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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 26
№ 6
ноябрь - декабрь

Vol. 26
No. 6
November - December

2021

Поздравляем
с 80-й годовщиной победы в Битве за Москву!



**Памятник на братской могиле советских воинов,
погибших в декабре 1941 г. в Битве за Москву
(станция Крюково, г. Зеленоград)**

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 26, № 6, 2021
ноябрь – декабрь

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
Быков Дмитрий Васильевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4935-7292
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гагарина Лариса Геннадьевна – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Грибов Борис Георгиевич – чл.-корр. РАН, д.хим.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
Коноплёв 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)
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Максимов Иван Александрович – PhD, проф., Университет города Лунд (Швеция), ORCID: 0000-0003-1944-4878
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© «Известия вузов. Электроника», 2021
© МИЭТ, 2021

Неволин Владимир Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия)
Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада)
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977
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., Институт электронной инженерии и нанотехнологий АНМ (Кишинев, Молдова), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

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

Адрес редакции: 124498, Россия, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, МИЭТ
Тел.: 8-499-734-6205
E-mail: magazine@miee.ru
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 10.12.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 18,135 усл.печ.л., 16,052 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 6. 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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

Шунаев В.В., Герасименко А.Ю., Глухова О.Е. Электронные свойства графеновых нанолент, допированных пирролоподобным азотом 447

Хамдохов З.М., Маргушев З.Ч., Калажоков З.Х., Калажоков Х.Х., Левин Д.Д. Исследование химического состава пленок, полученных методом электродугового распыления графита и титана из двух источников 459

Технологические процессы и маршруты

Зеленский А.А., Морозкин М.С., Грибков А.А. Обзор полупроводниковой промышленности в мире и России: производство и оборудование 468

Шомахов З.В., Налимова С.С., Бобков А.А., Мошников В.А. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия поверхностных слоев ограненных наностержней оксида цинка 481

Элементы интегральной электроники

Бондарев А.В., Ефанов В.Н. Исследование робастности наноэлектронных структур на базе резонансно-туннельных элементов 491

Схемотехника и проектирование

Эннс В.И., Гаврилов С.В., Чочаев Р.Ж. Автоматическая настройка программных средств размещения пользовательских схем на ПЛИС 508

Пилькевич А.В., Садков В.Д. Тонкопленочные поглощающие элементы адаптоаттенюаторов для ГИС 521

Чердинцев А.А., Щагин А.В., Лупин С.А. Модифицированная прогнозирующая система управления повышающего DC-DC-преобразователя 533

Шумарин С.В., Богачев А.М. Простой способ уточнения параметров SPICE-моделей ИС транзисторного уровня в температурном диапазоне 547

Минаков Е.И., Валихин Г.А., Овчинников А.В., Матвеева С.С. Следящая фильтрация показаний радиолокационной станции при обнаружении БПЛА 554

Информационно-коммуникационные технологии

Паскарь В., Гагарина Л.Г., Слюсарь В.В. Разработка методики и комплекса программных средств для дистанционного электронного голосования на основе блокчейн-платформы Ethereum 565

Краткие сообщения

Неустроев С.А. Энергия связи между атомами кубического углерода 580

Зо Мьо Наин. Разработка системы управления позиционированием сервопривода с применением ПИД-регулятора и контроллера нечеткой логики 583

Памяти Грибова Бориса Георгиевича 589

Тематический указатель статей, опубликованных в 2021 году 591

К сведению авторов 595

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 26, No. 6, 2021
November – December

The scientifical and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

Sergey A. Gavrilov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Dmitri V. Bykov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-4935-7292
Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)
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. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Aleksandr A. Gorbatsevich – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Boris G. Gribov – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Chem.), Prof., JSC «NIIME» (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
Ivan A. Maksimov - PhD, Prof., Lund University (Sweden), ORCID: 0000-0003-1944-4878
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

© «Proceedings of Universities. Electronics», 2021
© MIET, 2021

Vladimir N. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (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 Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Andrey Y. Sazonov - PhD, Prof., University of Waterloo (Canada)
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., Institute of the Electronic Engineering and Nanotechnologies ASM (Chisinau, Moldova), 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
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 address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET

Printery address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET

Signed to print 10.12.2021. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 18,135. Number of copies 150. Order no. 6. 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 a Service» – 38934

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

CONTENTS

Electronics materials

Shunaev V.V., Gerasimenko A.Yu., Glukhova O.E. Electronic Properties of Graphene Nanoribbons Doped with Pyrrole-Like Nitrogen 447

Khamdokhov Z.M., Margushev Z.Ch., Kalazhokov Z.Kh., Kalazhokov Kh.Kh., Levin D.D. Investigation of the Chemical Composition of Films Obtained by Electric Arc Spraying of Graphite and Titanium from Two Sources 459

