будут иметь место между проводником на верхней стороне печатной платы и нижней заземленной плоскостью металлизации. Если задать прямоугольную форму печатного проводника, то соответствующая паразитная емкость, рассчитанная в соответствии с [11, 12], будет составлять 8,4 пФ. Тогда с учетом минимального сопротивления утечки $R_m = 7 \cdot 10^3$ Ом, при котором начинают меняться характеристики широкополосного усилителя и $C_m = 8,4$ пФ, удельную объемную проводимость полимерного диэлектрика можно найти по формуле

$$\gamma_m = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{R_m C_m} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,5}{7 \cdot 10^3 \cdot 8,4 \cdot 10^{-12}} = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}.$$

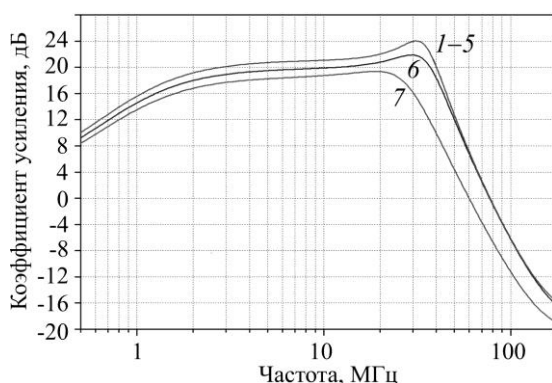


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики широкополосного усилителя с сопротивлением утечки на нулевой потенциал: 1 – 200 МОм; 2 – 100 МОм; 3 – 50 МОм; 4 – 20 МОм; 5 – 10 МОм; 6 – 7 кОм; 7 – 4 кОм
 Fig. 4. Amplitude-frequency characteristics of a broadband amplifier with leakage resistance at zero potential: 1 – 200 MΩ; 2 – 100 MΩ; 3 – 50 MΩ; 4 – 20 MΩ; 5 – 10 MΩ; 6 – 7 kΩ; 7 – 4 kΩ

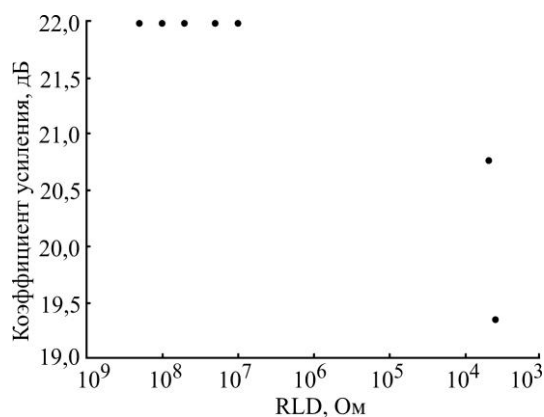


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от сопротивления утечки между узлами схемы и нулевым проводником на частоте 20 МГц
 Fig. 5. The dependence of the gain on the leakage resistance between the circuit nodes and the zero conductor at a frequency of 20 MHz

Основные рабочие характеристики исследуемого усилителя – полоса пропускания и коэффициент усиления – начинают изменяться, когда удельная объемная проводимость становится больше $6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. В то же время в условиях космоса отсутствие электростатических разрядов наблюдается при проводимости диэлектрика $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Таким образом, использование печатной платы с диэлектриками повышенной удельной проводимости порядка $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ гарантированно обеспечивает неизменность рабочих характеристик широкополосного усилителя и исключает возможность возникновения ЭСР.

Экспериментальная проверка характеристик широкополосного усилителя на печатной плате с диэлектриком повышенной проводимости. Для экспериментального подтверждения результатов моделирования исследуемого усилителя проведено его макетирование. На рис. 6 приведена печатная плата усилителя из фольгированного стеклотекстолита размером 70×45 мм и толщиной 3 мм. На одной стороне печатной



Рис. 6. Печатная плата широкополосного усилителя
 Fig. 6. Wideband amplifier circuit board

платы сделаны широкие проводящие дорожки, другая сторона полностью металлизирована, за исключением небольших областей вокруг отверстий, через которые проходят выводы активных и пассивных элементов.

Макетирование проводили следующим образом:

1. По периметру со стороны печатных проводников припаивали медную проволоку, имеющую диаметр, равный толщине подложки.

2. Печатную плату помещали в печь и нагревали до температуры $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Одновременно готовили композитный полимерный материал путем добавления определенного процента сажи и равномерного его распределения с использованием магнитной мешалки. Удельная объемная проводимость полученного композитного полимерного материала составляла $6 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и в соответствии с разработанным критерием обеспечивала отсутствие ЭСР.

4. На нагретую печатную плату наносили слой композита с повышенной проводимостью, затем печатную плату помещали в ультразвуковую ванну с частотой 38 кГц, чтобы предотвратить агрегирование сажи в макродиполи и устранить эффект резкого увеличения диэлектрической постоянной композита. После остывания конструкции обеспечивался электрический контакт между пластинкой и бортиком медной проволоки.

Изготовленную печатную плату подключали к источнику питания, на вход схемы от генератора АКПП-3417 подавали синусоидальное напряжение с амплитудой 0,2 В и частотами 1, 2, 5, 10, 20, 50 и 70 МГц. Информацию снимали с двухлучевого цифрового осциллографа Tektronix 3012В, подключенного к выходу усилителя.

Сравнение результатов, полученных путем моделирования АЧХ широкополосного усилителя с использованием печатной платы на композите с повышенной проводимостью, с результатами экспериментального измерения коэффициентов усиления макета широкополосного усилителя на частотах 1, 2, 5, 10 и 20 МГц представлено на рис. 7. На рисунке приведен результат моделирования наихудшего случая АЧХ при сопротивлении утечки, составляющей 600 МОм, что соответствует удельной объемной проводимости композита $6 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Как видно из рисунка, экспериментальные значения коэффициента усиления лежат практически в середине диапазона, полученного методом наихудшего случая с учетом $\pm 10\%$ разброса номиналов элементов широкополосного усилителя.

Таким образом, рабочие характеристики широкополосного усилителя, полученные в результате моделирования, и характеристики его экспериментально изготовленного макета хорошо согласуются.

Заключение. Разработанная модель широкополосного усилителя отличается от традиционной введением в схему дополнительных сопротивлений, характеризующих токовые утечки между узлами устройства и нулевым проводником. Токовые утечки вызваны уменьшением удельного объемного сопротивления печатной платы из-за замены обычного полимерного диэлектрика на композитный полимерный диэлектрик с повышенной проводимостью для исключения ЭСР.

Компьютерное моделирование рабочих характеристик широкополосного усилителя в полосе частот 0,5–70 МГц, печатная плата которого содержит композитный диэлектрик повышенной проводимости, позволило установить, что их изменение начинается только после того, как удельная объемная проводимость материала печатной платы

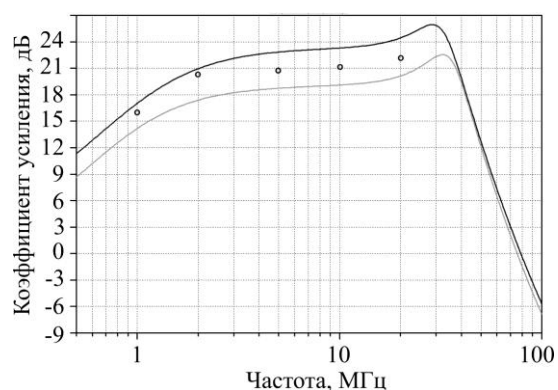


Рис. 7. Результаты расчета наихудшего случая АЧХ широкополосного усилителя, при сопротивлении утечки 600 МОм (сплошные линии) и экспериментальные значения коэффициента усиления на частотах 1, 2, 5, 10 и 20 МГц (○)
 Fig. 7. Calculation results of the worst case frequency response of a broadband amplifier with a leakage resistance of 600 MΩ (solid lines) and experimental values at frequencies of 1, 2, 5, 10 and 20 MHz (○)

достигнет $6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Исследование рабочих характеристик экспериментально созданного макета такого усилителя подтвердило адекватность предложенной модели.

Композитные полимерные диэлектрики повышенной проводимости могут успешно использоваться в широкополосных усилителях радиоэлектронных устройств космического применения, защищая их от поражающего действия внутренней электризации.

Литература

1. **Frederickson A. R.** Electric discharge pulses in irradiated solid dielectrics in space // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1983. Vol. EI-18. Iss. 3. P. 337–349. <https://doi.org/10.1109/TEI.1983.298623>
2. **Акишин А. И.** Электроразрядные сбои в космических аппаратах в зоне космических излучений // Перспективные материалы. 2010. № 2. С. 27–32.
3. **Catani J.-P., Payan D.** Electrostatic behavior of materials in a charging space environment // Proc. 9th Int. Symp. on Materials in a Space Environment. Noordwijk: ESA Publ. Division, 2003. P. 3–16.
4. **Purvis C. K., Garrett H. B., Whittlesey A. C., Stevens N. J.** Design guidelines for assessing and controlling spacecraft charging effects: Technical paper 2361. Cleveland, OH: NASA, 1984. 47 p.
5. **Белик Г. А., Абрамешин А. Е., Саенко В. С.** Внутренняя электризация бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов // Технологии электромагнитной совместимости. 2012. № 3 (42). С. 5–16.
6. Повышение стойкости космических аппаратов к воздействию поражающих факторов электризации / **Е. Д. Пожидаев, В. С. Саенко, И. А. Смирнов и др.** // Космонавтика и ракетостроение. 2003. № 1 (30). С. 32–35.
7. **Saenko V., Tyutnev A., Abrameshin A., Belik G.** Computer simulations and experimental verification of the nanoconductivity concept for the spacecraft electronics // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. Vol. 45. Iss. 8. P. 1843–1846. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2688180>
8. **Абрамешин А. Е., Белик Г. А., Саенко В. С.** Исключение внутренней электризации бортовой аппаратуры космических аппаратов путем применения нанопроводящих диэлектриков // Труды XXII Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 9–14 июля 2012 г.) / под общ. ред. Г. Г. Бондаренко. М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2012. С. 544–550.
9. **Abrameshin D. A., Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Tumkovskiy S. R.** Computer simulations and experimental investigation of the heterodyne employing printed circuit board with an increased resistance to electrostatic discharges // IEEE Transactions on Plasma Science. 2019. Vol. 47. Iss. 8. P. 3653–3657. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2915522>
10. **Streetman B. G., Vanerjee S.** Solid state electronic devices. Hoboken, NJ: Prentice Hall, 2000. 558 p.
11. **Кечиев Л. Н.** Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ИДТ, 2007. 615 с.
12. **Кечиев Л. Н.** Практическое руководство по конструированию многослойных печатных плат: инженерное пособие. М.: Грифон, 2021. 416 с.

Статья поступила в редакцию 04.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 05.06.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Абрамешин Дмитрий Андреевич – аспирант департамента электронной инженерии, ведущий инженер учебно-исследовательской лаборатории функциональной безопасности космических аппаратов и систем Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11), Dabrameshin@hse.ru

Пожидаев Евгений Дмитриевич – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11), EPozhidaev@hse.ru

Саенко Владимир Степанович – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11), VSaenko@hse.ru

Тумковский Сергей Ростиславович – доктор технических наук, доцент департамента компьютерной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 109028, г. Москва, Покровский бульвар, 11), STumkovskiy@hse.ru

References

1. Frederickson A. R. Electric discharge pulses in irradiated solid dielectrics in space. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1983, vol. EI-18, iss. 3, pp. 337–349. <https://doi.org/10.1109/TEI.1983.298623>
2. Akishin A. I. Charging anomalies in spacecrafts under space radiation. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 2, pp. 27–32. (In Russian).
3. Catani J.-P., Payan D. Electrostatic behavior of materials in a charging space environment. *Proc. 9th Int. Symp. on Materials in a Space Environment*. Noordwijk, ESA Publ. Division, 2003, pp. 3–16.
4. Purvis C. K., Garrett H. B., Whittlesey A. C., Stevens N. J. *Design guidelines for assessing and controlling spacecraft charging effects*, technical paper 2361. Cleveland, OH, NASA, 1984. 47 p.
5. Belik G. A., Abrameshin A. E., Saenko V. S. Internal charging of space vehicles' airborne electronic equipment. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti*, 2012, no. 3 (42), pp. 5–16. (In Russian).
6. Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Smirnov I. A., Babkin G. V., Tyutnev A. P., Floridov A. A., Doronin A. N. Enhancement of spacecraft resistance to effects of electrification affects. *Kosmonavtika i raketostroyeniye = Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2003, no. 1 (30), pp. 32–35. (In Russian).
7. Saenko V., Tyutnev A., Abrameshin A., Belik G. Computer simulations and experimental verification of the nanoconductivity concept for the spacecraft electronics. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, iss. 8, pp. 1843–1846. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2688180>
8. Abrameshin A. E., Belik G. A., Saenko V. S. Space equipment internal charging elimination by the use of nanoconducting dielectrics. *Trudy XXII Mezhdunarodnoy konferentsii "Radiatsionnaya fizika tverdogo tela" (Sevastopol', 9–14 iyulya 2012 g.)*. Moscow, FSBI RIAMT Publ., 2012, pp. 544–550. (In Russian).
9. Abrameshin D. A., Pozhidaev E. D., Saenko V. S., Tumkovskiy S. R. Computer simulations and experimental investigation of the heterodyne employing printed circuit board with an increased resistance to electrostatic discharges. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, iss. 8, pp. 3653–3657. <https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2915522>
10. Streetman B. G., Banerjee S. *Solid state electronic devices*. Hoboken, NJ, Prentice Hall, 2000. 558 p.
11. Kechiev L. N. *Printed circuit board design for high-speed digital equipment*. Moscow, IDT Publ., 2007. 615 p. (In Russian).
12. Kechiev L. N. *Practical book of multilayer printed circuit board designing*, engineer guide. Moscow, Grifon Publ., 2021. 416 p. (In Russian).

The article was submitted 04.05.2022; approved after reviewing 05.06.2022;
accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Dmitry A. Abrameshin – PhD student of the Electronic Engineering Department, Leading Engineer of the Educational and Research Laboratory of Functional Safety of Spacecraft and Systems, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 109028, Moscow, Pokrovsky bulvar, 11), Dabrameshin@hse.ru

Evgeny D. Pozhidaev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 109028, Moscow, Pokrovsky bulvar, 11), EPozhidaev@hse.ru

Vladimir S. Saenko – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronic Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 109028, Moscow, Pokrovsky bulvar, 11), VSaenko@hse.ru

Sergey R. Tumkovskiy – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Computer Engineering Department, National Research University “Higher School of Economics” (Russia, 109028, Moscow, Pokrovsky bulvar, 11), STumkovskiy@hse.ru

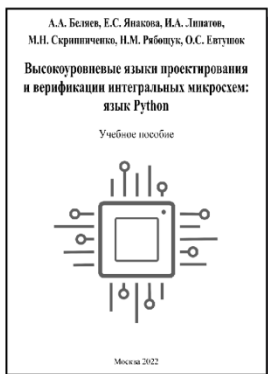


Издательско-полиграфический комплекс
Национального исследовательского университета «МИЭТ»
информирует



Вышло в свет учебное пособие

**Беляев А.А., Янакова Е.С., Липатов И.А., Скрипниченко М.Н., Рябошук Н.М.,
Евтушок О.С. Высокоуровневые языки проектирования и верификации
интегральных микросхем: язык Python: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2022. 112 с.: ил.**



ISBN 978-5-7256-0986-8

Изложены основы языка программирования Python, который широко применяется в маршруте проектирования интегральных микросхем (ИМС). Рассмотрены методы и возможности использования языка Python как эффективного средства автоматизации на различных этапах проектирования ИМС. Приведены варианты лабораторных работ, выполнение которых способствует формированию у обучающихся навыков программирования на языке Python при решении задач проектирования ИМС.

Для студентов магистратуры, обучающихся по направлениям подготовки 11.04.04 - «Электроника и наноэлектроника» и 09.04.01 - «Информатика и вычислительная техника».

Методика итерационного уточнения значений параметров в аналитических моделях микроэлектронных устройств

А. С. Синюкин, А. В. Ковалев

Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

sinyukin@sfnu.ru

Аннотация. Физические модели МОП-транзисторов, применяемые при проектировании современных интегральных микросхем, характеризуются точностью, что позволяет с заданной степенью достоверности моделировать их работу, но отличаются высокой сложностью. Поэтому обычно применяются менее точные, но более компактные аналитические модели транзисторов и устройств на их основе. Однако при расчетах и оценивании значения параметров, составляющих уравнения модели, не во всех случаях могут быть известны с достаточной степенью точности. В работе представлена методика итерационного уточнения значений параметров в аналитических моделях, описывающих устройства на основе интегральных МОП-транзисторов. С использованием результатов моделирования, проведенного в САПР Cadence с подключением высокоточной модели МОП-транзисторов BSIM4, на примере разработанной ранее аналитической модели умножителя напряжения показана возможность практического применения предлагаемой методики. Установлено, что использование методики уточнения параметров значительно снижает погрешности моделей электронных устройств на основе интегральных МОП-транзисторов.

Ключевые слова: аналитическое моделирование, интегральные МОП-транзисторы, физическая модель МОП-транзистора, подпороговый режим работы

Финансирование работы: работа выполнена в рамках проекта «Разработка и исследование методов и средств мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния инженерных объектов на основе искусственного интеллекта» (задание № FENW-2020-0022).

Для цитирования: Синюкин А. С., Ковалев А. В. Методика итерационного уточнения значений параметров в аналитических моделях микроэлектронных устройств // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 645–651. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-645-651>

An approach of the parameter values iterative refinement for analytical models of microelectronic devices

A. S. Sinyukin, A. V. Kovalev

Southern Federal University, Taganrog, Russia

sinyukin@sfnu.ru

Abstract. Physical MOSFET models applied at modern ICs design feature high accuracy which allows simulating their work with desired degree of fidelity. However, such models are characterized by high complexity, as a result, their usage at analysis and forecasting of the designing devices is impractical. Therefore for estimation and forecast less accurate but more compact analytical models of the transistors and the devices based on them are usually applied. Meanwhile not in every case at calculations and estimation the values of all parameters composing the model equations could be known with sufficient accuracy. In this work, a refinement approach of the parameter values of the analytical models describing the integrated MOS transistors based devices is presented. The possibility of practical usage of the proposed approach has been demonstrated applying the simulation results obtained with EDA of Cadence and highly-precise BSIM4 MOS model by the example of the voltage multiplier analytical model developed earlier. It is established that the use of the parameter refinement technique significantly reduces the errors of models of electronic devices based on MOSFETs.

Keywords: analytical modeling, integrated MOS transistors, physical model of MOSFET, subthreshold region

Funding: the work has been supported by the project “Development and research of methods and tools for monitoring, diagnostics and forecasting the state of engineering objects based on artificial intelligence” (No. FENW-2020-0022).