Technological processes and routes

Zelensky A.A., Morozkin M.S., Gribkov A.A. Overview of the Semiconductor Industry in the World and in Russia: Production and Equipment 468

Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Bobkov A.A., Moshnikov V.A. X-ray Photoelectron Spectroscopy of Surface Layers of Faceted Zinc Oxide Nanorods 481

Integrated electronics elements

Bondarev A.V., Efanov V.N. Investigation of Robustness of Nanoelectronic Structures Based on Resonant Tunneling Elements 491

Circuit engineering and design

Enns V.I., Gavrilov S.V., Chochaev R.Zh. Automatic FPGA Placement Configuration for Customer Designs 508

Pilkevich A.V., Sadkov V.D. Thin-Film Absorbing Elements of Adapter-Attenuators for HIC 521

Cherdintsev A.A., Shagin A.V., Lupin S.A. Modified Predictive Control System of the DC-DC Boost Converter 533

Shumarin S.V., Bogachev A.M. A Simple Method of Transistor-Level SPICE-Models Parameters Fitting of Integrated Circuits in a Temperature Range 547

Minakov E.I., Valikhin G.A., Ovchinnikov A.V., Matveeva S.S. Tracking Filter for Radio Surveillance upon UAV Detection 554

Information-communication technologies

Pascari V., Gagarina L.G., Sliusar V.V. Methods and Software Complex Development for Remote Electronic Voting Based on Ethereum Blockchain Platform 565

Brief reports

Neoustroev S.A. Binding Energy of Cubic Carbon Atoms 580

Zaw Myo Naing. Development of Servo Drive Positioning Control System Using PID Controller and Fuzzy Logic Controller 583

In memory of Gribov Boris Georgievich 589

Thematic index of articles published in 2021 591

Instructions for authors 595

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

УДК 620.3:544.225.22 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-447-458**

Электронные свойства графеновых нанолент, допированных пирролоподобным азотом

В.В. Шунаев[1], А.Ю. Герасименко[2,3,4], О.Е. Глухова[1,3]

[1]Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[3]Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, г. Москва, Россия
[4]Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва, Россия

gerasimenko@bms.zone

Допирование графеновых нанолент различными химическими элементами приводит к изменению их зонной структуры, что значительно расширяет спектр применения данных объектов в современных электронных устройствах. В настоящей работе исследованы графеновые наноленты с краем типа «кресло» и «зигзаг» с различной концентрацией пирролоподобного азота на краях. Методом функционала плотности в приближении сильной связи с применением самосогласованного заряда (Self-Consistent Charge Density Functional Tight-Binding, SCC-DFTB) установлены наиболее выгодные с энергетической точки зрения конфигурации пирролоподобного азота на каждом из краев графеновых нанолент. Определена зависимость между энергетическими щелями графеновых нанолент и содержанием в них функциональных азотосодержащих групп. Расчеты показали, что, встраиваясь в атомную решетку, пирролоподобный азот на краю графеновой наноленты типа «зигзаг» передает большее количество заряда находящимся рядом атомам углерода, что делает такие наноленты более химически активными по сравнению с графеновыми нанолентами с краем типа «кресло». Графеновые наноленты с краем типа «зигзаг», допированные азотом, могут являться перспективным хеморезистивным элементом наносенсоров, однако данные выводы требуют дальнейших расчетов.

Ключевые слова: графеновые наноленты; пирролы; молекулярное моделирование; зонная структура; энергетическая щель

© В.В. Шунаев, А.Ю. Герасименко, О.Е. Глухова, 2021

Для цитирования: Шунаев В.В., Герасименко А.Ю., Глухова О.Е. Электронные свойства графеновых нанолент, допированных пирролоподобным азотом // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 447–458. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-447-458

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSRR-2020-0004).

Electronic Properties of Graphene Nanoribbons Doped with Pyrrole-Like Nitrogen

V.V. Shunaev[1], A.Yu. Gerasimenko[2,3,4], O.E. Glukhova[1,3]

[1]Saratov State University, Saratov, Russia
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[3]I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia
[4]Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

gerasimenko@bms.zone

Abstract: Doping of graphene nanoribbons with various chemical elements leads to a change in their band structure, which significantly expands the range of applications of these objects in modern electronic devices. In this work, the authors investigate graphene nanoribbons of the «armchair» and «zigzag» types with different concentrations of pyrrole-like nitrogen at the edges. The SCC-DFTB method was used to establish the most energetically favorable configurations of pyrrole-like nitrogen at each edge of graphene nanoribbons. The relationship between the energy gaps of graphene nanoribbons and the content of the considered functional nitrogen-containing groups in them was determined. Calculations have shown that, by incorporating into the atomic lattice, pyrrole-like nitrogen at the «zigzag» edge transfers a greater amount of charge to nearby carbon atoms, which makes such nanoribbons more chemically active in comparison with «arm-chair» type nanoribbons. Nitrogen doped «zigzag» graphene nanoribbons may be a promising chemoresistive element of nanosensors; however, these conclusions require further calculations.

Keywords: graphene nanoribbons; pyrroles; pyrrole-like nitrogen; molecular modeling; band structure; energy gap

Funding: this study has been carried out with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FSRR-2020-0004).

For citation: Shunaev V.V., Gerasimenko A.Yu., Glukhova O.E. Electronic properties of graphene nanoribbons doped with pyrrole-like nitrogen. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 447–458. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-447-458

Введение. Графен – 2D-материал, который характеризуется уникальными механическими, электронными и адсорбционными свойствами [1–3]. Однако отсутствие энергетической щели, отделяющей валентную зону от зоны проводимости, существенно ограничивает применение графена в различных электронных устройствах, в частности транзисторах. Один из способов контроля энергетической щели и электропроводности графена – его функционализация различными химическими элементами, например азотом. Функционализированные азотосодержащими группами графеновые ячейки применяются в качестве элементов таких электрохимических устройств, как литий-ионные батареи [4, 5], суперконденсаторы [6, 7], транзисторы [8] и биосенсоры [9]. Среди методов синтеза графена, допированного азотом, следует отметить метод химического осаждения из газовой фазы [10–12], сольвотермический метод [13–15], метод постплазменной обработка графена [16–18] и др. Отечественные ученые, модифицировав метод Хаммерса, нашли способ контролировать тип и концентрацию азотосодержащих групп, встраиваемых в решетку восстановленного оксида графена, а также регулировать электронные свойства полученного материала [19].

Методы математического моделирования являются эффективным инструментом исследования электронных свойств графеновых структур, допированных азотом. Исследования методом DFT (Density Functional Theory) показали, что добавление азота открывает в зонной структуре графена энергетическую щель, которая увеличивается с ростом концентрации азота и относительно которой смещается уровень Ферми [20, 21]. Расчеты *ab initio* позволили установить, что допирование азотом поверхности графена повышает его химическую активность, в частности энергию связи с карбоксильной группой -COOH [22]. Молекулярно-динамическое моделирование с использованием квантово-химического потенциала показало, что во время синтеза графена, допированного азотом, возможен контроль его топологии за счет варьирования кинетической энергии в пределах 1–5 эВ [23].

Известно, что, встроившись в графеновую матрицу, азот образует с углеродом различные соединения: графитовый азот, пиридины, пирролы и др. Особый интерес представляет пирролоподобный азот, образующий химическую связь с графеном за меньшее время по сравнения с другими азотосодержащими группами [24], а полученный в результате N-допированный графен является эффективным и высокоселективным электрокатализатором [25, 26]. Допирование графена пирролами повышает его электроемкость, что делает такой материал перспективным элементом для суперконденсаторов [27, 28] и транзисторов в случае открытия энергетической щели.

Цель настоящей работы – исследование влияния массовой доли пирролоподобного азота на электронные свойства графеновых нанолент, а также оценка возможности контроля данных свойств путем изменения концентрации азота.

Методы исследования. Поиск равновесных состояний, а также анализ зонной структуры рассматриваемых объектов осуществляли в рамках метода функционала плотности в приближении сильной связи с применением самосогласованного заряда (Self-Consistent Charge Density Functional Tight-Binding, SCC DFTB) [29]. По вычислительной скорости метод SCC DFTB сопоставим с традиционными полуэмпирическими методами, но обеспечивает точность, сравнимую с расчетами *ab initio*. Метод основан на разложении полной энергии Кона – Шэма по плотности заряда до членов второго порядка. Матричные элементы невозмущенного гамильтониана $H^0_{\mu\nu}$ представляются в минимальном базисе атомных орбиталей при использовании двухчастичного приближения.

Полная энергия системы определяется выражением

$$E_{tot} = \sum_{i\mu\nu} c_{\mu}^{i} c_{\nu}^{i} H_{\mu\nu}^{0} + \frac{1}{2} \sum_{\alpha\beta} \gamma_{\alpha\beta \Delta q_{\alpha} \Delta q_{\beta} + E_{rep}},$$

где c_{μ}^{i} и c_{ν}^{i} – коэффициенты при разложении молекулярной орбитали по атомным орбиталям; $\gamma_{\alpha\beta}$ – функция, экспоненциально убывающая с ростом расстояния между атомами α и β и напрямую зависящая от химической жесткости [30]; Δq_{α} и Δq_{β} – флуктуации заряда на атомах α и β соответственно; E_{rep} – терм, описывающий отталкивающее взаимодействие на малых расстояниях.