For citation: Sinyukin A. S., Kovalev A. V. An approach of the parameter values iterative refinement for analytical models of microelectronic devices. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 645–651. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-645-651>

Введение. МОП-транзисторы – одни из ключевых компонентов, на основе которых строятся аналоговые, цифровые и аналого-цифровые микроэлектронные устройства. При проектировании интегральных микросхем существует потребность в точном воспроизведении физических, конструктивных, технологических и схемотехнических особенностей МОП-транзисторов. Для этого разработаны высокоточные физические модели МОП-транзисторов, такие как MOS9, BSIM3, BSIM4 [1] и др. Данные модели могут включать в себя сотни уравнений, содержащих тысячи параметров, поэтому они позволяют описывать и моделировать устройства на основе МОП-транзисторов с высокой степенью точности, сопоставимой с результатами измерения экспериментальных образцов. Для моделирования применяются комплексные САПР, например, от компаний Synopsys, Mentor Graphics и Cadence. Однако из-за высокой сложности такие модели оказываются малоприменимы для аналитических расчетов и прогнозирования.

При разработке микронэлектронных устройств, особенно на ранних стадиях проектирования, для прогнозирования их работы и оценки параметров во многих случаях удобнее пользоваться более компактными аналитическими моделями. Но и в этом случае чем точнее будут выбраны значения параметров при оценочных расчетах, тем меньше будет погрешность результатов этих расчетов по сравнению с результатами измерения или высокоточного моделирования.

В настоящей работе для снижения погрешности, возникающей при аналитических расчетах, предлагается методика уточнения и определения неизвестных значений параметров в компактных аналитических моделях, характеризующих микронэлектронные устройства на основе интегральных МОП-транзисторов.

Описание методики. Применение методики уточнения параметров рассмотрим на примере разработанных ранее моделей многокаскадных умножителей напряжения [2], в основу которых положены модель наноразмерных транзисторов EKV [3] и модель умножителя Диксона [4]. Умножители напряжения широко применяются в качестве компонента источников питания в беспроводных пассивных (безбатарейных) микронэлектронных устройствах, которые используются при мониторинге целостности конструкций [5], в приложениях Интернета вещей [6] и радиочастотной идентификации [7], а также в других областях. Используемые модели умножителя содержат выражения для определения напряжения на выходах контуров умножителя (рис. 1), тока транзисторов в диодном включении и падения напряжения на этих транзисторах.

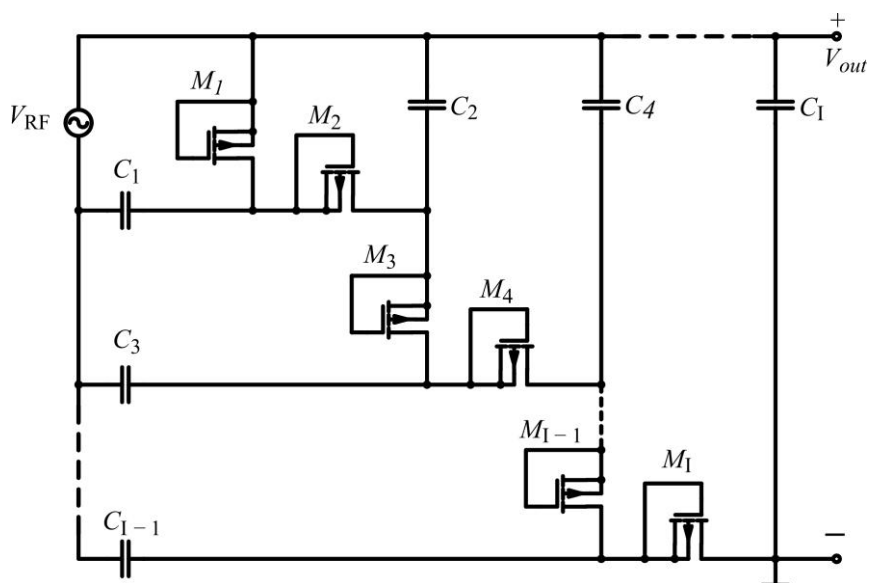


Рис. 1. Схема модифицированного умножителя напряжения [2]

Fig. 1. The circuit of modified voltage multiplier [2]

Согласно предлагаемой методике для уточнения значений параметров в аналитических моделях многокаскадных умножителей напряжения в первую очередь необходимо осуществить измерение или высокоточное моделирование искомого умножителя для получения значений напряжений на выходах каждого каскада, которые принимаются за истинные (рис. 2). Такое моделирование проведено для построенного по КМОП-технологии TSMC 180-нм восьмикаскадного умножителя напряжения в программных модулях Virtuoso ADE и Spectre в составе САПР Cadence. Моделирование выполняли с использованием моделей BSIM4 с учетом паразитных элементов, экстрагированных из топологии умножителя посредством САПР Calibre Interactive.

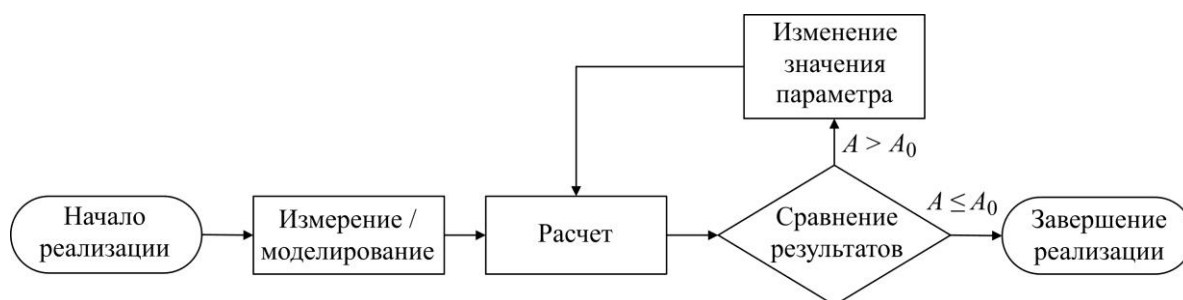


Рис. 2. Блок-схема методики итерационного уточнения значений параметров
 Fig. 2. Flowchart of the parameter values iterative refinement approach

Методика применяется, если значение одного из параметров модели неизвестно или известно с недостаточной степенью точности. В этом случае используется известное или предполагаемое значение уточняемого параметра и осуществляется расчет по выражениям модели. Результат расчета – значения напряжений на выходах умножающих каскадов – сравнивается с результатом высокоточного моделирования. В зависимости от результата сравнения значение уточняемого параметра принимается за корректное либо осуществляется изменение значения уточняемого параметра, и расчет повторяется.

Таким образом, процесс уточнения является итерационным и продолжается до тех пор, пока соответствие результатов расчета и результатов моделирования (истинных результатов) не достигнет заданной точности. При осуществлении итерационных процессов применяются хорошо отработанные методы оптимизации, которые позволяют избежать расходимости процессов и промахов [8]. Критерием точности соответствия результатов A является сумма разностей Δ_n между значениями напряжений на выходах каждого каскада для истинного и расчетного значений (сумма отклонений расчетных значений $V_{n, calc}$ от значений $V_{n, sim}$, полученных в результате моделирования):

$$A = \sum_{n=1}^N |\Delta_n|,$$

$$\Delta_n = V_{n, sim} - V_{n, calc}.$$

Сумма разностей A в идеальном случае стремится к нулю, а на практике должна достигать какого-то установленного значения A_0 , соответствующего точности определения интересующего параметра. При итерационном уточнении параметров важно, чтобы значения остальных параметров были известны с необходимой степенью точности. Рассматриваемая методика может применяться и для многофакторного уточнения, когда нужно определять значение более одного параметра. В этом случае используются методы многофакторной оптимизации [8].

Реализация методики. Методика реализована в виде программы на языке Matlab. В качестве примера рассмотрим уточнение до единиц наноампер значения тока I_d транзисторов в диодном включении при работе в области слабой инверсии.

На первой итерации ток $I_d = 14$ нА (исходя из приближенной оценки: $I_d = V_{out} / R = 1,3679$ В / 100 МОм ≈ 14 нА). При этом критерий $A = 4,6853$ В, что соответствует усредненной погрешности аналитической модели, равной 81,27 %. На второй итерации $I_d = 1$ мкА. И в этом случае $A = 3,5687$ В, а усредненная погрешность составила 52,98 %. Затем выполнено еще несколько расчетных итераций. В результате установлено, что в наибольшей степени истинному значению тока с учетом заданной степени точности соответствует ток $I_d = 170$ нА. При этом критерий $A = 0,0816$ В, а усредненная погрешность модели составляет 3,16 %.

Если необходимо определить значение тока при работе умножителя в области сильной инверсии, например, с точностью до десятых долей микроампер при амплитуде входного напряжения $V_a = 0,7$ В ($> V_{T0}$) и сохранении значений остальных параметров, то уточненное значение $I_d = 1,0$ мкА в случае $A = 0,3512$ В и соответствующей погрешности аналитической модели 2,44 %. Результаты уточнения значения тока при работе в области слабой ($V_a = 0,2$ В) и сильной ($V_a = 0,7$ В) инверсии представлены на рис. 3.

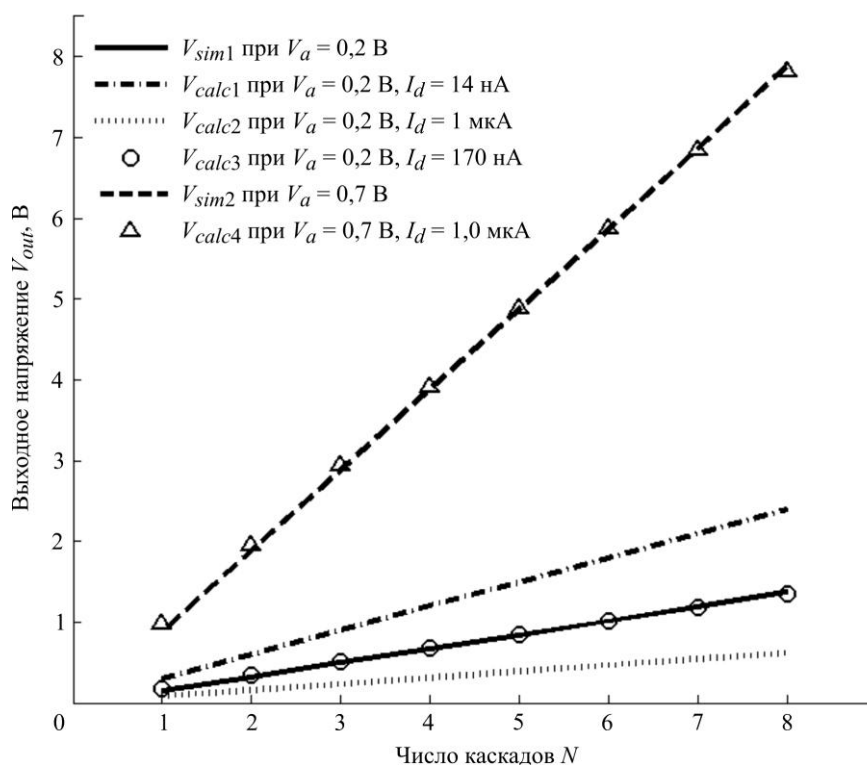


Рис. 3. Результаты итерационного уточнения значения параметра I_d (V_{sim} – результаты моделирования, V_{calc} – результаты расчетов)
 Fig. 3. The results of parameter I_d value iterative refinement (V_{sim} – simulation results, V_{calc} – calculation results)

Таким образом, при достижении необходимой степени точности соответствия и использовании действительных значений остальных параметров можно утверждать, что установленное значение искомого параметра соответствует истине со степенью достоверности, определяемой заданной степенью точности итерационного процесса и точностью оценочных моделей.

Заключение. Предложенная методика может применяться для уточнения и определения параметров аналитических моделей электронных устройств, построенных на основе интегральных МОП-транзисторов. Реализация методики показала значительное снижение погрешности этих моделей.

Литература

1. BSIM4 4.8.2 MOSFET model / C. K. Dabhi, A. Dasgupta, H. Agrawal et al. Berkeley, CA: University of California, 2020. 184 p.
2. Sinyukin A. S., Konoplev B. G. Integrated CMOS microwave power converter for passive wireless devices // Russ. Microelectron. 2021. Vol. 50. Iss. 3. P. 219–227. <https://doi.org/10.1134/S1063739721020086>
3. Enz C. C., Vittoz E. A. Charge-based MOS transistor modeling: The EKV model for low-power and RF IC design. Chichester: Wiley, 2006. XXIII, 303 p. <https://doi.org/10.1002/0470855460>

4. **Dickson J. F.** On-chip high-voltage generation in MNOS integrated circuits using an improved multiplier technique // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1976. Vol. 11. No. 3. P. 374–378. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1976.1050739>

5. **Li P., Long Z., Yang Z.** RF energy harvesting for batteryless and maintenance-free condition monitoring of railway tracks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8. Iss. 5. P. 3512–3523. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3023475>

6. **Guler U., Jia Y., Ghovanloo M.** A reconfigurable passive voltage multiplier for wireless mobile IoT applications // *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2020. Vol. 67. Iss. 4. P. 615–619. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2923534>

7. CMOS UHF RFID rectifier design and matching: an analysis of process and temperature variations / **M. Wagih, A. Savanth, S. Gamage et al.** // 2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Delhi: IEEE, 2021. P. 271–274. <https://doi.org/10.1109/RFID-TA53372.2021.9617446>

8. **Snyman J. A., Wilke D. N.** Practical mathematical optimization: Basic optimization theory and gradient-based algorithms. 2nd ed. Berlin: Springer, 2018. XXVI, 372 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77586-9>

Статья поступила в редакцию 16.06.2022 г.; одобрена после рецензирования 28.06.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Синюкин Александр Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Дизайн-центра микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта Южного федерального университета (Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. К), sinyukin@sfedu.ru

Ковалев Андрей Владимирович – доктор технических наук, доцент, руководитель Дизайн-центра микроэлектронной компонентной базы для систем искусственного интеллекта Южного федерального университета (Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. К), avkovalev@sfedu.ru

References

1. Dabhi C. K., Dasgupta A., Agrawal H., Paydavosi N. et al. *BSIM4 4.8.2 MOSFET model*. Berkeley, CA, University of California, 2020. 184 p.

2. Sinyukin A. S., Konoplev B. G. Integrated CMOS microwave power converter for passive wireless devices. *Russ. Microelectron.*, 2021, vol. 50, iss. 3, pp. 219–227. <https://doi.org/10.1134/S1063739721020086>

3. Enz C. C., Vittoz E. A. *Charge-based MOS transistor modeling: The EKV model for low-power and RF IC design*. Chichester, Wiley, 2006. xxiii, 303 p. <https://doi.org/10.1002/0470855460>

4. Dickson J. F. On-chip high-voltage generation in MNOS integrated circuits using an improved multiplier technique. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1976, vol. 11, no. 3, pp. 374–378. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1976.1050739>

5. Li P., Long Z., Yang Z. RF energy harvesting for batteryless and maintenance-free condition monitoring of railway tracks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, vol. 8, iss. 5, pp. 3512–3523. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3023475>

6. Guler U., Jia Y., Ghovanloo M. A reconfigurable passive voltage multiplier for wireless mobile IoT applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2020, vol. 67, iss. 4, pp. 615–619. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2923534>

7. Wagih M., Savanth A., Gamage S., Weddell A. S., Beeby S. CMOS UHF RFID rectifier design and matching: an analysis of process and temperature variations. *2021 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*. Delhi, IEEE, 2021, pp. 271–274. <https://doi.org/10.1109/RFID-TA53372.2021.9617446>

8. Snyman J. A., Wilke D. N. *Practical mathematical optimization: Basic optimization theory and gradient-based algorithms*. 2nd ed. Berlin, Springer, 2018. xxvi, 372 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77586-9>

The article was submitted 16.06.2022; approved after reviewing 28.06.2022; accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Alexander S. Sinyukin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher, Design Center of Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems, Southern Federal University (Russia, 347922, Taganrog, Shevchenko st., 2, bld. K), sinyukin@sfnu.ru

Andrey V. Kovalev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Director, Design Center of Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems, Southern Federal University (Russia, 347922, Taganrog, Shevchenko st., 2, bld. K), avkovalev@sfnu.ru

**Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

**Подписку на электронную версию журнала
можно оформить на сайтах:**

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

Научная статья
УДК 62-503.57:629.73
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-5-652-663

**Применение адаптивных регуляторов
в системах управления
беспилотными летательными аппаратами**

А. В. Архипов^{1,2}, С. П. Тимошенко²

¹АО «ЭЛАРА», г. Чебоксары, Россия

²Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

spt111@mail.ru

Аннотация. На работоспособность беспилотного летательного аппарата (БПЛА) существенно влияют факторы, обусловленные особенностями конструкции и условиями полета. БПЛА совершает полет в нестационарных внешних условиях, приводящих к изменению его динамических параметров и реакций на управляющие внешние и внутренние воздействия. При этом сохранение динамических свойств, стабилизация углового и траекторного положения БПЛА – задача электротехнической системы автоматического управления. В работе рассмотрена математическая модель системы управления углом тангажа БПЛА. Показано влияние изменения физического состояния объекта управления на качество регулирования. Для минимизации данного влияния предложен алгоритм адаптивного регулирования. Установлено, что адаптированная система управления позволяет компенсировать ошибку регулирования, вызванную изменением характеристик объекта управления.

Ключевые слова: адаптивное регулирование, система управления углом тангажа, продольное движение беспилотного летательного аппарата, изменение аэродинамических коэффициентов

Для цитирования: Архипов А. В., Тимошенко С. П. Применение адаптивных регуляторов в системах управления беспилотными летательными аппаратами // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 652–663. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-652-663>

Original article

Application of adaptive controllers in control systems for unmanned aerial vehicles

A. V. Arhipov^{1,2}, S. P. Timoshenkov²

¹JSC "ELARA", Cheboksary, Russia

²National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

spt111@mail.ru

Abstract. The performance of an unmanned aerial vehicle (UAV) is significantly affected by factors due to the design features and flight conditions. The UAV makes a flight in non-stationary external conditions, leading to a change in its dynamic parameters and reactions to controlling external and internal influences. At the same time, the preservation of dynamic properties, stabilization of the angular and trajectory position of the UAV is the task of an electrical automatic control system. In this work, a mathematical model of the pitch angle control system of a UAV is considered. The influence of changes in the physical state of the control object on the quality of regulation is shown. To minimize this influence, an adaptive control algorithm is proposed. It has been established that the adapted control system makes it possible to compensate for the control error caused by a change in the characteristics of the control object.

Keywords: adaptive control, pitch angle control system, longitudinal motion of an unmanned aerial vehicle, change in aerodynamic coefficients

For citation: Arhipov A. V., Timoshenkov S. P. Application of adaptive controllers in control systems for unmanned aerial vehicles. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 652–663. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-652-663>

Введение. Научно-технический прогресс, рост сложности, стоимости создания и эксплуатации новой пилотируемой авиационной техники привели к интенсивному развитию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Управление полетом БПЛА осуществляется автономно по траектории программы полета или по директорным командам с наземного пункта управления по радиолинии [1]. В условиях эксплуатации на работоспособность БПЛА существенно влияют факторы, обусловленные особенностями конструкции и условиями полета. БПЛА совершает полет в нестационарных внешних условиях, связанных с изменением характеристик атмосферы, веса и моментов инерции, разрушениями и поломками элементов конструкции и другими причинами, приводящими к изменению его динамических параметров и реакций на управляющие внешние и внутренние воздействия [2]. При этом в условиях внешних возмущающих факторов сохранение динамических свойств БПЛА, стабилизация углового и траекторного положения БПЛА – задачи электротехнической системы автоматического управления (САУ).

Для выполнения перечисленных задач необходимы средства управления динамикой БПЛА и измерения параметров динамики, а также вычислительные средства. Цель настоящей работы – разработка математической модели и исследование преимуществ адаптированной системы управления углом тангажа БПЛА.

Система управления БПЛА. Структура управления БПЛА представлена на рис. 1. Управление БПЛА осуществляется с помощью рулей, изменение положения которых приводит к регулированию сил и моментов, действующих на БПЛА. Основные органы управления, имеющиеся практически на каждом БПЛА самолетного типа, – это руль высоты, руль направления, левый и правый элероны, контроллер тяги двигателя. Изменение положения рулей управления осуществляется с помощью приводов. Управляющий сигнал для приводов формируется в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) на основе управляющих команд и фактического значения управляемых параметров. Управляющие команды могут быть заранее запрограммированными или могут приниматься с наземной станции управления с помощью приемника наземных сигналов (ПНС) [3]. Фактические значения управляемых параметров БПЛА определяются с помощью чувствительных элементов (ЧЭ), пре-

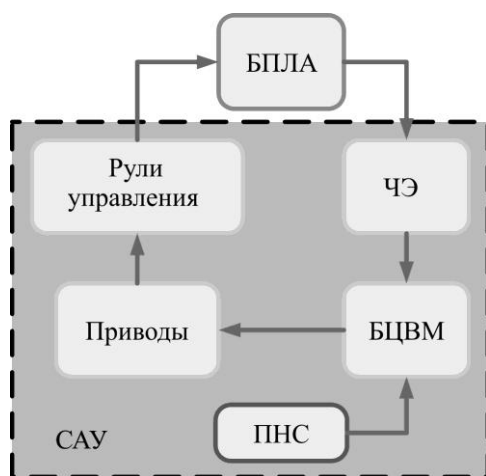


Рис. 1. Структура электротехнической системы управления БПЛА

Fig. 1. The structure of the electrical control system of a UAV

образующих внешнее физическое воздействие в электрический сигнал.

Закон управления определяет динамику движения БПЛА при автоматическом управлении и характеризует структуру построения САУ. Для исследования динамических свойств БПЛА в ряде случаев общее движение можно разделить на продольное и боковое и рассматривать управление ими независимо друг от друга. Движение БПЛА состоит из движения относительно центра масс (три степени свободы) и движения центра масс (три степени свободы). Система построена по принципу подчиненного регулирования. Контур управления угловыми движениями (вокруг центра масс) является внутренним. Движение центра масс обеспечивается внешними контурами управления или траекторной частью системы управления [1].

Математическая модель системы управления углом тангажа БПЛА. Рассмотрим систему управления внутреннего контура продольного движения БПЛА – систему управления углом тангажа ϑ . Построим систему уравнений продольного движения [3]:

Математическая модель системы управления углом тангажа БПЛА. Рассмотрим систему управления внутреннего контура продольного движения БПЛА – систему управления углом тангажа ϑ . Построим систему уравнений продольного движения [3]:

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= \frac{1}{m}(\omega_z V_y + P - G \sin \vartheta + qSc_x), \\ \frac{dV_y}{dt} &= \frac{1}{m}(-\omega_z V_x - G \cos \vartheta + qSc_y), \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= \omega_z, \\ \frac{d\omega_z}{dt} &= \frac{1}{I_z} qSb_a m_z. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $V_{x,y}$ – проекции вектора воздушной скорости БПЛА на продольную и нормальную оси; m – масса БПЛА; ω_z – проекция вектора угловой скорости БПЛА на боковую ось; P – сила тяги двигателя; G – гравитационная сила тяжести; ϑ – угол тангажа БПЛА; S – площадь поперечного сечения крыла БПЛА; I_z – момент инерции вокруг бо-

ковой оси БПЛА; b_a – средняя аэродинамическая хорда крыла; c_x , c_y и m_z – безразмерные аэродинамические коэффициенты; q – скоростной напор:

$$q = \frac{\rho V^2}{2},$$

где ρ – плотность воздуха; $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ – абсолютная воздушная скорость БПЛА.

Безразмерные аэродинамические коэффициенты c_x , c_y и m_z определяются на основе исследований изменения динамики макета БПЛА в аэродинамической трубе. В случае продольного движения данные коэффициенты могут иметь сложную функциональную зависимость от параметров [4]:

$$(c_x, c_y, m_z) = f(\delta_b, H, M, \alpha, \omega_z).$$

Здесь δ_b – угол отклонения руля высоты; H – высота полета; M – число Маха (отношение скорости БПЛА к скорости звука); α – угол атаки:

$$\alpha = -\arctg \frac{V_y}{V_x}. \quad (2)$$

Для расчета сигналов управления необходимо линеаризовать систему уравнений (1). С этой целью представим управляемые параметры движения БПЛА в виде суммы заданного значения и некоторого отклонения. Поскольку САУ непрерывно стабилизирует движение, то отклонения от заданной траектории можно считать малыми. Следовательно, можно линеаризовать математическую модель БПЛА в окрестности заданной траектории [4]:

$$\begin{aligned} m(g \sin \vartheta_0 - \omega_{z0} V_{y0}) + m(\delta \dot{V}_x - \omega_{z0} \delta V_y - \delta \omega_z V_{y0} + g \cos \vartheta_0 \delta \vartheta) &= F_{x0} + \delta F_x, \\ m(\omega_{z0} V_{x0} + g \cos \vartheta_0) + m(\delta \dot{V}_y + \omega_{z0} \delta V_x + \delta \omega_z V_{x0} - g \sin \vartheta_0 \delta \vartheta) &= F_{y0} + \delta F_y, \\ I_z \delta \dot{\omega}_z = \delta M_z, \quad \delta \dot{\vartheta} = \delta \omega_z, \end{aligned} \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения.

Предположим, что в установившемся режиме $\vartheta_0 = 0$, $V_{y0} = 0$, $\omega_{z0} = 0$. Тогда систему уравнений (3) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}_x &= \frac{\delta F_x}{m} - g \delta \vartheta, \quad \delta \dot{V}_y = \frac{\delta F_y}{m} - \delta \omega_z V_{x0}, \\ \delta \dot{\omega}_z &= \frac{\delta M_z}{I_z}, \quad \delta \dot{\vartheta} = \delta \omega_z. \end{aligned}$$

Линеаризацию негравитационных сил и моментов необходимо провести разложением в ряд Тейлора [2]:

$$\begin{aligned} \delta F_{x_a} &= \frac{\partial R_x}{\partial V_{x,y}} \delta V_{x,y} + \frac{\partial R_x}{\partial \omega_z} \delta \omega_z + \frac{\partial R_x}{\partial \dot{V}_{x,y}} \delta \dot{V}_{x,y} + \frac{\partial R_x}{\partial \dot{\omega}_z} \delta \dot{\omega}_z, \\ \delta F_{y_a} &= \frac{\partial R_y}{\partial V_{x,y}} \delta V_{x,y} + \frac{\partial R_y}{\partial \omega_z} \delta \omega_z + \frac{\partial R_y}{\partial \dot{V}_{x,y}} \delta \dot{V}_{x,y} + \frac{\partial R_y}{\partial \dot{\omega}_z} \delta \dot{\omega}_z, \\ \delta M_{z_a} &= \frac{\partial M_z}{\partial V_{x,y}} \delta V_{x,y} + \frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \delta \omega_z + \frac{\partial M_z}{\partial \dot{V}_{x,y}} \delta \dot{V}_{x,y} + \frac{\partial M_z}{\partial \dot{\omega}_z} \delta \dot{\omega}_z, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\delta F_{Xa}, \delta F_{Ya}, \delta M_{Za}$ – соответственно отклонения продольных и нормальных сил и бокового момента, вызванные отклонением аэродинамических коэффициентов; R_X, R_Y, M_Z – продольная и нормальная аэродинамические силы и боковой момент.

Коэффициенты частных производных в (4) также можно представить следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial R_X}{\partial V_{x,y}} \frac{1}{m} & \frac{\partial R_X}{\partial \omega_z} \frac{1}{m} & \frac{\partial R_X}{\partial \dot{V}_{x,y}} \frac{1}{m} & \frac{\partial R_X}{\partial \dot{\omega}_z} \frac{1}{m} \\ \frac{\partial R_Y}{\partial V_{x,y}} \frac{1}{m} & \frac{\partial R_Y}{\partial \omega_z} \frac{1}{m} & \frac{\partial R_Y}{\partial \dot{V}_{x,y}} \frac{1}{m} & \frac{\partial R_Y}{\partial \dot{\omega}_z} \frac{1}{m} \\ \frac{\partial M_Z}{\partial V_{x,y}} \frac{1}{I_Z} & \frac{\partial M_Z}{\partial \omega_z} \frac{1}{I_Z} & \frac{\partial M_Z}{\partial \dot{V}_{x,y}} \frac{1}{I_Z} & \frac{\partial M_Z}{\partial \dot{\omega}_z} \frac{1}{I_Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_X^{\delta V_{x,y}} & R_X^{\delta \omega_z} & R_X^{\delta \dot{V}_{x,y}} & R_X^{\delta \dot{\omega}_z} \\ R_Y^{\delta V_{x,y}} & R_Y^{\delta \omega_z} & R_Y^{\delta \dot{V}_{x,y}} & R_Y^{\delta \dot{\omega}_z} \\ M_Z^{\delta V_{x,y}} & M_Z^{\delta \omega_z} & M_Z^{\delta \dot{V}_{x,y}} & M_Z^{\delta \dot{\omega}_z} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Согласно исследованиям [2] некоторые компоненты разложения в (5) пренебрежимо малы:

$$\begin{aligned} R_X^{\delta \dot{V}_x}, R_X^{\delta \dot{V}_y}, R_X^{\delta \omega_z}, R_X^{\delta \dot{\omega}_z} &\approx 0, \\ R_Y^{\delta \dot{V}_x}, R_Y^{\delta \dot{V}_y}, R_Y^{\delta \omega_z}, R_Y^{\delta \dot{\omega}_z} &\approx 0, \\ M_Z^{\delta \dot{V}_x}, M_Z^{\delta \dot{\omega}_z} &\approx 0. \end{aligned}$$

Перепишем систему (4), при этом учтем влияние изменения угла руля высоты δ_b :

$$\begin{aligned} \delta F_{Xa} + \delta F_{X\delta} &= R_X^{\delta V_x} \delta V_x + R_X^{\delta V_y} \delta V_y + R_X^{\delta_b} \delta_b, \\ \delta F_{Ya} + \delta F_{Y\delta} &= R_Y^{\delta V_x} \delta V_x + R_Y^{\delta V_y} \delta V_y + R_Y^{\delta_b} \delta_b, \\ \delta M_{Za} + \delta M_{Z\delta} &= M_Z^{\delta V_x} \delta V_x + M_Z^{\delta V_y} \delta V_y + M_Z^{\delta \omega_z} \delta \omega_z + M_Z^{\delta \dot{V}_y} \delta \dot{V}_y + M_Z^{\delta_b} \delta_b. \end{aligned} \quad (6)$$

Представим угол атаки α малой величиной, следовательно вся основная часть вектора скорости направлена по оси OX_C связанной системы координат, $\delta V_x \approx 0$. Тогда с учетом выражения (2) имеем

$$\alpha = -\frac{\delta V_y}{V_{x0}}, \quad \dot{\alpha} = -\frac{\delta \dot{V}_y}{V_{x0}}. \quad (7)$$

В результате полная линеаризованная модель продольного движения БПЛА [2] будет иметь вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \delta \dot{\omega}_z \\ \delta \dot{\delta}_b \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} R_Y^{\delta V_y} & 1 & 0 \\ -\tilde{M}_Z^{\delta V_y} V_{x0} & \tilde{M}_Z^{\delta \omega_z} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \delta \omega_z \\ \delta \delta_b \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} R_Y^{\delta_b} / V_{x0} \\ \tilde{M}_Z^{\delta_b} \\ 0 \end{pmatrix} \delta_b, \quad (8)$$

где $\tilde{M}_Z^{\delta V_y} = M_Z^{\delta V_y} + M_Z^{\delta \dot{V}_y} R_Y^{\delta V_y}$, $\tilde{M}_Z^{\delta \omega_z} = M_Z^{\delta \omega_z} - M_Z^{\delta \dot{V}_y} V_{x0}$, $M_Z^{\delta_b} = M_Z^{\delta_b} + M_Z^{\delta \dot{V}_y} R_Y^{\delta_b}$.

Рассчитаем характеристический определитель системы (8) [3]:

$$D(s) = \begin{vmatrix} (s - R_Y^{\delta V_Y}) & -1 & 0 \\ \tilde{M}_Z^{\delta V_Y} V_{X0} & (s - \tilde{M}_Z^{\delta \omega_Z}) & 0 \\ 0 & -1 & s \end{vmatrix} = s(s^2 - (R_Y^{\delta V_Y} + \tilde{M}_Z^{\delta \omega_Z})s + R_Y^{\delta V_Y} \tilde{M}_Z^{\delta \omega_Z} + \tilde{M}_Z^{\delta V_Y} V_{X0}). \quad (9)$$

Выражение (9) является полиномом знаменателя передаточной функции. Необходимо рассчитать замещенный определитель по углу тангажа [5]:

$$R^{\delta \vartheta}(s) = \begin{vmatrix} (s - R_Y^{\delta V_Y}) & -1 & (R_Y^{\delta_b} / V_{X0}) \delta_b \\ \tilde{M}_Z^{\delta V_Y} V_{X0} & (s - \tilde{M}_Z^{\delta \omega_Z}) & \tilde{M}_Z^{\delta_b} \delta_b \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} = (\tilde{M}_Z^{\delta_b} s - R_Y^{\delta V_Y} \tilde{M}_Z^{\delta_b} - \tilde{M}_Z^{\delta V_Y} R_Y^{\delta_b}) \delta_b = R_{\delta_b}^{\delta \vartheta}(s) \delta_b. \quad (10)$$

В соответствии с выражениями (9), (10) передаточные функции от угла отклонения руля высоты до отклонения угловой скорости $\delta \omega_Z$ и угла тангажа $\delta \vartheta$ будут иметь вид

$$W_{\delta_b}^{\delta \omega_Z}(s) = \frac{\tilde{M}_Z^{\delta_b} s - R_Y^{\delta V_Y} \tilde{M}_Z^{\delta_b} - \tilde{M}_Z^{\delta V_Y} R_Y^{\delta_b}}{s^2 - (R_Y^{\delta V_Y} + \tilde{M}_Z^{\delta \omega_Z})s + R_Y^{\delta V_Y} \tilde{M}_Z^{\delta \omega_Z} + \tilde{M}_Z^{\delta V_Y} V_{X0}}, \quad (11)$$

$$W_{\delta_b}^{\delta \vartheta}(s) = \frac{1}{s} W_{\delta_b}^{\delta \omega_Z}(s).$$

Структуру регулирования угла тангажа построим следующим образом [5]:

$$\delta_b = k_{\vartheta} (\vartheta - \vartheta_3) + k_{\omega_Z} \omega_Z, \quad (12)$$

где k_{ϑ} – коэффициент усиления рассогласования сигналов; ϑ_3 – заданное значение угла тангажа; k_{ω_Z} – коэффициент усиления обратной связи по угловой скорости, предназначенный для демпфирования.

Структурная схема регулирования угла тангажа БПЛА приведена на рис. 2. Для простоты представим передаточную функцию привода $W_{пр}(s)$, датчика угловой скорости $W_{д.у.с}(s)$ и датчика угла $W_{д.у}(s)$ равными единице.

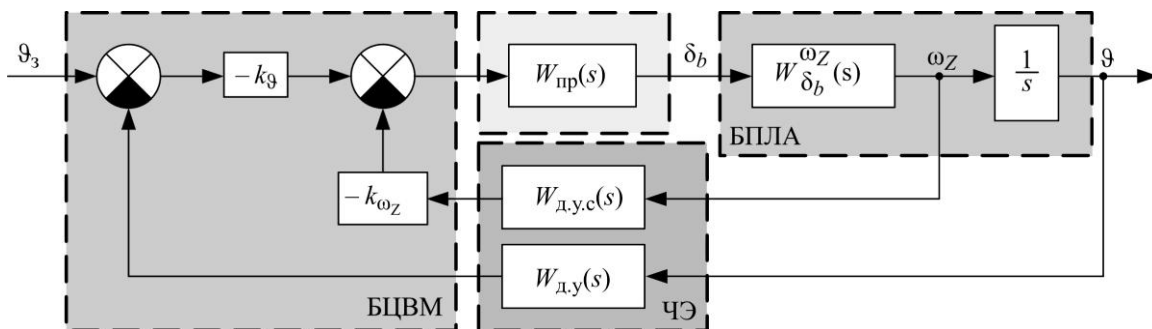


Рис. 2. Структура регулирования угла тангажа БПЛА
Fig. 2. UAV pitch angle control structure

Приведем приблизительные значения коэффициентов модели, представленных в выражениях (6)–(12) для высокоманевренного БПЛА: $R_Y^{\delta V_Y} = -0,6398$; $\tilde{M}_Z^{\delta V_Y} = 0,003136$; $V_{X0} = 250$; $\tilde{M}_Z^{\delta \omega_Z} = -0,8791$; $R_Y^{\delta b} = -38,85$; $\tilde{M}_Z^{\delta b} = -6,5121$; $k_{\vartheta} = 15$; $k_{\omega_Z} = 10$. Учтем предельные значения скорости изменения угла тангажа $\omega_{Z_{\max}} = \pm 10^\circ/\text{с}$, а также предельные значения угла тангажа $\vartheta_{\max} = \pm 65^\circ$. Результаты моделирования при заданном значении угла тангажа $\vartheta_3 = 10^\circ$ представлены на рис. 3, а. График регулирования имеет апериодический вид с временем переходного процесса $t_{п.п} = 3,1 \text{ с}$.