При расчете зонной структуры для разбиения зоны Бриллюэна в обратном пространстве использовали сетку Монкхорста – Пака 1 × 48 × 1, поскольку трансляцию осуществляли только вдоль оси *Y*. Для описания взаимодействия между атомами C, N и H применяли базисный набор 3ob-3-1 [31].

Энергия образования связи пирролоподобного азота с графеном равна:

$$E_F = E(G + PYR) - E(G) - E(PYR), \quad (1)$$

где $E(G + PYR)$ – энергия графеновых нанолент, допированных пирролоподобным азотом; $E(G)$ и $E(PYR)$ – энергии изолированных графеновой и пирролоподобной структур соответственно.

Результаты и их обсуждение. В современной литературе описано несколько способов встраивания пирролоподобного азота в графеновую решетку. Исследования методом молекулярной динамики на основе теории функционала плотности показали, что 72,9 % пирролитических соединений образуется на краях графеновых нанолент типа «зигзаг» [24]. Вместе с тем в других работах приведены схематические иллюстрации, указывающие на наличие пирролоподобного азота на краях графеновых нанолент типа «кресло» [32, 33]. Для определения наиболее энергетически выгодных способов присоединения пирролободного азота построены атомистические модели графеновых нанолент, содержащих по одной конфигурации пирролоподобного азота на одном из краев. Для экономии места все варианты присоединения пирролоподобного азота изображены на рис.1. Конфигурации пирролоподобного азота на краю графеновых нанолент типа «зигзаг» 1Z, 2Z, 3Z и 4Z взяты из работы [24], а конфигурации на краю графеновых нанолент типа «кресло» 1A и 2A – из работ [32, 33] соответственно. Отметим, что для всех рассмотренных случаев объектом исследования были именно графеновые наноленты, т.е. во время оптимизации методом SCC DFTB для конфигураций 1A и 2A структуры транслировались вдоль края типа «кресло», а для конфигураций 1Z, 2Z, 3Z и 4Z – вдоль края типа «зигзаг». Длина связи C–N и N–H во всех случаях составила приблизительно 1,445 и 1,038 Å соответственно, что хорошо коррелирует с расчетами методом DFT [24]. Рассчитанные по формуле (1) энергии образования связи приведены на рис.1. Наиболее энергетически выгодной конфигурацией пирролоподобного азота на

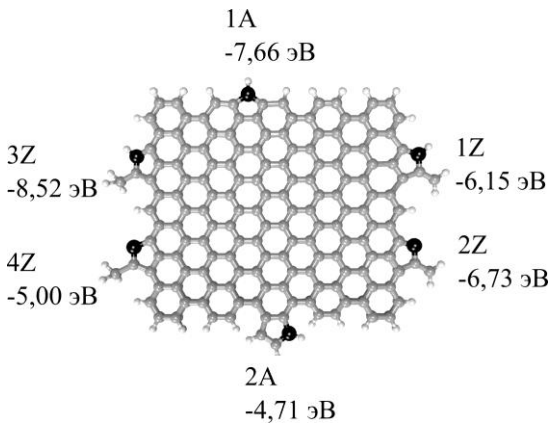


Рис.1. Конфигурации пирролоподобного азота и соответствующие им энергии образования связи
Fig.1. Configurations of pyrrole-like nitrogen and corresponding bond formation energies

краю графеновых нанолент типа «кресло» оказалась конфигурация 1A, на краю типа «зигзаг» – 3Z. Графеновые наноленты с данными функциональными группами являются объектами дальнейших исследований.

Известно, что графеновые наноленты с краем типа «зигзаг» демонстрируют металлический тип проводимости, а графеновые наноленты с краем типа «кресло» имеют энергетическую щель, которая скачкообразно меняется в зависимости от длины вдоль края типа «зигзаг» [34]. Чтобы определить влияние пирролоподобного азота на электронные свойства графеновых нанолент, построены атомистические модели графеновых нанолент с массовыми долями пирролоподобного азота в диапазоне 3,02–17,5 %.

Концентрацию пирролов конфигурации 1A в исследуемых графеновых нанолентах с краем типа «кресло» варьировали количеством гексагонов вдоль края типа «зигзаг». Зависимость энергетической щели от количества гексагонов вдоль края типа «зигзаг» для чистых и допированных пирролами конфигурации 1A графеновых нанолент с краем типа «кресло» приведена на рис.2. Как видно из рисунка, после добавления пирролоподобного азота к графеновым нанолентам с краем типа «кресло» скачкообразная зависимость энергетической щели от ширины наноленты с общей тенденцией к ее снижению сохраняется. При этом пики энергетической щели наблюдаются, когда количество гексагонов равно 1, 4, 7, 10 и т.д. Также видно, что добавление пирролоподобного азота приводит к снижению по модулю уровня Ферми графеновых нанолент с краем типа «кресло», что согласуется с результатами, полученными методом DFT [21]. Значения уровня Ферми, энергетической щели, а также величины заряда на пирролоподобном азоте конфигурации 1A в зависимости от массовой доли функциональной группы на краях графеновых нанолент типа «кресло» приведены в табл.1.