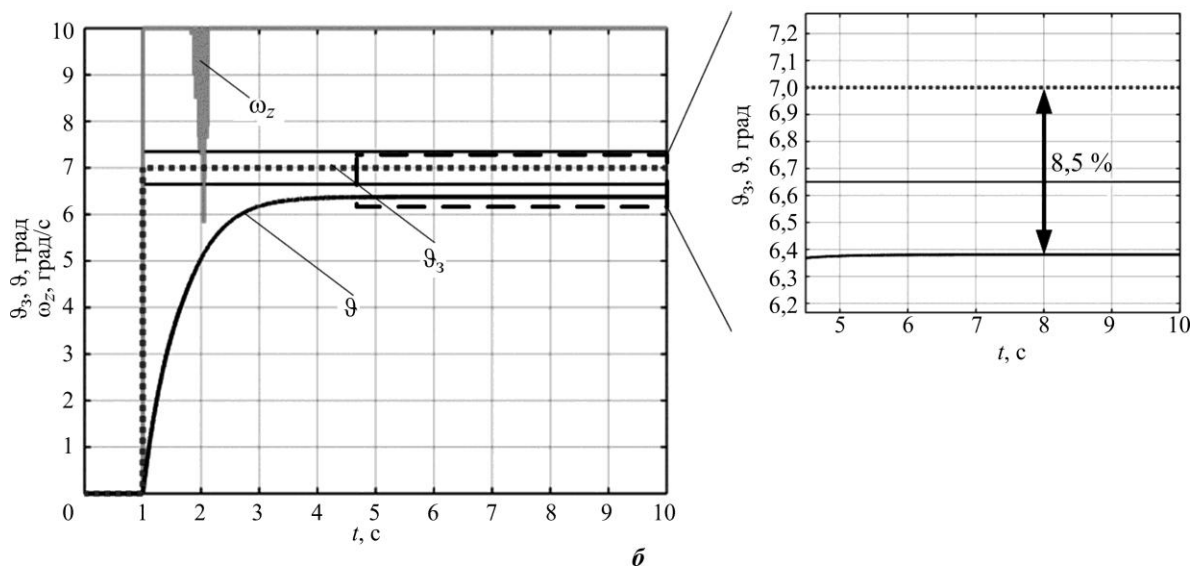
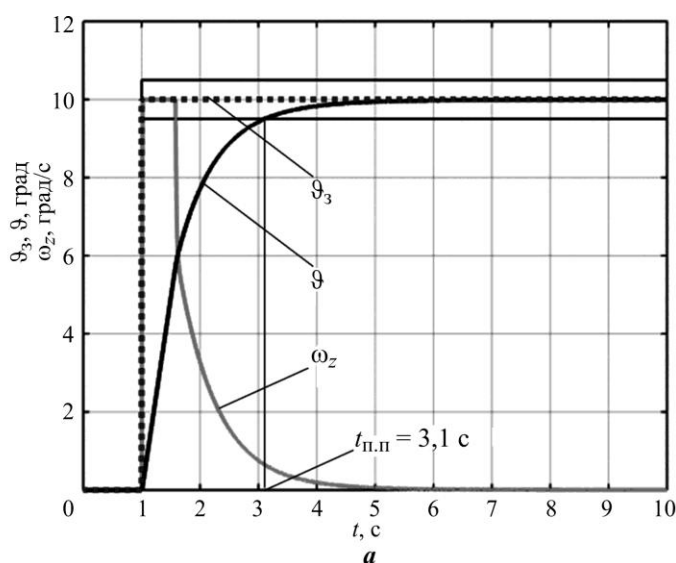


Рис. 3. Графики регулирования угла тангажа БПЛА при номинальных (а) и ненормальных (б) коэффициентах модели
 Fig. 3. Graphs of UAV pitch angle regulation at nominal (a) and non-nominal (b) coefficients of the model

Значения коэффициентов модели со временем или в результате внешнего воздействия могут меняться. Например, $V_{X0} = 250$ м/с может варьироваться до околонулевого значения в зависимости от режима полета. Все коэффициенты в соответствии с (5) напрямую зависят от массы БПЛА.

На рис. 3, б представлен график регулирования в случае, когда значения коэффициентов модели отклонены от представленных случайным образом в пределах 0–200 %. Согласно рисунку при случайном изменении аэродинамических коэффициентов, физического состояния БПЛА или внешних условий регулирование угла тангажа может осуществляться с некоторой ошибкой. Для предотвращения подобных случаев применяются так называемые адаптивные системы регулирования.

Алгоритм адаптивного регулирования. Адаптация – процесс изменения параметров, структуры систем или управляющих воздействий на основе информации, получаемой во время управления, с целью достижения определенного (оптимального) качества управления при начальной неопределенности и/или изменяющихся условиях работы [6]. Большое распространение получили адаптивные системы с использованием эталонных моделей объектов управления. Построим структурную схему управления подобного типа. Для этого необходимо задать эталонную модель:

$$W_{\text{эт}}(s) = \frac{1}{T_{\text{эт}}s + 1},$$

где $T_{\text{эт}}$ – эталонная временная характеристика аperiodического процесса, приблизительно соответствующая трети времени переходного процесса ($t_{п.п}/3$). В работе $T_{\text{эт}} = 0,7$.

На выходе эталонной модели образуется сигнал $\vartheta_{\text{эт}}$, соответствующий эталонному поведению угла тангажа. Разность между эталонным значением угла тангажа $\vartheta_{\text{эт}}$ и фактическим его значением ϑ обозначим как e :

$$e = \vartheta_{\text{эт}} - \vartheta.$$

Закон адаптации в этом случае формируется по следующей формуле:

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma \vartheta e,$$

где $\dot{\hat{\theta}}$ – скорость изменения адаптивного сигнала; Γ – коэффициент усиления адаптации. В работе $\Gamma = 0,07$.

Закон управления в рассматриваемом случае окончательно примет следующий вид:

$$\delta_b = k_{\vartheta} \left(\vartheta \dot{\hat{\theta}} \frac{1}{s} - \vartheta_s \right) + k_{\omega_z} \omega_z.$$

Структурная схема адаптивного управления на основе эталонной модели представлена на рис. 4. Результаты имитационного моделирования адаптивного регулирования угла тангажа БПЛА при отклоненных от номинального значения коэффициентах модели приведены на рис. 5. Регулируемый угол тангажа осуществляет высокочастотные колебания около эталонного значения угла тангажа (рис. 5, а). В свою очередь, адаптивный сигнал осуществляет аналогичные колебания вокруг единичного уровня (рис. 5, б).

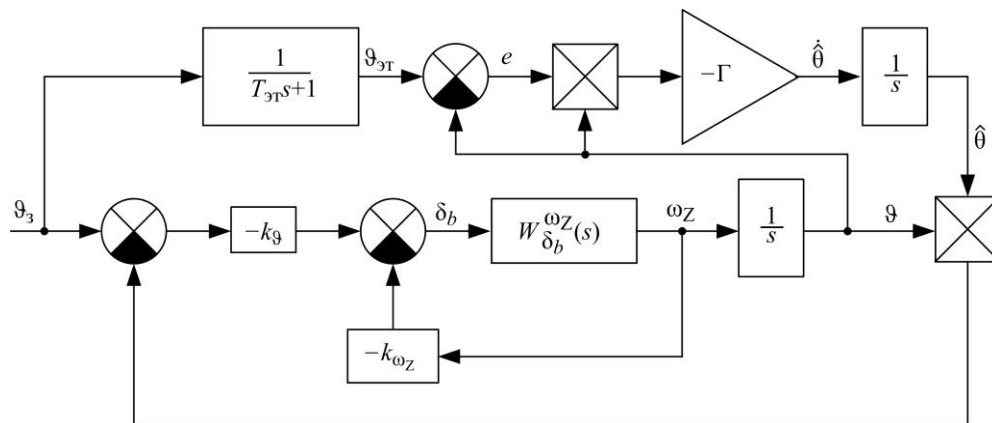


Рис. 4. Структурная схема адаптивного регулирования угла тангажа БПЛА на основе эталонной модели
 Fig. 4. Structural diagram of the UAV pitch angle model reference adaptive control

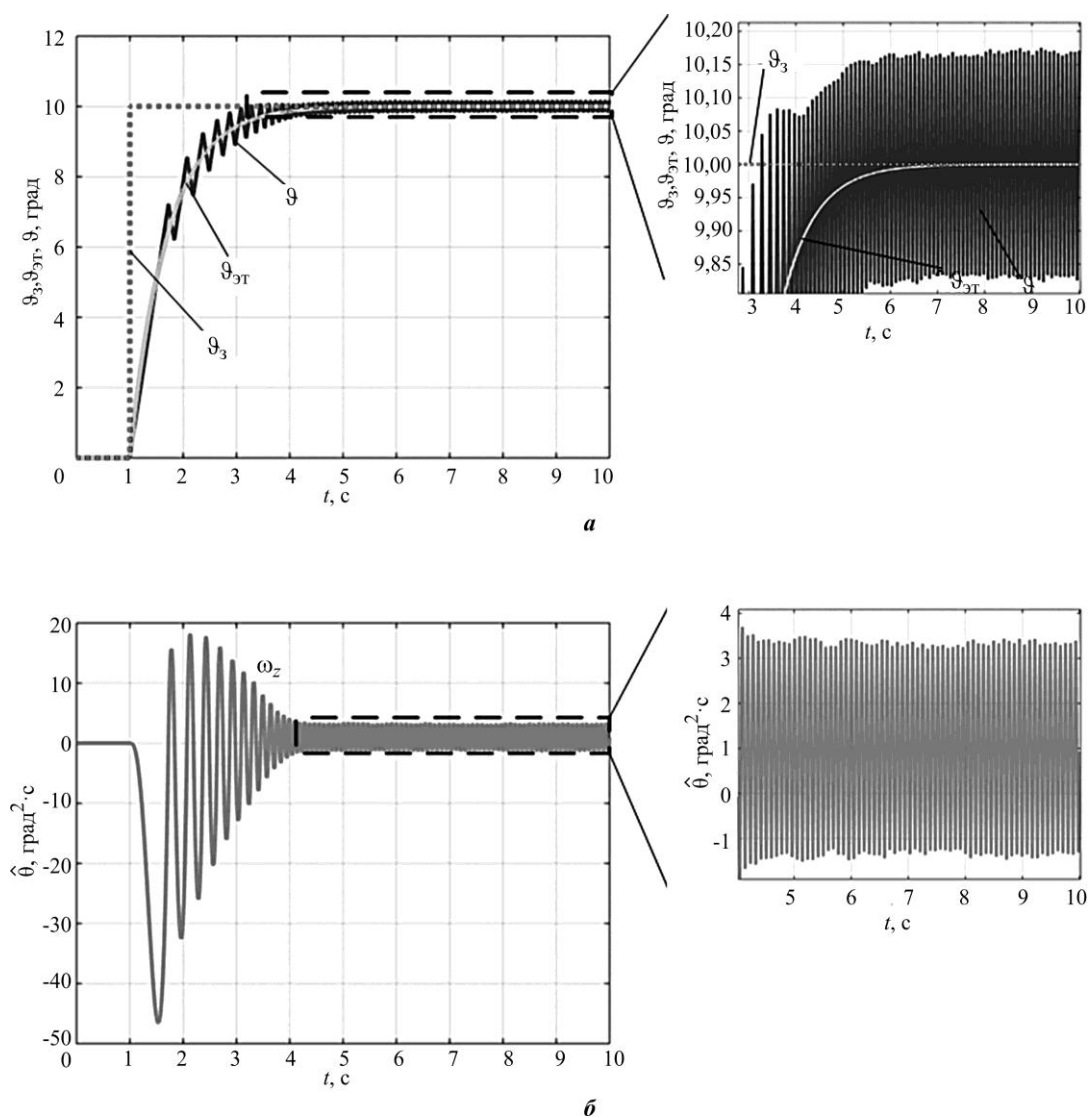


Рис. 5. Графики адаптивного регулирования: а – заданное ϑ_3 , эталонное $\vartheta_{\text{эт}}$ и фактическое ϑ значения угла тангажа; б – характер изменения адаптивного сигнала
 Fig. 5. Graphs of adaptive control: a – preset ϑ_3 , reference $\vartheta_{\text{эт}}$ and measured ϑ values of the pitch angle; b – the nature of the change in the adaptive signal

Необходимо отметить, что скорость адаптации должна превышать скорость изменения параметров объекта управления. В идеале ожидается, что адаптация будет правильно реагировать на все изменения начальных условий, эталонных входных данных и неопределенностей за счет быстрой идентификации набора управляющих параметров, обеспечивающих удовлетворительную реакцию системы [4]. Практика показывает, что быстрая адаптация приводит к высоким частотам управляющих сигналов и повышенной чувствительности к временным задержкам. Это, в свою очередь, ведет к потере устойчивости.

Таким образом, основной вопрос сводится к определению архитектуры, которая позволила бы адаптироваться с той максимально большой скоростью, при которой не наблюдаются потери надежности. С целью нивелирования высокочастотных колебаний осуществим фильтрацию управляющего сигнала с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) в виде апериодического звена:

$$W_{\text{ФНЧ}}(s) = \frac{1}{T_{\phi}s + 1},$$

где $T_{\phi} = 1/\omega_{\text{ср}} = 0,07$ – параметр фильтра, характеризующий полосу пропускания; $\omega_{\text{ср}}$ – частота среза.

Структурная схема адаптивного регулирования угла тангажа БПЛА с фильтрацией управляющего сигнала представлена на рис. 6. Результаты моделирования, согласно структурной схеме на рис. 6, приведены на рис. 7.

Фильтрация управляющего сигнала с помощью ФНЧ приводит к значительному подавлению высокочастотного колебания регулируемого параметра (рис. 7, а). До применения ФНЧ амплитуда колебания составляла около $0,15^\circ$, после фильтрации стала равной $0,015^\circ$. Следовательно, применение ФНЧ приводит к подавлению высокочастотных колебаний (в 10 раз). Аналогичная картина наблюдается на рис. 7, б, где колебания составляют 0,3 в единицах измерения адаптивного сигнала, что в 10 раз меньше колебаний на рис. 5, б.

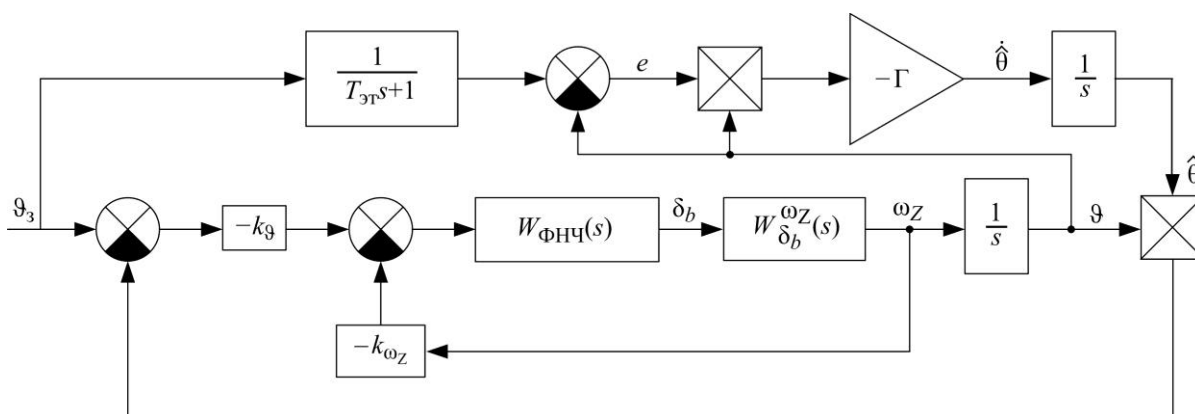


Рис. 6. Структурная схема адаптивного регулирования угла тангажа БПЛА на основе эталонной модели с фильтрацией управляющего сигнала
 Fig. 6. Block diagram of adaptive control UAV's pitch angle based on a reference model with filtering of the control signal

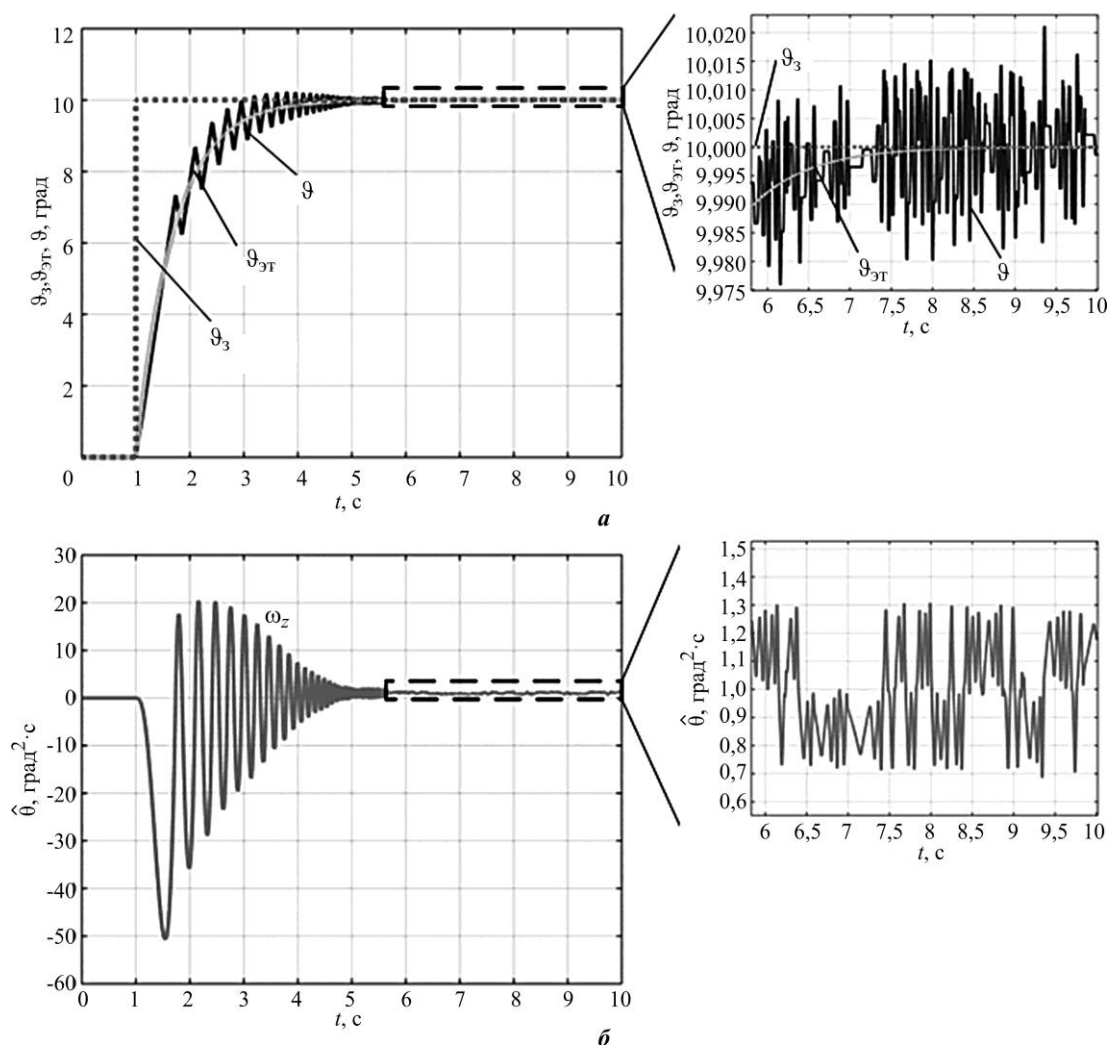


Рис. 7. Графики адаптивного регулирования с ФНЧ: а – заданное ϑ_3 , эталонное $\vartheta_{ЭТ}$ и фактическое ϑ значения угла тангажа; б – характер изменения адаптивного сигнала
 Fig. 7. Graphs of adaptive control with LPF: а – preset ϑ_3 , reference $\vartheta_{ЭТ}$ and measured ϑ values of the pitch angle; б – the nature of the change in the adaptive signal

Заключение. Адаптированная система управления позволяет компенсировать ошибку регулирования, вызванную изменением характеристик объекта управления: массы и момента инерции за счет выработки топлива и схода с пилона ракетного вооружения БПЛА; аэродинамических характеристик в результате обледенения, частично разрушения и т. д.