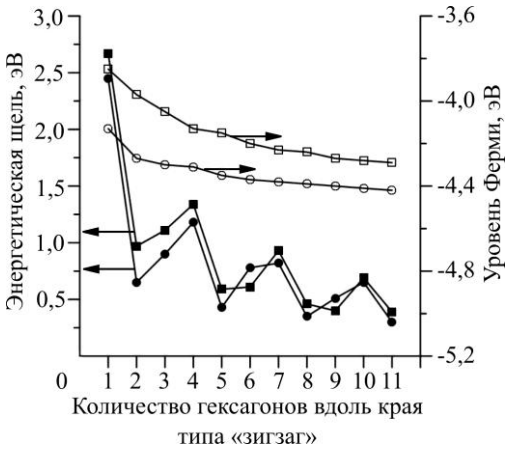


Рис.2. Зависимость энергетической щели и уровня Ферми для чистой (●,○) и допированной пирролоподобным азотом конфигурации 1A (■,□) графеновой наноленты с краем типа «кресло» от количества гексагонов вдоль края «зигзаг»

Fig.2. Dependence of the energy gap and Fermi level for pure (●,○) and doped with pyrrole-like nitrogen 1A (■,□) configuration of a graphene nanoribbon of the «armchair» type on the number of hexagons along the «zigzag» edge

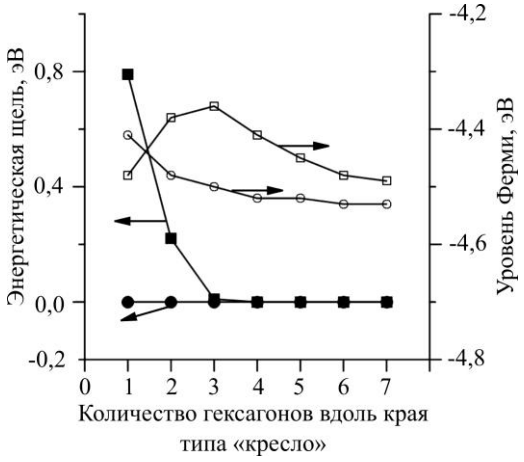


Рис.3. Зависимость энергетической щели и уровня Ферми для чистой (●,○) и допированной пирролоподобным азотом конфигурации 3Z (■,□) графеновой наноленты с краем типа «зигзаг» от количества гексагонов вдоль края «кресло»

Fig.3. Dependence of the energy gap and Fermi level for pure (●,○) and doped with pyrrole-like nitrogen 3Z (■,□) configuration of a graphene nanoribbon of the «zigzag» type on the number of hexagons along the edge of the «armchair»

Таблица 1

Электронные характеристики графеновых нанолент с краем типа «кресло», допированных пирролоподобным азотом конфигурации 1A

Table 1

Electronic characteristics of «armchair» type graphene nanoribbons doped with pyrrole-like nitrogen 1A

Количество гексагонов вдоль края типа «зигзаг»	Концентрация пиррола, %	Уровень Ферми, эВ	Энергетическая щель, эВ	Величина заряда на пирроле, e
1	9,09	–3,85	2,67	0,039
2	5,75	–3,97	0,97	0,072
3	4,20	–4,05	1,11	0,005
4	3,31	–4,13	1,34	0,027
5	2,73	–4,15	0,59	0,048
6	2,33	–4,2	0,61	0,013
7	2,02	–4,23	0,93	0,027
8	1,79	–4,24	0,46	0,040
9	1,61	–4,27	0,40	0,016
10	1,46	–4,28	0,69	0,027
11	1,33	–4,29	0,39	0,036

Концентрацию пирролов конфигурации 3Z в исследуемых нанолентах с краем типа «зигзаг» варьировали количеством гексагонов вдоль края типа «кресло». Зависимость энергетической щели от количества гексагонов вдоль края типа «кресло» для чистых и допированных пирролами конфигураций 3Z графеновых нанолент с краем типа «зигзаг» приведена на рис.3. Как видно из рисунка, при высокой концентрации пирролоподобного азота (9,72–17,5 %) в зонной структуре графеновых нанолент с краем типа «зигзаг» открывается энергетическая щель в диапазоне 0,22–0,79 эВ. Это является возможным объяснением того, что высокая концентрация атомов азота в восстановленном оксиде графена не приводит к образованию высокоактивного электрокатализатора [35]. Однако, когда количество гексагонов вдоль края типа «кресло» становится равным 3, величина щели снижается до значения 0,01 эВ, а затем становится равной нулю. Также при концентрациях 9,72–17,5 % наблюдается рост значений уровня Ферми, но и эти значения начинают уменьшаться, когда количество гексагонов вдоль края типа «кресло» становится больше трех.

Следует отметить, что при встраивании в атомную решетку на краю типа «зигзаг» пирролоподобный азот конфигурации 3Z выступает в роли донора и отдает заряд 0,204–0,211 e, что значительно превышает данные показатели у пирролоподобного азота конфигурации 1A, присоединенного к краю типа «кресло» (0,005–0,072 e). Вследствие приобретенного заряда атомы углерода в зоне рядом с пирролом становятся более химически активными, что и является возможным объяснением увеличения абсорбции графена после допирования азотом [22]. Значения уровня Ферми, энергетической щели, а также величины заряда на пирролоподобном азоте конфигурации 3Z в зависимости от массовой доли функциональной группы на краях графеновых нанолент типа «зигзаг» приведены в табл.2.

Таблица 2

Электронные характеристики графеновых нанолент с краем типа «зигзаг», допированных пирролоподобным азотом конфигурации 3Z

Table 2

Electronic characteristics of «zigzag» type graphene nanoribbons doped with pyrrole-like nitrogen 3Z

Количество гексагонов вдоль края типа «кресло»	Концентрация пиррола, %	Уровень Ферми, эВ	Энергетическая щель, эВ	Величина заряда на пирроле, е
1	17,50	–4,48	2,67	0,204
2	9,72	–4,38	0,97	0,208
3	6,73	–4,36	1,11	0,209
4	5,15	–4,41	1,34	0,211
5	4,17	–4,45	0,59	0,211
6	3,50	–4,48	0,61	0,211
7	3,02	–4,49	0,93	0,211

Заключение. Исследования графеновых нанолент с краем типа «кресло» с различной массовой долей пирролоподобного азота, которая варьировалась в пределах 1,33–9,09 %, и графеновых нанолент с краем типа «зигзаг» с массовой долей пирролоподобного азота 3,02–17,5 % методами математического моделирования показали следующее. В результате расчетов энергии образования методом SCC DFTB определены наиболее выгодные конфигурации пирролоподбного азота на краях графеновых нанолент: конфигурация 1A для края типа «кресло» и конфигурация 3Z для края типа «зигзаг». Установлено, что присоединение пирролоподобного азота конфигурации 1A к графеновым нанолентам с краем типа «кресло» приводит к снижению уровня Ферми, при этом скачкообразная зависимость энергетической щели от ширины наноленты сохраняется. Присоединение пирролоподобного азота конфигурации 3Z к графеновым нанолентам с краем типа «зигзаг» приводит к открытию энергетической щели при концентрации пиррола 9,72–17,50 %.

Встраиваясь в графеновую решетку с края типа «зигзаг», пирролоподобный азот становится донором и передает соседним атомам углерода заряд 0,204–0,211 е, в результате чего данная область становится более химически активной. Это объясняет эффект увеличения адсорбции графеновых нанолент типа «зигзаг» при наличии азота. С этой точки зрения графеновые наноленты с краем типа «зигзаг», допированные азотом, могут являться перспективным хеморезистивным элементом наносенсоров, однако данные выводы требуют дальнейших расчетов.

Литература

1. Electric field effect in atomically thin carbon films / ***K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov et al.*** // Science. 2004. Vol. 306. Iss. 5696. P. 666–669. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1102896

2. ***Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J.*** Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene // Science. 2008. Vol. 321. Iss. 5887. P. 385–388. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1157996

3. ***Szczęśniak B., Choma J., Jaroniec M.*** Gas adsorption properties of graphene-based materials // Advances in Colloid and Interface Science. 2017. Vol. 243. P. 46–59. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.03.007

4. ***Wen H., Guo B., Kang W., Zhang C.*** Free-standing nitrogen-doped graphene paper for lithium storage application // RSC Advances. 2018. Vol. 8. Iss. 25. P. 14032–14039. DOI: https://doi.org/10.1039/C8RA01019F

5. A highly nitrogen-doped porous graphene – an anode material for lithium ion batteries / ***Z.-Y. Sui, C. Wang, Q.-S. Yang et al.*** // Journal of Materials Chemistry A. 2015. Vol. 3. Iss. 35. P. 18229–18237. DOI: https://doi.org/10.1039/C5TA05759K

6. ***Elessawy N.A., El Nady J., Wazeer W., Kashyout A.B.*** Development of high-performance supercapacitor based on a novel controllable green synthesis for 3D nitrogen doped graphene // Sci. Rep. 2019. Vol. 9. Art. No. 1129. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-018-37369-x