Адаптация на основе эталонной модели повышает качество регулирования, но приводит к наличию высокочастотной составляющей управляющего сигнала. Для уменьшения влияния высокочастотной составляющей управляющего сигнала необходимо введение дополнительного ФНЧ в канал управления.

Литература

1. Архипов А. В., Екантьев А. И., Еремеев Н. А., Федоров И. О. Разработка математической модели и исследование рулевого привода беспилотного летательного аппарата. М.: ИД Академии Жуковского, 2022. 160 с.
2. Рациональное управление объектами: теория и приложения / Е. В. Гавриленко, К. Ю. Дергачев, А. С. Кулик и др.; под общ. ред. А. С. Кулика. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2018. 308 с.

3. **Прокопьев И. В., Бецов А. В.** Структура системы управления беспилотных летательных аппаратов специального назначения // Тр. Международного симпозиума «Надежность и качество». 2012. Т. 1. С. 84–85.

4. **Oystein H. H.** L1 adaptive control of the inner control loops of an F-16 aircraft: MSc (Eng. Cybern.) diss. Trondheim, 2012. 151 p.

5. **Гусев А. Н.** Системы автоматического управления самолетом: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосмический ун-т, 2004. 137 с.

6. **Нестеров С. А.** Адаптивные системы управления: конспект лекций. СПб.: Ф-т технической кибернетики СПбГПУ, 2005. 90 с.

Статья поступила в редакцию 26.06.2022 г.; одобрена после рецензирования 15.07.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Архипов Алексей Владимирович – главный конструктор тематического направления АО «ЭЛАРА» (Россия, Чувашская Республика, 428017, г. Чебоксары, Московский пр-т, 40), аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), sgfan@mail.ru

Тимошенко 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. Arkhipov A. V., Ekant'yev A. I., Eremyev N. A., Fedorov I. O. *Unmanned aerial vehicle steering linkage mathematical model development and research*. Moscow, ID Akademii Zhukovskogo Publ., 2022. 160 p. (In Russian).

2. Gavrilenko E. V., Dergachev K. Yu., Krasnov L. A., Kulik A. S. (auth., gen. ed.), Kulik I. A., Martines Bastido J. P., Nemshilov Yu. A., Parshin A. P., Pasichnik S. N., Petrenko V. I., Chukhray A. G. *Rational object management: theory and applications*. Kharkiv, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, 2018. 308 p. (In Russian).

3. Prokop'yev I. V., Betskov A. V. Control structure of special purpose unmanned aerial vehicles. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma “Nadezhnost' i kachestvo” = Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality*, 2012, vol. 1, pp. 84–85. (In Russian).

4. Oystein H. H. *L1 adaptive control of the inner control loops of an F-16 aircraft*, MSc (Eng. Cybern.) diss. Trondheim, 2012. 151 p.

5. Gusev A. N. *Airplane robot-control systems*, study guide. Samara, Samara State Aerospace University, 2004. 137 p. (In Russian).

6. Nesterov S. A. *Adaptive control systems*, compendium of lectures. St. Petersburg, Faculty of Engineering Cybernetics of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2004. 90 p. (In Russian).

The article was submitted 26.06.2022; approved after reviewing 15.07.2022; accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Aleksey V. Arhipov – Chief Designer of the Thematic Direction JSC “ELARA” (Russia, Chuvash Republic, 428017, Cheboksary, Moskovsky prospect, 40), PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), sgfan@mail.ru

Sergey P. Timoshenkov – 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), spt111@mail.ru

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья
УДК 004.3-027.31
doi:10.24151/1561-5405-2022-27-5-664-675

Аппаратная реализация бит-поточковых устройств

О. И. Буренева, А. Д. Милакин, С. Э. Миронов

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, Россия*

oibureneva@etu.ru

Аннотация. Актуальность разработки бит-поточковых устройств обусловлена тенденцией переноса первичных преобразований измерительной информации максимально близко к датчикам. Сигналы датчиков часто представлены в квазицифровой (бит-поточковой) форме, допускающей реализацию функциональных преобразований в цифровой элементной базе с применением операций инкремент / декремент. В работе представлены результаты проектирования бит-поточковых устройств. На примере множително-делительного преобразователя рассмотрены особенности построения устройств со структурной реализацией функций, при которой передаточная функция формируется путем обработки битовых потоков методами малых приращений. Приведено математическое обоснование получения передаточной функции в состоянии динамического равновесия. Показан процесс достижения устройством динамического равновесия, полученный методом моделирования и иллюстрирующий работу компенсационных механизмов в устройстве. В качестве результата представлен вариант реализации устройства на ПЛИС с оценкой его временных характеристик и аппаратных затрат, проведено его сравнение с традиционным множително-делительным преобразователем, подтверждающее эффективность предложенного решения. Рассмотрен вариант проектирования заказных матричных бит-поточковых устройств. Для них разработаны основные элементы: прямой, реверсивный и комбинированный счетчики, изменяющие свое содержимое на целую степень двойки. Модули библиотеки построены с использованием оригинальных средств плотноупакованного иерархического сжатия топологии. Все модули представляют собой 4-разрядные секции счетчиков на основе различных вариантов реализации быстродействующих манчестерских цепей переноса. Это обеспечивает линейную зависимость времени задержки и площади на кристалле от разрядности схем. На текущем уровне разработки бит-поточковые устройства могут быть использованы в системах частотного контроля плавно изменяющихся параметров.

© О. И. Буренева, А. Д. Милакин, С. Э. Миронов, 2022

Ключевые слова: бит-поточковое устройство, множительно-делительное преобразование, ПЛИС, иерархическое сжатие топологии

Финансирование работы: работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России №075-01024-21-02 от 29.09.2021 (проект FSEE-2021-0014).

Для цитирования: Буренева О. И., Милакин А. Д., Миронов С. Э. Аппаратная реализация бит-поточковых устройств // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 664–675. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-664-675>

Original article

Hardware implementation of bitstream devices

O. I. Bureneva, A. D. Milakin, S. E. Mironov

Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, St. Petersburg, Russia

oibureneva@etu.ru

Abstract. The development of bitstream devices is important due to the tendency of moving the primary measuring converters as close as possible to the sensors. The output signals of sensors are often represented in quasi-digital (bitstreaming) form, it allows implementing functional transformations on the digital element base using increment/decrement operations. In this work, the results of the research in the field of designing bitstream devices are presented. By the example of designing a multiplier-divider the peculiarities of design of the devices with structural function implementation when the transfer function is formed by processing of bit streams using small increment methods are considered. A mathematical study of the transfer function in the state of dynamic equilibrium has been performed. The peculiarities of the process of reaching the state of dynamic equilibrium and the work of compensation mechanisms in the device by simulation are shown. As a result, a variant of device implementation on FPLD is presented. Time characteristics and hardware costs are estimated for this device. Comparison of the designed converter with a traditional multiplier-divider converter was carried out. The effectiveness of the proposed solution is shown. The design of custom matrix bitstream devices and developed basic elements for them is also considered. These elements are direct, reversible and combined counters that change their contents by a whole degree of two. The library modules were built using the original means of tightly packed hierarchical topology compression. All modules are 4-digit counter sections based on different implementations of fast Manchester transfer circuits. This allowed obtaining a linear dependence of the delay and on-chip area on the circuit digitization. At the current level of development bitstream devices can be used in systems of frequency control of smoothly changing parameters.

Keywords: bitstream device, multiplier-divider, bitstream conversion, FPLD, hierarchical layout compaction

Funding: the work has been supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. State task No. 075-01024-21-02 dated 29.09.2021 (project FSEE-2021-0014).

For citation: Bureneva O. I., Milakin A. D., Mironov S. E. Hardware implementation of bitstream devices. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 664–675. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-664-675>

Введение. В настоящее время активно разрабатываются бит-поточковые устройства (БПУ), что обусловлено тенденцией переноса первичных преобразований измерительной информации максимально близко к точкам ее получения [1, 2]. При этом большое количество датчиков представляют собой выходной сигнал в частотной или широтно-импульсно-модулированной (ШИМ) форме за счет либо непосредственного преобразования измеряемой величины в поток импульсов единичной амплитуды [3], либо специализированных преобразователей аналогового сигнала в частотную форму [4]. Такие квазицифровые сигналы занимают промежуточное положение между цифровыми и аналоговыми и допускают обработку с использованием аналоговых принципов на цифровой элементной базе [5]. Цифровые БПУ осуществляют вычислительную обработку битовых потоков без изменения формы представления информации. Ввиду обработки единичных битов БПУ могут выполнять преобразования в базе простых операций, обеспечивая при этом высокую отказоустойчивость [6].

В отличие от работ [5–7], посвященных математическим принципам реализации вычислительного процесса и структурной организации БПУ, в настоящей работе представлены результаты проектирования БПУ, изложены аспекты их аппаратной реализации.

Архитектурные особенности бит-поточковых устройств. Общая структура БПУ рассмотрена в работе [7]. Устройство обрабатывает импульсные потоки F и потоки ШИМ-сигналов Θ единичной амплитуды. Для задания масштабных коэффициентов и констант в аппроксимирующих выражениях могут использоваться двоичные коды N .

Рассмотрим процессы, протекающие в БПУ, на примере реализации множительно-делительного преобразования:

$$N_{out} = \frac{N\Theta_1}{\Theta_2}, \quad (1)$$

где N и N_{out} – входной и выходной двоичные коды соответственно; Θ_1 и Θ_2 – ШИМ-сигналы.

Схема множительно-делительного устройства приведена на рис. 1.

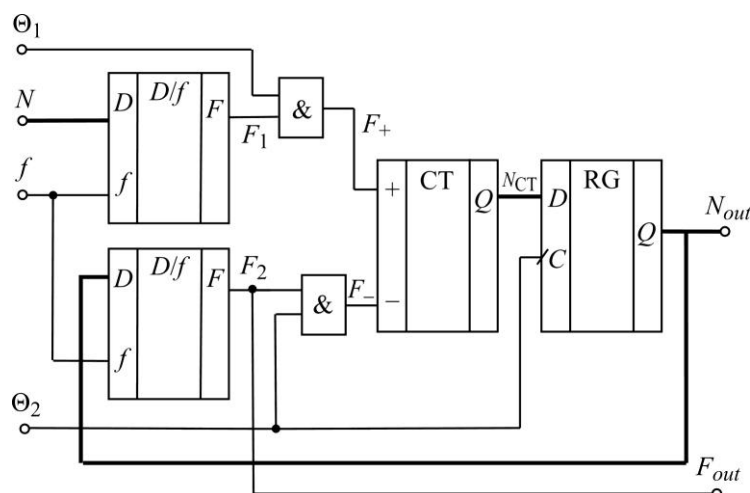


Рис. 1. Функциональная схема бит-поточкового устройства
Fig. 1. Functional circuit of the bitstream device

Делители частоты D/f на основе кодов N и N_{out} формируют потоки единичных импульсов F_1 и F_2 , средние значения которых за период работы устройства описываются выражениями

$$\overline{F_1} = \frac{Nf}{2^n}, \quad \overline{F_2} = \frac{N_{out}f}{2^n},$$

где f – опорная частота; n – разрядность устройства.

Элементы & обеспечивают умножение ШИМ-сигналов Θ_1 и Θ_2 на потоки F_1 и F_2 соответственно, формируя положительный F_+ и отрицательный F_- потоки устройства со следующими средними значениями:

$$\overline{F_+} = \overline{F_1}\Theta_1 = \frac{Nf\Theta_1}{2^n}, \quad \overline{F_-} = \overline{F_2}\Theta_2 = \frac{N_{out}f\Theta_2}{2^n}.$$

Импульсы битовых потоков F_+ и F_- поступают на суммирующий и вычитающий входы реверсивного счетчика СТ. Используя операции инкремент / декремент, счетчик выполняет вычитание битовых потоков F_+ и F_- , интегрирование полученной разности и выдает результат в виде двоичного кода $N_{СТ}$. Устройство замкнуто обратной связью, которая реализует компенсационный механизм и обеспечивает достижение состояния динамического равновесия. Это состояние характеризуется одинаковой интенсивностью потоков F_+ и F_- , т. е. в течение периода количество импульсов в этих потоках одинаково:

$$\frac{Nf\Theta_1}{2^n} = \frac{N_{out}f\Theta_2}{2^n}. \quad (2)$$

Из равенства (2) можно получить функцию устройства. Значение накопленной разности фиксируется регистром RG в момент окончания периода работы устройства и представляет собой код N_{out} – результат выполнения операции в соответствии с формулой (1). Выход делителя D/f , установленного в цепи обратной связи, можно рассматривать как дополнительный выход устройства, представляющий собой результат множително-делительной операции в бит-поточковой форме $\overline{F_{out}} = \overline{F_2}$.

Для оценки работоспособности БПУ подготовлено описание его элементов на языках VHDL и VerilogHDL, разработан TestBench и проведена симуляция проекта с использованием системы моделирования ModelSim Altera. На рис. 2 показана временная диаграмма работы устройства, на которой можно наблюдать процесс достижения состояния динамического равновесия.

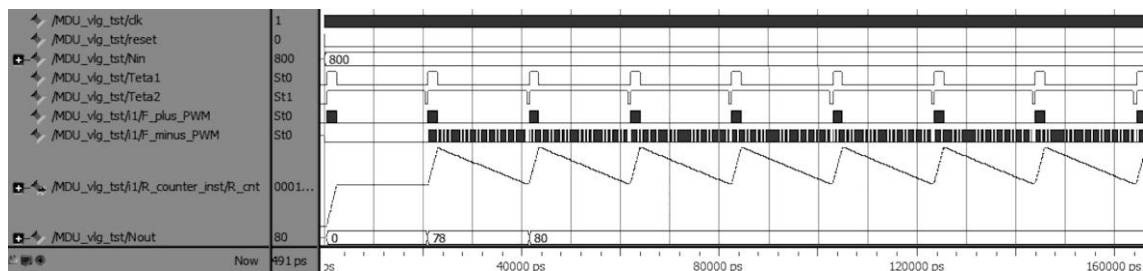


Рис. 2. Результат моделирования бит-поточкового устройства
 Fig. 2. Simulation result of a bitstream device

БПУ принимает на вход следующие сигналы: сигнал опорной частоты clk , входной двоичный код N_{in} , ШИМ-сигналы $Teta1$ и $Teta2$. Результат работы представлен кодом N_{out} . Разрядность устройства n задается как параметр, и для представленной модели $n = 10$. Дополнительно на диаграмме выведены сигналы F_plus_PWM и F_minus_PWM , положительный F_+ и отрицательный F_- битовые потоки устройства, а также код, формирующийся в реверсивном счетчике R_cnt . На первом периоде работы устройства сигнал в отрицательной обратной связи не формируется, что обусловлено начальным нулевым значением выходного кода, импульсы присутствуют только в положительной цепи устройства. На втором – возникают импульсы и в отрицательной цепи, эти импульсы компенсируют входное воздействие. На третьем периоде количество импульсов, пришедших на суммирующий и вычитающий входы реверсивного счетчика, одинаковое. Состояние реверсивного счетчика постоянно изменяется, но к концу периода фиксируется значение, соответствующее результату выполняемой операции. В приведенном примере соотношение $\Theta_1/\Theta_2 = 1/10$. В конце первого периода работы устройства сформирован код N_{out} , составляющий 0,975 от реального результата преобразования, в конце второго – достигнут результат преобразования.

Реализация бит-потокowego устройства на базе ПЛИС. Рассматриваемое БПУ спроектировано в цифровом элементном базисе, не требует применения специализированных умножителей, поэтому может быть имплементировано в ПЛИС как CPLD, так и FPGA. Дополнительно в HDL-описание БПУ введен библиотечный модуль PLL (Phase Locked Loop), изменяющий фазу опорной частоты для исключения одновременного поступления сигналов «инкремент» и «декремент» на вход реверсивного счетчика. Компиляция HDL-проекта, выполненная в САПР Quartus Prime 18.0 Lite Edition, подтвердила синтезируемость программного описания. RTL-схема БПУ приведена на рис. 3. Проведена симуляция проекта с использованием системы моделирования ModelSimAltera с учетом временных задержек, полученных по результатам компиляции проекта в САПР Quartus. Аппаратные затраты микросхемы 10CL006YE144C6G семейства Cyclone 10 LP, требуемые для реализации проекта, приведены в таблице.

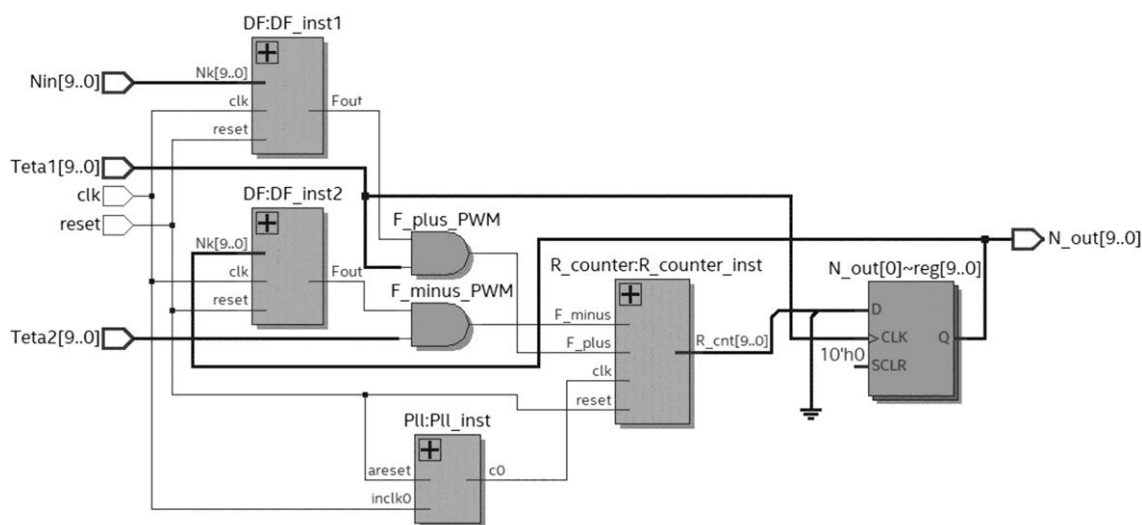


Рис. 3. RTL-схема бит-потокowego устройства
Fig. 3. RTL diagram of a bitstream device

Оценка аппаратных затрат на бит-поточковую реализацию
Hardware cost estimation for bitstream devices implementation

Параметр	Разрядность, бит				
	8	10	12	14	16
Логические ячейки	56	70	77	93	105
Регистры	48	60	72	84	96
Логические ячейки в нормальном режиме	27	33	35	41	45
Логические элементы в нормальном режиме	19	25	31	37	43

Для оценки временных характеристик устройства использовали временной анализатор Time Quest Timing Analyzer. Определено значение максимально допустимой опорной частоты clk : $F_{max} = 250,0$ МГц. Период работы устройства при 10 разрядах составляет 4,096 мкс.