7. ***Lei H., Tu J., Tian D., Jiao S.*** A nitrogen-doped graphene cathode for high-capacitance aluminum-ion hybrid supercapacitors // New Journal of Chemistry. 2018. Vol. 42. Iss. 19. P. 15684–15691. DOI: https://doi.org/10.1039/C8NJ02170H

8. N-doped graphene field-effect transistors with enhanced electron mobility and air stability / ***W. Xu, T.-S. Lim, H.-K. Seo et al***. // Small. 2014. Vol. 10 (10). P. 1999–2005. DOI: https://doi.org/10.1002/smll.201303768

9. ***Foroughi F., Rahsepar M., Kim H.*** A highly sensitive and selective biosensor based on nitrogen-doped graphene for non-enzymatic detection of uric acid and dopamine at biological pH value // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2018. Vol. 827. P. 34–41. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.09.008

10. Nitrogen-doped graphene sheets grown by chemical vapor deposition: synthesis and influence of nitrogen impurities on carrier transport / ***Y.-F. Lu, S.-T. Lo, J.-C. Lin et al.*** // ACS Nano. 2013. Vol. 7. No. 8. P. 6522–6532. DOI: https://doi.org/10.1021/nn402102y

11. ***Qu L., Liu Y., Baek J.-B., Dai L.*** Nitrogen-doped graphene as efficient metal-free electrocatalyst for oxygen reduction in fuel cells // ACS Nano. 2010. Vol. 4. No. 3. P. 1321–1326. DOI: https://doi.org/10.1021/nn901850u

12. Nitrogen-doped graphene: efficient growth, structure, and electronic properties / ***D. Usachov, O. Vilkov, A. Grüneis et al.*** // Nano Lett. 2011. Vol. 11. No. 12. P. 5401–5407. DOI: https://doi.org/10.1021/nl2031037

13. Solvothermal synthesis of nitrogen-doped graphene decorated by superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles and their applications as enhanced synergistic microwave absorbers / ***Z. Li, X. Li, Y. Zong et al.*** // Carbon. 2017. Vol. 115. P. 493–502. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.01.036

14. Strong two-photon-induced fluorescence from photostable, biocompatible nitrogen-doped graphene quantum dots for cellular and deep-tissue imaging / ***Q. Liu, B. Guo, Z. Rao et al.*** // Nano Lett. 2013. Vol. 13. No. 6. P. 2436−2441. DOI: https://doi.org/10.1021/nl400368v

15. Single source precursor-based solvothermal synthesis of heteroatom-doped graphene and its energy storage and conversion applications / ***B. Quan, S.-H. Yu, D.Y. Chung et al.*** // Sci. Rep. 2014. Vol. 4. Art. No. 5639. DOI: https://doi.org/10.1038/srep05639

16. Nitrogen-doping processes of graphene by a versatile plasma-based method / ***Y.-P. Lin, Y. Ksari, J. Prakash et al.*** // Carbon. 2014. Vol. 73. P. 216–224. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.02.057

17. ***Zeng J.J., Lin Y.J.*** Tuning the work function of graphene by nitrogen plasma treatment with different radio-frequency powers // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104. Iss. 23. Art. ID: 233103. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4882159

18. Aminated graphene for DNA attachment produced via plasma functionalization / ***M. Baraket, R. Stine, W.K. Lee et al.*** // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. Iss. 23. Art. ID: 233123. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4711771

19. Unveiling a facile approach for large-scale synthesis of N-doped graphene with tuned electrical properties / ***M.K. Rabchinskii, S.A. Ryzhkov, M.V. Gudkov et al.*** // 2D Materials. 2020. Vol. 7. No. 4. Art. ID: 045001. DOI: https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab9695

20. ***Nath P., Chowdhury S., Sanyal D., Jana D.*** Ab-initio calculation of electronic and optical properties of nitrogen and boron doped graphene nanosheet // Carbon. 2014. Vol. 73. P. 275–282. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.02.064

21. ***Herath D., Dinadayalane T.*** Computational investigation of double nitrogen doping // J. Mol. Model. 2018. Vol. 24. Art. No. 26. DOI: https://doi.org/10.1007/s00894-017-3560-0

22. ***Al-Aqtash N., Vasiliev I.*** Ab initio study of boron- and nitrogen-doped graphene and carbon nanotubes functionalized with carboxyl groups // J. Phys. Chem. C. 2011. Vol. 115. Iss. 38. P. 18500–18510. DOI: https://doi.org/10.1021/jp206196k

23. ***Moon S., Hijikata Y., Irle S.*** Structural transformations of graphene exposed to nitrogen plasma: quantum chemical molecular dynamics simulations // Phys. Chem. Chem. Phys. 2019. Vol. 21. P. 12112–12120. DOI: https://doi.org/10.1039/C8CP06159A