Сравнение бит-поточковой реализации функции (1) и традиционной, основанной на преобразовании битовых потоков в двоичные коды с последующим выполнением преобразований на встроенных арифметических блоках, приведено в работе [7]. В обоих случаях выявлена практически линейная зависимость аппаратных затрат от разрядности устройства. При этом аппаратные затраты на реализацию традиционного матричного вычислительного устройства по логическим ячейкам значительно превышают затраты на БПУ. Очевидно, что традиционная конвейерная реализация множителе-делительной операции приведет к еще большему увеличению аппаратных затрат в части регистров. Также при традиционной реализации вычислений потребуются дополнительные аппаратные ресурсы для преобразований импульсных потоков, получаемых от сенсоров, в двоичные коды, что еще увеличит разницу в аппаратных затратах в пользу бит-поточковых реализаций.

Таким образом, выполнение множителе-делительной операции в бит-поточковой форме является более экономичным по сравнению с традиционными матричными реализациями с точки зрения аппаратных затрат.

Основным недостатком бит-поточковых преобразований является наличие переходного процесса – достижение режима динамического равновесия, что обусловлено срабатыванием компенсационных механизмов, реализуемых отрицательной обратной связью. Однако при достижении равновесия БПУ переходит в режим отслеживания и удерживает результат и при возникновении кратковременных помех будет стремиться скомпенсировать их [6]. БПУ работает циклически, и период его работы определяется разрядностью n и опорной частотой f , значение которой, как правило, максимально приближено к предельной частоте работы ПЛИС, что достигается за счет коротких комбинационных цепочек в схеме. При больших разрядностях (для $n > 16$) период может иметь значения, достигающие нескольких десятков микросекунд, что делает невозможным применение БПУ для обработки быстроизменяющихся сигналов. Если преобразуемый сигнал изменяется медленно, что может наблюдаться, например, при измерении температуры или скорости вращения, то использование бит-поточковых преобразователей будет эффективно. Рассмотренная реализация на ПЛИС представляет собой законченное устройство, готовое для внедрения в системы мониторинга.

Топологическая реализация бит-поточковых устройств. Архитектура БПУ, проверенная в ходе модельных экспериментов, а также ее аппаратное прототипирование на ПЛИС позволяют перейти к проектированию заказных специализированных матричных БПУ.

БПУ характеризуются однородностью структуры. Это обусловлено тем, что их основными элементами являются счетчики. Инкрементирующие счетчики лежат в основе делителей частоты [8], реверсивные счетчики используются как устройства сравнения битовых потоков и как интеграторы их разности. Таким образом, при больших тиражах реализация БПУ в виде заказных устройств эффективна.

Существует множество схемотехнических реализаций счетчиков. В данном случае основным предъявляемым к счетчикам требованием является высокое быстродействие, поэтому за основу при разработке библиотеки различающихся по быстродействию и аппаратным затратам схемных решений взяты принципы построения манчестерских цепей переноса на двухтранзисторных проходных ключах. Это обеспечило не только высокое быстродействие при приемлемых аппаратных затратах, но и линейную зависимость времени задержки и площади на кристалле от разрядности схем.

Библиотека счетчиков строится на основе манчестерских цепей с разным способом ускорения переноса. В состав библиотеки входят три типа счетчиков: прямой, реверсивный и комбинированный, изменяющие в каждом такте свое содержимое на целую степень двойки (соответственно на « $+2^k$ », « -2^k », « $\pm 2^k$ », где k принадлежит множеству натуральных чисел). Все модули библиотеки строятся по общим принципам организации топологии, что гарантирует при сборке топологии вычислителя из разных счетчиков отсутствие в ней пустот. Все модули представляют собой 4-разрядные секции счетчиков. Разрядность секций связана с оптимальным по задержке вариантом реализации манчестерских цепей переноса.

В качестве примера, иллюстрирующего принципы топологической организации БПУ, на рис. 4 приведен топологический чертеж 4-разрядной секции множительно-делительного устройства. Для построения вычислителя с нужной разрядностью осуществляется матрицирование 4-разрядной секции по вертикали с соответствующим коэффициентом матрицирования. Реализуемая вычислителем функция определяется числом и типом счетчиков, объединяемых по горизонтали.

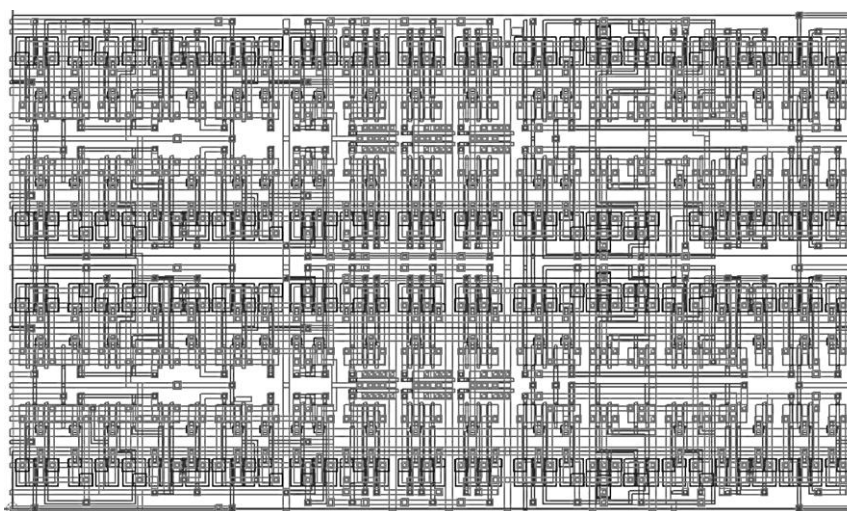


Рис. 4. Пример топологии множительно-делительного бит-поточкового устройства (4-разрядная секция)

Fig. 4. Example of bitstream multiplier-divider layout (4-bit section)

Помимо реализуемой функции, быстродействия и аппаратных затрат возможен выбор проектных норм, адаптация к которым разрабатываемой схемы выполняется оригинальной системой иерархического сжатия [9–11]. Она обеспечивает высокую плотность упаковки благодаря эффективным алгоритмам индивидуального согласования ячеек по габаритам и положению выводов при сборке иерархического устройства.

Рассмотренный способ обработки потоковой информации не требует большой площади на кристалле, в то время как традиционное использование в вычислительной технике конвейерных матричных вычислителей характеризуется чрезвычайно высокими аппаратными затратами. Однако по сравнению с БПУ конвейерные матричные вычислители могут обрабатывать не только плавно, но и скачкообразно изменяющиеся данные. Поскольку в течение продолжительного времени альтернативы этим высокопроизводительным схемам не было, с основным их недостатком боролись путем их структурно-топологического преобразования. На рис. 5 представлены результаты таких преобразований, осуществленных в соответствии с методикой оптимизации регулярных иерархических фрагментов БИС, изложенной в работе [12]. Для конвейерных матричных вычислителей с поразрядной конвейеризацией (матричного умножителя фирмы AT&T Bell Laboratories [13–15] и матричного делителя) площадь схем на кристалле удалось уменьшить примерно на 35 %.

Если схемы переноса в сумматорах и счетчиках строить с использованием одинаковых схемных решений, то размер всего бит-поточкового делителя будет сравним с размером одной строки конвейерного делителя. На рис. 6 приведены топологии конвейерного матричного и бит-поточкового множително-делительных устройств. Следует отметить, что соотношение временных параметров конвейерных матричных вычислителей и БПУ будет зависеть от характера распространения сигналов в конвейерных устройствах, определяемого алгоритмом вычисления.

Из схем на рис. 5 следует, что в конвейерном матричном умножителе тактовая частота определяется суммой времен задержек конвейерного триггера и одноразрядного сумматора. В конвейерном матричном делителе, где действия в текущей строке зависят от знака остатка в предыдущей строке, тактовая частота определяется суммой времен задержек конвейерного триггера, мультиплексора и в основном многоразрядного сумматора. Принимая во внимание, что в БПУ период определяется задержками конвейерного триггера и многоразрядного счетчика, можно утверждать, что если тактовые частоты конвейерного матричного вычислителя и БПУ деления приблизительно равны, то конвейерный матричный умножитель работает с большей частотой.

Таким образом:

– у БПУ тактовая частота сравнима с тактовой частотой традиционных конвейерных матричных вычислителей, которые строятся на основе алгоритмов с последовательным распространением переноса в строке матрицы, и существенно уступает тактовой частоте конвейерных вычислителей, в которых сигналы переносов передаются из строки в строку;

– у сложных вычислителей на основе нескольких поочередно срабатывающих конвейерных матричных устройств тактовая частота определяется минимальной из частот этих устройств.

Отметим, что при построении сложных вычислительных устройств путем объединения конвейерных матричных вычислителей в цепь из последовательно срабатывающих модулей тактовая частота будет определяться как минимальная из их частот.

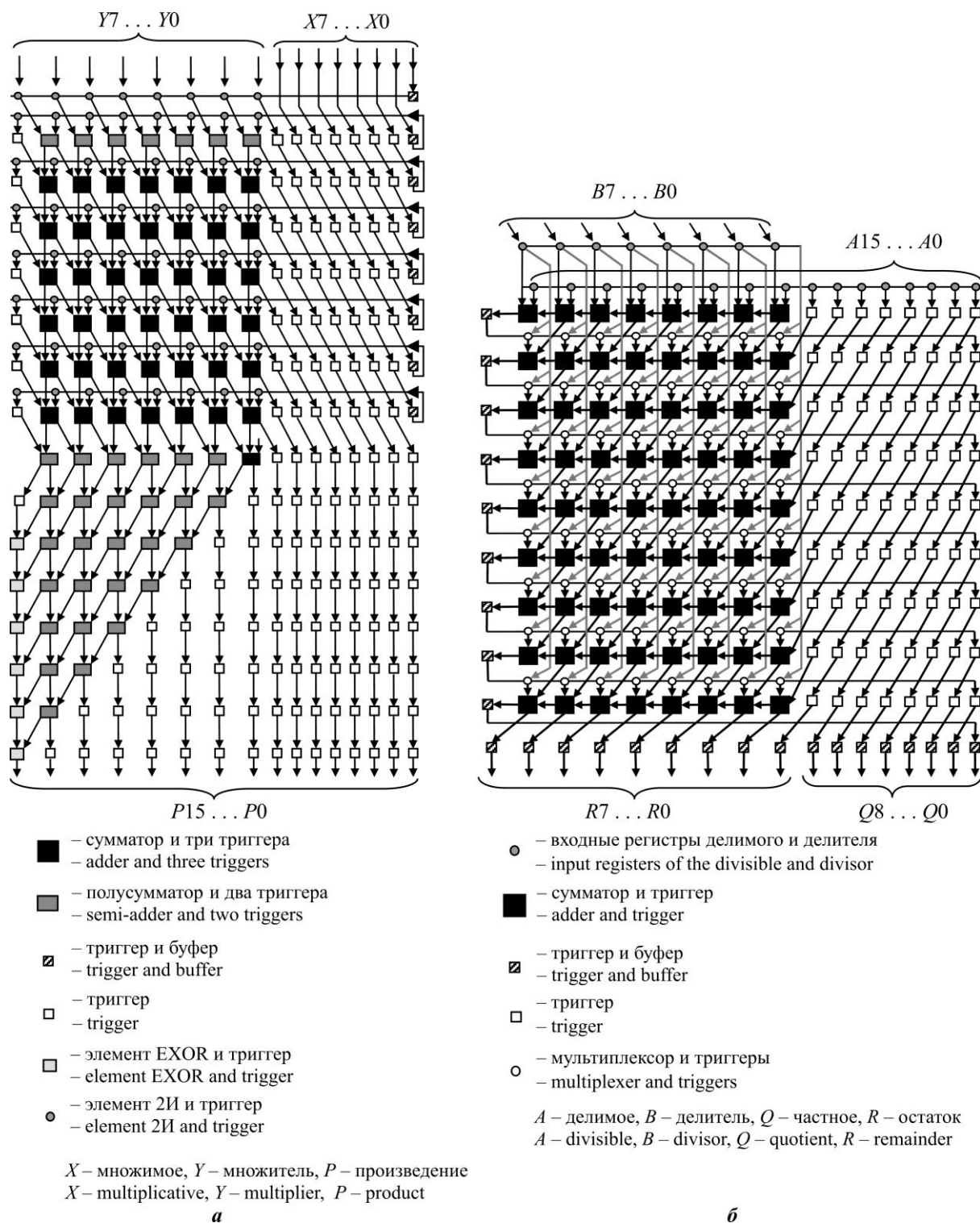


Рис. 5. Структурно-топологические схемы матричного умножителя (а) и делителя (б) с поразрядной конвейеризацией
 Fig. 5. Structural-layout diagrams of matrix multiplier (a) and divider (b) with bitwise pipelining



Рис. 6. Топологии множително-делительных устройств ($8 \times 8 \times 8$): конвейерного (а) и бит-поточкового (б)

Fig. 6. Layout of the multiplier-divider ($8 \times 8 \times 8$): pipeline (a) and bitstream devices (b)

Заклучение. Представленная архитектура БПУ имеет следующие преимущества: позволяет реализовывать вычислительные преобразования в базе операций инкремент / декремент, обеспечивая при этом минимизацию аппаратных затрат; осуществляет вычисления при плавном отслеживании входного сигнала, подавляя кратковременные помехи и нейтрализуя сбои за счет отрицательной обратной связи; основана на использовании простых цифровых элементов и легко имплементируется в ПЛИС; за счет регулярной структуры позволяет получать эффективные легко масштабируемые топологические решения при реализации в виде заказных интегральных схем. Усложнение реализуемой функции незначительно повышает сложность как функциональной, так и топологической реализации конечного БПУ.

Недостатком БПУ является наличие переходного процесса до достижения режима динамического равновесия, а также периодичность работы, линейно зависящая от разрядности. При этом длительность переходного процесса может быть минимизирована различными корректирующими функциями, вносимыми в цепь обратной связи, что является предметом дальнейших исследований. При достижении режима динамического равновесия устройства отслеживают и обрабатывают биты потока с высокой тактовой частотой, определяемой задержкой срабатывания счетчиков.

На текущем уровне разработки БПУ могут быть использованы для вычислительных преобразований в системах частотного контроля плавно изменяющихся параметров.

Литература

1. Zhou F., Chai Y. Near-sensor and in-sensor computing // Nature Electronics. 2020. Vol. 3 (11). P. 664–671. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-00501-9>
2. Najafi M. H., Faraji S. R., Bazargan K., Lilja D. Energy-efficient pulse-based convolution for near-sensor processing // 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Seville: IEEE, 2020. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISCAS45731.2020.9181248>
3. Kirianaki N., Yurish S., Shpak N., Deynega V. Data acquisition and signal processing for smart sensors. Chichester: John Wiley & Sons, 2002. 320 p. <https://doi.org/10.1002/0470846100>
4. Arbet D., Kováč M., Stopjaková V., Potočný M. Voltage-to-frequency converter for ultra-low-voltage applications // 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Opatija: IEEE, 2019. P. 53–58. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8756910>
5. Zrilic D. G. Functional processing of delta-sigma bit-stream. Cham: Springer, 2020. XV, 113 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47648-9>
6. Gulin A. I., Safyannikov N. M., Bureneva O. I., Kaydanovich A. Y. Assurance of fault-tolerance in bit-stream computing converters // 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Kazan: IEEE, 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2018.8524812>

7. Буренева О. И., Милакин А. Д., Миронов С. Э. Архитектура и структурно-топологические особенности бит-поточковых устройств // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 3. С. 122–129. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-3-122-129>

8. Пат. 2752485 РФ. Делитель частоты с переменным коэффициентом деления / О. И. Буренева, Н. М. Сафьянников; заявл. 03.12.2020; опубл. 28.07.2021, Бюл. № 22. 17 с.

9. Миронов С. Э., Васильев А. Ю., Сафьянников Н. М. Средства автоматизации иерархического проектирования сложных микроэлектронных схем при неопределенности проектных норм // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 3. С. 60–67. <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-60-67>

10. Миронов С. Э., Андреев Л. Е., Зибарев К. М. Технология комплексной параметризации топологических проектов регулярных макроблоков СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 3. С. 35–40. doi: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-3-35-40>

11. Mironov S. E., Zibarev K. M. Management of layout matching of objects of complex microelectronic systems with uncertainty of design rules // 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS). St. Petersburg: IEEE, 2019. P. 69–73. <https://doi.org/10.1109/CTS48763.2019.8973275>

12. Миронов С. Э., Сафьянников Н. М., Фролкин А. К. Методика структурно-топологической оптимизации регулярных макроблоков СБИС // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 1. С. 17–23.

13. Patent 4887233 US. Pipeline arithmetic adder and multiplier / G. L. Gash, M. Hatamian, A. Ligtenberg; assignees: American Telephone and Telegraph Company, AT&T Bell Laboratories; filed: 31.03.1986; publ.: 12.12.1989.

14. Hatamian M., Gash G. L. A 70-MHz 8-bit/spl times/8-bit parallel pipelined multiplier in 2.5-/spl mu/m CMOS // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1986. Vol. 21. No. 4. P. 505–513. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1986.1052564>

15. Hatamian M., Gash G. L. Parallel bit-level pipelined VLSI designs for high-speed signal processing // Proceedings of the IEEE. 1987. Vol. 75. No. 9. P. 1192–1202. <https://doi.org/10.1109/PROC.1987.13872>

Статья поступила в редакцию 23.03.2022 г.; одобрена после рецензирования 05.05.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Буренева Ольга Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), oibureneva@etu.ru

Миронов Сергей Эльмарович – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), semironov@etu.ru

Милакин Александр Дмитриевич – магистрант кафедры вычислительной техники Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5), milakins.s98@gmail.com

References

1. Zhou F., Chai Y. Near-sensor and in-sensor computing. *Nature Electronics*, 2020, vol. 3 (11), pp. 664–671. <https://doi.org/10.1038/s41928-020-00501-9>
2. Najafi M. H., Faraji S. R., Bazargan K., Lilja D. Energy-efficient pulse-based convolution for near-sensor processing. *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Seville, IEEE, 2020, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISCAS45731.2020.9181248>
3. Kirianaki N., Yurish S., Shpak N., Deynega V. *Data acquisition and signal processing for smart sensors*. Chichester, John Wiley & Sons, 2002. 320 p. <https://doi.org/10.1002/0470846100>

4. Arbet D., Kováč M., Stopjaková V., Potočný M. Voltage-to-frequency converter for ultra-low-voltage applications. *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. Opatija, IEEE, 2019, pp. 53–58. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8756910>
5. Zrilic D. G. *Functional processing of delta-sigma bit-stream*. Cham, Springer, 2020. xv, 113 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47648-9>
6. Gulin A. I., Safyannikov N. M., Bureneva O. I., Kaydanovich A. Y. Assurance of fault-tolerance in bit-stream computing converters. *2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Kazan, IEEE, 2018, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2018.8524812>
7. Bureneva O. I., Milakin A. D., Mironov S. E. Architecture and structural-topological features of bit-stream devices. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2021, no. 3, pp. 122–129. (In Russian). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-3-122-129>
8. Bureneva O. I., Safyannikov N. M. *Frequency divider with variable division coefficient*. Patent 2752485 RF, publ. 28.07.2021, Bul. no. 22. 17 p. (In Russian).
9. Mironov S. E., Vasiliyev A. Yu., Safyannikov N. M. Means of automating the hierarchical design of complex microelectronic circuits with uncertainty of design rules. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2018, no. 3, pp. 60–67. (In Russian). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-3-60-67>
10. Mironov S. E., Andreev L. E., Zibarev K. M. Complex parameterization technology for topological projects of regular VLSI macroblocks. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2020, no. 3, pp. 35–40. (In Russian). <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-3-35-40>
11. Mironov S. E., Zibarev K. M. Management of layout matching of objects of complex microelectronic systems with uncertainty of design rules. *2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS)*. St. Petersburg, IEEE, 2019, pp. 69–73. <https://doi.org/10.1109/CTS48763.2019.8973275>
12. Mironov S. E., Safyannikov N. M., Frolkin A. K. Methodic of structural and topological optimization regular VLSI macro-blocks. *Izv. SPbGETU "LETI"*, 2015, no. 1, pp. 17–23. (In Russian).
13. Gash G. L., Hatamian M., Ligtenberg A. *Pipeline arithmetic adder and multiplier*. Patent 4887233 United States, filed 31.03.1986, publ. 12.12.1989.
14. Hatamian M., Gash G. L. A 70-MHz 8-bit/spl times/8-bit parallel pipelined multiplier in 2.5-/spl mu/m CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1986, vol. 21, no. 4, pp. 505–513. <https://doi.org/10.1109/JSSC.1986.1052564>
15. Hatamian M., Gash G. L. Parallel bit-level pipelined VLSI designs for high-speed signal processing. *Proceedings of the IEEE*, 1987, vol. 75, no. 9, pp. 1192–1202. <https://doi.org/10.1109/PROC.1987.13872>

The article was submitted 23.03.2022; approved after reviewing 05.05.2022;
accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Olga I. Bureneva – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Computer Science and Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), oibureneva@etu.ru

Sergey E. Mironov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Computer Science and Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), semironov@etu.ru

Alexander D. Milakin – Master's degree student of the Computer Science and Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), milakins.s98@gmail.com

Экспериментальный анализ многомерно-матричного подхода к построению маршрутов в графе

С. А. Морозов, В. И. Мунерман, В. А. Симаков

Смоленский государственный университет, г. Смоленск, Россия

vitoon@gmail.com

Аннотация. Алгоритмы вычисления весов маршрутов между всеми парами вершин графа имеют полиномиальную вычислительную сложность. Однако построение самих маршрутов относится к классу NP. Эвристические алгоритмы, позволяющие снизить вычислительную сложность этой задачи, как правило, требуют тщательного статистического анализа для доказательства их эффективности, ориентированы на конкретные типы графов, и для их параллельной реализации необходимы искусственные приемы. В работе проведен основанный на алгебре многомерных матриц экспериментальный анализ подхода к построению маршрутов в графе. Предложенный подход, основанный на $(1, 0)$ -свернутом произведении многомерных матриц, позволяет находить все возможные маршруты в графе, реализовывать параллельные вычисления в силу присущего алгебре матриц естественного параллелизма. Кроме того, поскольку алгебра многомерных матриц в условиях задачи построения маршрутов изоморфна реляционной алгебре, показана возможность параллельной реализации работы с разреженными матрицами с использованием технологии баз данных. Приведен экспериментальный анализ реализации предложенного подхода на основе разработанного в среде программирования с использованием C++ программного обеспечения и средств реляционных баз данных PostgreSQL и Microsoft SQL Server. Предложенный подход позволяет устанавливать точное соответствие между моделью данных и моделью вычислений.

Ключевые слова: графы, маршруты в графе, многомерные матрицы, параллельные вычисления

Для цитирования: Морозов С. А., Мунерман В. И., Симаков В. А. Экспериментальный анализ многомерно-матричного подхода к построению маршрутов в графе // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 5. С. 676–686. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-676-686>

Original article

Experimental analysis of multidimensional matrix approach to constructing routings in a graph

S. A. Morozov, V. I. Munerman, V. A. Simakov

Smolensk State University, Smolensk, Russia

vimoon@gmail.com

Abstract. The algorithms for calculating the weights of routes between all pairs of graph vertices have polynomial computational complexity. However, the construction of routings belongs to the NP class. Heuristic algorithms allowing the reduction of this problem's computational complexity usually require careful statistical analysis to prove their effectiveness, are focused on specific types of graphs, and artificial tricks are needed for their parallel implementation. In this work, the analysis based on the multidimensional matrices algebra of an approach to constructing routings in a graph is conducted. The proposed approach based on the $(1, 0)$ -convoluting product of multidimensional matrices makes it possible to find all possible routes in the graph and allows parallel computing due to the natural parallelism inherent in matrix algebra. In addition, because multidimensional matrices algebra is isomorphic to relational algebra in the context of the routing problem, the possibility of parallel implementation of work with sparse matrices using database technology has been shown. An experimental analysis of the proposed approach implementation on the base of software developed in the programming environment based on C++, and by means of relational databases PostgreSQL and Microsoft SQL Server, is given. The proposed approach makes it possible to set up one-to-one correspondence between data model and computational model.

Keywords: graphs, graph routings, multidimensional matrices, parallel computing

For citation: Morozov S. A., Munerman V. I., Simakov V. A. Experimental analysis of multidimensional matrix approach to constructing routings in a graph. *Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 676–686. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-5-676-686>

Введение. Эффективное решение проблемы построения маршрутов в графе актуально для многих предметных областей: от транспортных задач, проектирования различных сетей, аналитики на основе больших данных до химии и биологии [1–6]. В отличие от задач расчета стоимости маршрутов, которые решаются полиномиальными алгоритмами, задача построения самих маршрутов относится к числу NP-полных задач. Для того чтобы время решения этой задачи было реальным, как правило, используются различные эвристические алгоритмы [7, 8]. Однако такой подход имеет следующие недостатки: необходимы доказательства, что он дает либо точное, либо наиболее приближенное к точному решение задачи; очень часто привязан к конкретной предметной области, т. е. недостаточно универсален и при привязке эвристических алгоритмов к современным параллельным вычислительным системам требует применения искусственных приемов, часто достаточно сложных.

В настоящей работе предлагается один из способов ускорения решения задачи построения маршрутов в графе, который основан на эффективном использовании парал-

лельных вычислений. Распараллеливание эффективно лишь в случае, когда структуры данных и алгоритмы их обработки в наибольшей степени соответствуют архитектуре вычислительной системы. В этом смысле алгебра многомерных матриц, в которой представления данных и алгоритмы операций обладают естественным параллелизмом, в наибольшей степени соответствует архитектуре параллельных программно-аппаратных комплексов. Кроме того, эта алгебра в условиях задачи построения маршрутов изоморфна реляционной алгебре, что позволяет также эффективно использовать машины баз данных.

В работе [9] показано, что использование алгебры многомерных матриц позволяет построить все маршруты в графе, возводя его матрицу смежности (для нагруженного графа – матрицу весов ребер) в так называемую $(1, 0)$ -свернутую степень. Цель настоящей работы – показать на основе экспериментальных данных, что параллельная реализация алгоритмов $(1, 0)$ -свернутого произведения многомерной матрицы на двумерную матрицу смежности (весов) позволяет эффективно решать задачу построения всех маршрутов в графе.

Основные понятия алгебры многомерных матриц. Приведем определение многомерной матрицы и операции (λ, μ) -свернутого произведения многомерных матриц в том виде, в котором оно дано автором теории многомерных матриц Н.П. Соколовым, и сделаем некоторые расширения и уточнения, ориентированные на реализацию алгоритмов построения маршрутов в графе и параллельную их реализацию.

Многомерная матрица определяется как система $(n_1 \times \dots \times n_p)$ элементов $A_{i_1 \dots i_p}$ ($i_\alpha = 1, \dots, n_\alpha, \alpha = 1, \dots, p$), расположенных в точках p -мерного пространства, определяемых координатами i_1, \dots, i_p , и обозначается $A = \parallel a_{i_1 \dots i_p} \parallel$ [10]. В [11] показано, что элементы матриц могут быть произвольных типов. К ним предъявляется единственное требование: в типе должны быть определены две бинарные операции, одна из которых трактуется как аддитивная, а другая – как мультипликативная.

Для решения поставленной задачи потребуется один частный случай операции умножения многомерных матриц. Приведем общее определение этой операции [12, 13].

Пусть даны p -мерная матрица $A = \parallel a_{i_1 \dots i_p} \parallel$ и q -мерная матрица $B = \parallel b_{i_1 \dots i_p} \parallel$. Можно разбить совокупности индексов i_1, \dots, i_p и i_1, \dots, i_q на четыре группы, содержащие соответственно κ, λ, μ и ν индексов ($\kappa, \lambda, \mu, \nu \geq 0$). Причем $\kappa + \lambda + \mu = p$, а $\lambda + \mu + \nu = q$. Разбиение порождает четыре группы индексов: $l = (l_1, \dots, l_\kappa)$, $s = (s_1, \dots, s_\lambda)$, $c = (c_1, \dots, c_\mu)$ и $m = (m_1, \dots, m_\nu)$. Индексы разбиений s и c принадлежат обеим матрицам. Тогда матрицы A и B можно представить в виде $A = \parallel a_{lsc} \parallel$ и $B = \parallel b_{scm} \parallel$. Очевидно, что если индексу s_γ (c_γ) соответствуют индекс i_α в матрице A и индекс i_β в матрице B , то $n_{i_\alpha} = n_{i_\beta}$. Индексы разбиения c называются кэлиевыми, индексы разбиения s – скоттовыми, а индексы разбиения l , так же как и индексы разбиения m , – свободными. Матрица $C = \parallel C_{lsm} \parallel$, элементы которой вычисляются по формуле $c_{lsm} = \sum_{(c)} a_{lsc} \times b_{scm}$, называется (λ, μ) -свернутым произведением матриц A и B и обозначается ${}^{\lambda, \mu}(A \times B)$.

Из определения следует, что при различных сочетаниях параметров λ и μ результат произведения матриц размерностей p и q может иметь размерность от нуля до $p + q$,

т. е. от скаляра до фактически декартова произведения множеств элементов обеих матриц.

Формализация задачи построения маршрутов в графе. Для решения задачи построения маршрутов в графе вводится понятие $(1, 0)$ -степени матрицы смежности (весов) графа, или просто матрицы. Пусть $G = \|w_{i_1 i_2}\|$ – квадратная матрица, а $G' = \|w_{i_2 i_1}\|$ – соответствующая ей транспонированная матрица. Тогда матрица ${}^{0,1}G^2 = {}^{0,1}(GG')$ есть вторая $(0, 1)$ -степень матрицы G . В общем случае если ${}^{1,0}G^{k-1}$ – $(k-1)$ -я $(1, 0)$ -степень матрицы G , то матрица ${}^{1,0}G^k = {}^{1,0}({}^{1,0}G^{k-1} \cdot G')$ – k -я $(1, 0)$ -степень матрицы G . Во всех случаях в качестве скоттова индекса используются младший (последний) индекс матрицы ${}^{1,0}G^k$ и старший (первый) индекс матрицы G' .

Для построения маршрутов в графе справедливо доказанное в работе [14] следующее утверждение. Если матрица $G = \|w_{i_1 i_2}\|$ – матрица смежности графа, а $(k+1)$ -мерная матрица – ${}^{1,0}G^k$ – $(1, 0)$ -степень матрицы G , то набор значений индексов отличного от нейтрального элемента этой матрицы i_1^*, \dots, i_{k+1}^* соответствует номерам вершин маршрута, который связывает вершины i_1^* и i_{k+1}^* . Это утверждение имеет конструктивный характер, так как фактически задает алгоритм построения маршрутов в графе.

В работах [15, 16] доказано, что алгебра многомерных матриц гомоморфна, а в конкретных случаях изоморфна реляционной алгебре. В рассматриваемой задаче алгебра многомерных матриц с операцией $(1, 0)$ -свернутого произведения и реляционная алгебра с операцией **Join** изоморфны. Из этого следует, что в том случае, когда матрица смежности графа разреженная, можно использовать ее представление в виде отношения $G(i, j, w)$, где i, j – номера вершин, w – признак наличия или вес ребра. Аналогично матрице ${}^{0,1}G^k$ соответствует отношение $G_k(i_1, \dots, i_{k+1}, w)$. Тогда операции ${}^{0,1}({}^{0,1}G^k G')$ соответствует запрос

```

SELECT [Gk].[i1] AS i1, ..., [Gk].[ik-1] AS ik, [G].[i1] AS ik+1, [G1].[i2] AS ik+2,
([Gk].[w]⊕[G].[w]) AS w INTO Gk+1
FROM Gk Inner Join G On Gk.ik+1 = G.i1
WHERE ((([Gk].[i2])<>[G].[i2]) And ... And (([Gk].[ik])<>[G].[i2]) And
(([G].[i1])<>[G].[i2])

```

Предикат, заданный в разделе **WHERE**, обеспечивает отсутствие маршрутов, проходящих через одну вершину более одного раза.

Приведем экспериментальное исследование предложенного подхода к решению задачи построения маршрутов в графе в обеих алгебрах.

Алгоритм вычисления $(1, 0)$ -степеней двумерной матрицы. Особенность предложенного алгоритма состоит в том, что, как показано в работе [17], умножение многомерных матриц можно свести к параллельному умножению сечений этих матриц. Рассмотрим сечения по всем возможным наборам фиксированных значений скоттовых индексов. Учитывая тот факт, что матрица G' двумерная, а при умножении отсутствуют кэлиевы индексы, предлагается модификация этого метода. Суть модификации состоит в следующем: матрица – первый операнд представляется в виде двумерных сечений; сечения проводятся по всем возможным наборам фиксированных значений свободных индексов этой матрицы без одного (последнего) индекса. При использовании такого подхода матрица ${}^{0,1}G^2$ будет иметь вид

$${}^{1,0}G^2 = \left\| \left\| \begin{array}{cccc} w_{000} & w_{001} & \dots & w_{00N} \\ w_{010} & w_{011} & \dots & w_{01N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{0N0} & w_{0N1} & \dots & w_{0NN} \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{cccc} w_{100} & w_{101} & \dots & w_{10N} \\ w_{110} & w_{111} & \dots & w_{11N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{1N0} & w_{1N1} & \dots & w_{1NN} \end{array} \right\| \dots \left\| \begin{array}{cccc} w_{N00} & w_{N01} & \dots & w_{N0N} \\ w_{N10} & w_{N11} & \dots & w_{N1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{NN0} & w_{NN1} & \dots & w_{NNN} \end{array} \right\| \right\|.$$

В общем случае $(k+1)$ -мерная матрица ${}^{1,0}G^k = \left\| w_{i_1 \dots i_{k+1}} \right\|$ может быть представлена как совокупность двумерных сечений вида $\left\| w_{i_1^* \dots i_{k-1}^* l_k^s} \right\|$. Здесь $i_1^* \dots i_{k-1}^*$ – фиксированные значения индексов i_1, \dots, i_{k-1} ; l_k – свободный индекс, соответствующий индексу i_k ; s – скоттов индекс, соответствующий индексу i_{k+1} . Тогда, если матрицу $G' = \left\| w_{i_2 i_1} \right\|$ рассматривать как матрицу $G' = \left\| w_{sm} \right\|$, сечения матрицы ${}^{1,0}G^{k+1} = \left\| w_{i_1 \dots i_{k+1} i_{k+2}} \right\|$ вычисляются по формуле $\left\| w_{i_1^* \dots i_{k-1}^* l_k^s} \times w_{sm} \right\|$.

Экспериментальный анализ алгоритма вычисления (1, 0)-свернутых степеней двумерной матрицы. Для проведения эксперимента разработано программное обеспечение, реализующее универсальный алгоритм вычисления (1, 0)-свернутых степеней матрицы смежности произвольного графа. При разработке использованы язык программирования C++ и библиотека OpenMP [18].

Эксперимент проводили в два этапа на рабочей станции со следующими характеристиками: процессор AMD Ryzen 9 3900X, 12 ядер, 24 потока, тактовая частота 4,6 ГГц; оперативная память 32 ГБ, частота 3,2 ГГц; операционная система Windows 11 Professional.

Этап 1. На этом этапе решена задача сравнения скоростных характеристик последовательной и параллельной реализации предложенного подхода к построению маршрутов в графе.

На рис. 1 показан граф, использованный на данном этапе эксперимента. Матрица смежности этого графа имеет вид

$$G = \left\| \left\| \begin{array}{cccccccccc} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\| \right\|.$$

В ходе эксперимента фиксировали время построения всех возможных маршрутов в графе G , состоящих из 2, 3, ..., 9 ребер. Результаты приведены на рис. 2 и в табл. 1.

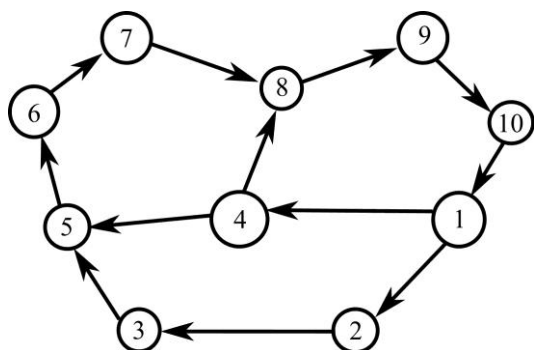


Рис. 1. Граф G для этапа 1 эксперимента
Fig. 1. Graph G for stage 1 of the experiment

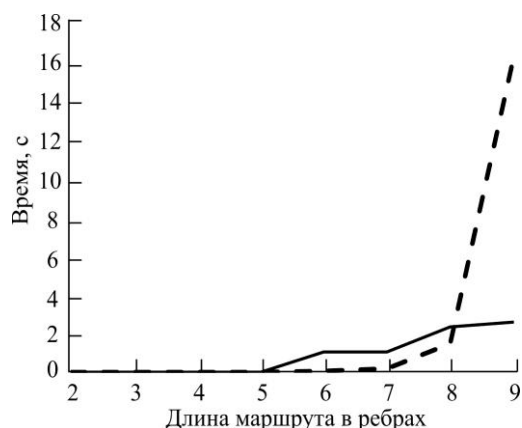


Рис. 2. Временные характеристики последовательного (---) и параллельного (—) построения маршрутов в графе G
Fig. 2. Line chart of the time characteristics of sequential (---) and parallel (—) routes building in graph G

Таблица 1
Время, с, построения всех маршрутов в графе G с разным числом ребер
Table 1

Routs construction time, s, for all routes in graph G with different numbers of edges

Последовательное построение	Параллельное построение	Шаг (длина маршрута в ребрах)
0	0	2
0	0	3
0	0	4
0	0	5
0,001	0	6
0,003	0,001	7
0,036	0,008	8
0,342	0,086	9

Этап 2. На этом этапе решена задача сравнения скоростных характеристик последовательной и параллельной реализации предложенного подхода к построению маршрутов в графе в зависимости от числа этих маршрутов. В качестве исходных использованы графы G_1 и G_2 , число ребер и, соответственно, маршрутов в которых существенно различалось (рис. 3). Время выполнения алгоритма на этих графах приведено в табл. 2.

Оба этапа эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Время выполнения многомерно-матричного алгоритма построения маршрутов в графе существенно зависит от количества вершин графа и не зависит от количества ребер.

2. Время выполнения параллельной реализации алгоритма построения всех маршрутов в графе существенно меньше времени выполнения его последовательной реализации. Это уменьшение становится существенным по мере возрастания длины маршрута в ребрах. Поэтому для каждого конкретного числа вершин графа можно определить длину маршрута в ребрах, начиная с которой целесообразно переходить от последовательных вычислений к параллельным.

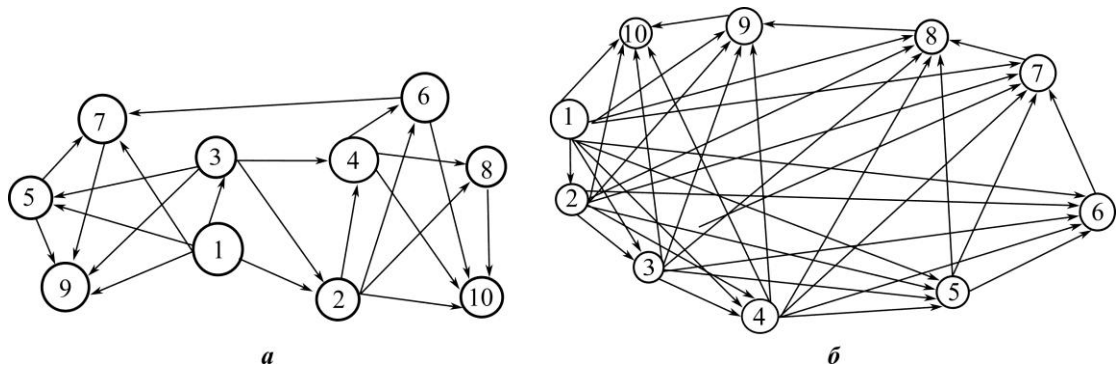


Рис. 3. Граф G_1 (а) и граф G_2 (б) для этапа 2 эксперимента
 Fig. 3. Graph G_1 (a) and graph G_2 (b) for stage 2 of the experiment

Таблица 2

Время, с, построения всех маршрутов в графах G_1 и G_2 с разным числом ребер

Table 2

Routs construction time, s, for all routes in graphs G_1 and G_2 with different numbers of edges

Граф G_1		Граф G_2		Шаг (длина маршрута в ребрах)
Последовательное построение	Параллельное построение	Последовательное построение	Параллельное построение	
0	0	0	0	2
0	0	0	0	3
0	0	0	0	4
0	0	0	0	5
0,001	0	0,001	0	6
0,003	0,001	0,003	0,001	7
0,037	0,007	0,034	0,009	8
0,346	0,008	0,350	0,093	9

Экспериментальный анализ реализации алгоритма вычисления (1, 0)-свернутых степеней двумерной матрицы средствами баз данных. При формализации решаемой задачи показано, что существует представление матрицы смежности исходного графа в базе данных в виде отношения (таблицы), схема которой соответствует одному из представлений разреженной матрицы. Запрос, общая форма которого приведена ранее, реализует операцию вычисления (1, 0)-свернутых степеней матрицы смежности графа. В [14] показано, что, в отличие от многомерно-матричной реализации, время решения задачи зависит не только от числа вершин, но и от числа ребер исходного графа. Поэтому важно решить проблему выбора системы управления базами данных (СУБД), которая наилучшим образом будет реализовывать это решение. Очевидно, что могут использоваться только классические реляционные СУБД, которые обеспечивают типизированное хранение данных, оптимизацию и параллельное выполнение запросов, а также имеют процедурно-ориентированный язык манипулирования данными.

Приведем анализ решения задачи построения всех маршрутов в графе средствами популярных СУБД – Microsoft SQL Server и PostgreSQL. Как и в случае с алгоритмом, реализованным в алгебре многомерных матриц, эксперимент проводили в два этапа.

Этап 1. Проведено сравнение времени построения всех маршрутов в графах со случайно сгенерированным числом ребер. Для каждого фиксированного количества вершин от 12 до 15 генерировали по пять графов. Фиксировали время построения всех маршрутов для обеих СУБД. Построение маршрутов реализовано посредством оптимизированных и откомпилированных хранимых процедур. В табл. 3 приведено среднее время построения маршрутов для каждого типа графов.

Таблица 3

Время, с, построения всех маршрутов в графах с разным числом вершин средствами двух СУБД

Table 3

Routs construction time, s, of all routes in graphs with different numbers of vertices by means of two DBMS

PostgreSQL	MS SQL Server	Число вершин
0,6	0,4	12
9,4	4,4	13
19,0	10,0	14
96,6	44,8	15

Этап 2. Проведена оценка времени выполнения алгоритма в зависимости от числа возможных маршрутов в графе. Для этой цели случайным образом строили графы, содержащие 14 вершин, разное число ребер и возможных маршрутов. После выполнения 23 повторений эксперимента данные были упорядочены по времени построения маршрутов (табл. 4).

Таблица 4

Зависимость времени построения всех маршрутов от их числа

Table 4

Dependence of the construction time of all routes on their number

Число ребер	Число маршрутов	Время, с
68	33 565	1,618
59	40 346	1,724
67	68 455	2,049
63	74 151	2,335
63	85 132	2,662
66	199 684	3,455
67	332 409	3,571
67	375 687	3,845
69	470 768	4,262
67	622 126	4,505
70	664 372	5,041
66	677 650	5,181
67	766 645	5,273
68	781 590	5,586
69	773 501	5,608
68	905 977	5,614
69	1 251 820	6,943
69	1 363 938	7,079
72	1 426 104	8,079
71	1 949 978	9,547
70	2 280 802	11,409
71	2 595 024	12,586
73	2 605 822	13,255

При аппроксимации полученных данных методом наименьших квадратов наименьшая невязка – у линейной функции, т. е. можно сделать вывод, что зависимость времени выполнения алгоритма от количества возможных маршрутов в графе близка к линейной. Таким образом, можно утверждать, что вычислительная сложность предложенного алгоритма имеет порядок $O(N)$, где N – количество возможных маршрутов в графе.

Оба этапа эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Время выполнения реляционного алгоритма построения маршрутов в графе зависит от количества вершин графа и скоростных характеристик выполнения запроса в конкретной СУБД.

2. Поскольку возможно применение принципа симметричного горизонтального распределения, который позволяет параллельно выполнять запросы над фрагментами матрицы смежности графа [16], время выполнения параллельной реализации построения всех маршрутов в графе средствами СУБД может быть существенно уменьшено.

3. Линейная зависимость времени выполнения алгоритма от числа возможных маршрутов в графе делает его эффективным, особенно при условии, что матрица смежности графа сильно разрежена.

Заключение. Предложенный подход к построению всех возможных маршрутов в графе может быть использован при разработке и эксплуатации информационных систем, исходные данные в которых могут быть эффективно представлены в виде графов [19, 20]. Важная особенность предложенного подхода состоит в том, что он позволяет выбирать различные структуры данных и алгоритмы их обработки в зависимости от особенностей исходного графа, т. е. устанавливается точное соответствие между моделью данных и моделью вычислений.

Литература

1. **Bast H.** Car or public transport – two worlds // Efficient Algorithms / eds S. Albers, H. Alt, S. Näher. Berlin; Heidelberg: Springer, 2009. P. 355–367. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03456-5_24
2. **Беляков С. Л., Колодийцев Я. А., Розенберг И. Н., Савельева М. Н.** Модель решения задачи маршрутизации в интеллектуальной геоинформационной системе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 5 (118). С. 113–119.
3. **Ageyev D., Ignatenko A., Wehbe F.** Design of information and telecommunication systems with the usage of the multi-layer graph model // 2013 12th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). Lviv: IEEE, 2013. P. 1–4.
4. **Марголис Б. И., Музанна М. М.** Синтез магистральных телекоммуникационных сетей // Программные продукты и системы. 2014. № 1. С. 162–168.
5. **Miller J. A., Ramaswamy L., Kochut K. J., Fard A.** Research directions for big data graph analytics // 2015 IEEE International Congress on Big Data. New York: IEEE, 2015. P. 785–794. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2015.132>
6. **Спивак С. И., Исмаилова А. С., Хамитова И. А.** Теоретико-графовый метод определения маршрутов сложных химических реакций // Доклады Академии наук. 2010. Т. 434. № 4. С. 499–501.
7. **Masum A. K., Faruque F., Shahjalal M., Sarker I. H.** Solving the vehicle routing problem using genetic algorithm // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2011. Vol. 2. Iss. 7. P. 126–131. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2011.020719>
8. **Семенов Ю. Н., Семенова О. С.** Применение методов кластеризации при организации междугородных перевозок грузов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 6 (118). С. 201–205.
9. **Мунерман В. И., Самойлова Т. А.** Алгебраический подход к алгоритмизации задач маршрутизации // Системы высокой доступности. 2018. Т. 14. № 5. С. 50–56. <https://doi.org/10.18127/j20729472-201805-08>
10. **Соколов Н. П.** Введение в теорию многомерных матриц. Киев: Наукова думка, 1972. 175 с.
11. **Левин Н. А., Мунерман В. И.** Модели обработки больших объемов данных в системах массового параллелизма // Системы высокой доступности. 2013. Т. 9. № 1. С. 35–43.
12. **Мунерман В. И.** Архитектура программно-аппаратного комплекса для массовой обработки данных на базе многомерно-матричной модели // Системы высокой доступности. 2015. Т. 11. № 2. С. 13–18.

13. **Захаров В. Н., Мунерман В. И.** Параллельный алгоритм умножения многомерных матриц // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2015. Т. 11. № 2. С. 384–390.
14. **Емельченков Е. П., Мунерман В. И., Мунерман Д. В., Самойлова Т. А.** Один метод построения циклов в графе // Современные информационные технологии и ИТ-образование [Электронный ресурс]. 2021. Т. 17. № 4. URL: <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/773> (дата обращения: 08.07.2022).
15. **Munerman V., Munerman D.** An axiomatic approach to the data models formalization for mass data processing // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2020. P. 1996–2000. <https://doi.org/10.1109/EIconRus49466.2020.9039205>
16. **Мунерман В. И., Мунерман Д. В.** О соответствии моделей данных и моделей вычислений // Системы компьютерной математики и их приложения. 2021. № 22. С. 146–152.
17. **Захаров В. Н., Мунерман В. И.** Параллельная реализация обработки интенсивно используемых данных на основе алгебры многомерных матриц // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных: XVII Международная конференция DAMDID/RCDL. Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. С. 217–223.
18. **Антонов А. С.** Параллельное программирование с использованием технологии OpenMP: учеб. пособие. М.: МГУ им. Ломоносова, 2009. 77 с.
19. **Козлов С. В.** Интеллектуальная система поддержки принятия решений «Advanced Tester» // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии: сб. материалов X Всерос. конф. (Оренбург, 18–19 нояб. 2021). Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2021. С. 127–131.
20. **Козлов С. В.** Интерпретация инвариантов теории графов в контексте применения соответствия Галуа при создании и сопровождении информационных систем // International Journal of Open Information Technologies. 2016. Т. 4. № 7. С. 38–44.

Статья поступила в редакцию 16.05.2022 г.; одобрена после рецензирования 24.05.2022 г.; принята к публикации 25.08.2022 г.

Информация об авторах

Морозов Сергей Андреевич – студент кафедры прикладной математики и информатики Смоленского государственного университета (Россия, 214000, г. Смоленск, ул. Пржевальского, 4), jndrn17@yandex.ru

Мунерман Виктор Иосифович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики Смоленского государственного университета (Россия, 214000, г. Смоленск, ул. Пржевальского, 4), vimoon@gmail.com

Симаков Валерий Александрович – студент кафедры прикладной математики и информатики Смоленского государственного университета (Россия, 214000, г. Смоленск, ул. Пржевальского, 4), 67Rus.67Rus@gmail.com

References

1. Bast H. Car or public transport – two worlds. *Efficient Algorithms*, eds S. Albers, H. Alt, S. Näher. Berlin, Heidelberg, Springer, 2009, pp. 355–367. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03456-5_24
2. Beliacov S. L., Kolomyitsev Ya. A., Rozenberg I. N., Savelyeva M. N. Model for solving routing problem in the intellectual geoinformation system. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki = Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, 2011, no. 5 (118), pp. 113–119. (In Russian).
3. Ageyev D., Ignatenko A., Wehbe F. Design of information and telecommunication systems with the usage of the multi-layer graph model. *2013 12th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. Lviv, IEEE, 2013, pp. 1–4.
4. Margolis B. I., Muzanna M. M. Synthesis of backbone telecommunication networks. *Programmnyye produkty i sistemy = Software & Systems*, 2014, no. 1, pp. 162–168. (In Russian).
5. Miller J. A., Ramaswamy L., Kochut K. J., Fard A. Research directions for big data graph analytics. *2015 IEEE International Congress on Big Data*. New York, IEEE, 2015, pp. 785–794. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2015.132>
6. Spivak S. I., Ismagilova A. S., Khamitova I. A. Graph-theoretical method for determining routes of complex chemical reactions. *Dokl. Phys. Chem.*, 2010, vol. 434, iss. 2, pp. 169–171. doi: <https://doi.org/10.1134/S0012501610100040>

7. Masum A. K., Faruque F., Shahjalal M., Sarker I. H. Solving the vehicle routing problem using genetic algorithm. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2011, vol. 2, iss. 7, pp. 126–131. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2011.020719>
8. Semenov Yu. N., Semenova O. S. The use of clustering methods in the organization long-distance transport of goods. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2016, no. 6, pp. 201–205. (In Russian).
9. Munerman V. I., Samoylova T. A. Algebraic approach to algorithmization of routing problems. *Sistemy vysokoy dostupnosti = Highly Available Systems*, 2018, vol. 14, no. 5, pp. 50–56. (In Russian). <https://doi.org/10.18127/j20729472-201805-08>
10. Sokolov N. P. *Introduction to multidimensional matrices theory*. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1972. 175 p. (In Russian).
11. Levin N. A., Munerman V. I. Models of big data processing in massively parallel systems. *Sistemy vysokoy dostupnosti = Highly Available Systems*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 35–43. (In Russian).
12. Munerman V. I. Construction of hardware-software complexes architecture to improve massively data processing. *Sistemy vysokoy dostupnosti = Highly Available Systems*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 13–18. (In Russian).
13. Zakharov V. N., Munerman V. I. Parallel algorithm for multiplying multidimensional matrices. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovaniye = Modern Information Technologies and IT-Education*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 384–390. (In Russian).
14. Yemelchenkov E. P., Munerman V. I., Munerman D. V., Samoilova T. A. Some method for constructing cycles in a graph. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovaniye = Modern Information Technologies and IT-Education*, 2021, vol. 17, no. 4. (In Russian). Available at: <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/773> (accessed: 08.07.2022).
15. Munerman V., Munerman D. An axiomatic approach to the data models formalization for mass data processing. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2020, pp. 1996–2000. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039205>
16. Munerman V. I., Munerman D. V. About the correspondence of data models and calculation models. *Sistemy komp'yuternoy matematiki i ikh prilozheniya = Systems of Computer Mathematics and Their Applications*, 2021, no. 22, pp. 146–152.
17. Zakharov V. N., Munerman V. I. Parallel implementation of data intensive processing on the basis of the algebra of multidimensional matrices. *Analitika i upravleniye dannymi v oblastiakh s intensivnym ispol'zovaniyem dannykh: XVII Mezhdunarodnaya konferentsiya DAMDID/RCDL = Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: XVII International Conference DAMDID/RCDL*. Obninsk, INPE NRNU MEPhI Publ., 2015, pp. 217–223. (In Russian).
18. Antonov A. S. *Parallel programming using OpenMP technology*, study guide. Moscow, Moscow State University Publ., 2009. 77 p. (In Russian).
19. Kozlov S. V. Intelligent decision support system “Advanced Tester”. *Komp'yuternaya integratsiya proizvodstva i IPI-tekhnologii = Computer integration of production and CALS technologies*, proceedings of the 10th Russia-wide conference. Orenburg, Orenburg State University, 2021, pp. 127–131. (In Russian).
20. Kozlov S. V. Interpretation of invariants of the theory of counts in the context of use of compliance of Galois at creation and support of information systems. *International Journal of Open Information Technologies*, 2016, vol. 4, no. 7, pp. 38–44. (In Russian).

The article was submitted 16.05.2022; approved after reviewing 24.05.2022;
accepted for publication 25.08.2022.

Information about the authors

Sergey A. Morozov – Student of the Applied Mathematics and Informatics Department, Smolensk State University (Russia, 214000, Smolensk, Przhevalsky st., 4), jndrn17@yandex.ru

Victor I. Munerman – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Applied Mathematics and Informatics Department, Smolensk State University (Russia, 214000, Smolensk, Przhevalsky st., 4), vimoon@gmail.com

Valery A. Simakov – Student of the Applied Mathematics and Informatics Department, Smolensk State University (Russia, 214000, Smolensk, Przhevalsky st., 4), 67Rus.67Rus@gmail.com

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 октября 2022 г.)

Внимание! Введены новые требования к выполнению рисунков.

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал «Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА» публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- фундаментальные исследования;
- материалы электроники;
- технологические процессы и маршруты;
- элементы интегральной электроники;
- схемотехника и проектирование;
- микро- и наносистемная техника;
- интегральные радиоэлектронные устройства;
- биомедицинская электроника;
- информационно-коммуникационные технологии;
- проблемы высшего образования.

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом **в двух экземплярах**.

2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.

3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры или института, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).

4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: <http://ivuz-e.ru/authors/>

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

- на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;
- на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать **ключевые слова** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

– печатается *через два интервала* с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

– абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только *по умолчанию*. Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Штриховые и полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в графических форматах JPEG/JPG, PNG, SVG, PDF, TIFF (без компрессии). Представление рисунков в других форматах возможно по согласованию с редакцией журнала и при наличии технических возможностей. Текст и графические элементы изображения (в электронном виде и при печати на бумаге) должны быть качественными и различимыми.

2. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок необходимо сохранить в отдельном файле. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

– оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

– нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

– русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

– оформляется отдельным файлом;

– необходимо указать: фамилию, имя, отчество полностью; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, служебный адрес (на русском и английском языках), служебный телефон, e-mail;

– указать автора, ответственного за прохождение статьи, для аспирантов – научного руководителя.

Плата за публикацию статей не взимается.

Статьи направлять по адресу: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ, редакция журнала «Известия вузов. Электроника», комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@micee.ru

<http://ivuz-e.ru>