24. ***Dong Y., Gahl M.T., Zhang C., Lin J.*** Computational study of precision nitrogen doping on graphene nanoribbon edges // Nanotechnology. 2017. Vol. 28. No. 50. Art. ID: 505602. DOI: https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa9727

25. Active sites of nitrogen-doped carbon materials for oxygen reduction reaction clarified using model catalysts / ***D. Guo, R. Shibuya, C. Akiba et al.*** // Science. 2016. Vol. 351. Iss. 6271. P. 361–365. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aad0832

26. ***Liu Y., Zhao J., Cai Q.*** Pyrrolic-nitrogen doped graphene: a metal-free electrocatalyst with high efficiency and selectivity for the reduction of carbon dioxide to formic acid: a computational study // Phys. Chem. Chem. Phys. 2016. Vol. 18 (7). P. 5491–5498. DOI: https://doi.org/10.1039/C5CP07458D

27. Nitrogen-doped graphene for high-performance ultracapacitors and the importance of nitrogen-doped sites at basal planes / ***H.M. Jeong, J.W. Lee, W.H. Shin et al.*** // Nano Lett. 2011. Vol. 11. No. 6. P. 2472–2477. DOI: https://doi.org/10.1021/nl2009058

28. Single-site pyrrolic-nitrogen-doped sp^2-hybridized carbon materials and their pseudocapacitance / ***K. Tian, J. Wang, L. Cao et al.*** // Nature Communications. 2020. Vol. 11. Art. No. 3884. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-020-17727-y

29. Self-consistent-charge density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties / ***M. Elstner, D. Porezag, G. Jungnickel et al.*** // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 58. P. 7260–7268. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.7260

30. ***Parr R.G., Pearson R.G.*** Absolute hardness: companion parameter to absolute electronegativity // J. Am. Chem. Soc. 1983. Vol. 105. No. 26. P. 7512–7516. DOI: https://doi.org/10.1021/ja00364a005

31. ***Gaus M., Goez A., Elstner M.*** Parametrization and benchmark of DFTB3 for organic molecules // J. Chem. Theory Comput. 2013. Vol. 9. No. 1. P. 338–354. DOI: https://doi.org/10.1021/ct300849w

32. Investigation of edge-selectively nitrogen-doped metal free graphene for oxygen reduction reaction / ***H. He, Q. Yang, S. Xiao et al.*** // Journal of Advances in Nanotechnology. 2020. Vol. 1. Iss. 2. P. 5–13.

33. Catalyst-free synthesis of nitrogen-doped graphene via thermal annealing graphite oxide with melamine and its excellent electrocatalysis / ***Z.-H. Sheng, L. Shao, J.-J. Chen et al.*** // ACS Nano. 2011. Vol. 5. No. 6. P. 4350–4358. DOI: https://doi.org/10.1021/nn103584t

34. ***Barone V., Hod O., Scuseria G.E.*** Electronic structure and stability of semiconducting graphene nanoribbons // Nano Lett. 2006. Vol. 6. No. 12. P. 2748–2754. DOI: https://doi.org/10.1021/nl0617033

35. ***Lemes G., Sebastián D., Pastor E., Lázaro M.J.*** N-doped graphene catalysts with high nitrogen concentration for the oxygen reduction reaction // Journal of Power Sources. 2019. Vol. 438. Art. ID: 227036. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227036

Поступила в редакцию 27.04.2021 г.; после доработки 07.07.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

Шунаев Владислав Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиотехники и электродинамики, старший научный сотрудник Образовательно-научного института наноструктур и биосистем Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 81), vshunaev@list.ru

Герасименко Александр Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), заведующий лабораторией биомедицинских нанотехнологий Первого Московского государственного медицинского университета имени И.М. Сеченова (Россия, 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8/2), старший научный сотрудник Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 11999, г. Москва, Ленинский пр., 32а), gerasimenko@bms.zone

Глухова Ольга Евгеньевна – доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой радиотехники и электродинамики, главный научный сотрудник Образовательно-научного института наноструктур и биосистем Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 81), старший научный сотрудник Первого Московского государственного медицинского университета имени И.М. Сеченова (Россия, 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8/2), glukhovaoe@info.sgu.ru

References

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, vol. 306, iss. 5696, pp. 666–669. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1102896

2. Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*, 2008, vol. 321, iss. 5887, pp. 385–388. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1157996

3. Szczęśniak B., Choma J., Jaroniec M. Gas adsorption properties of graphene-based materials. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, vol. 243, pp. 46–59. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.03.007

4. Wen H., Guo B., Kang W., Zhang C. Free-standing nitrogen-doped graphene paper for lithium storage application. *RSC Advances*, 2018, vol. 8, iss. 25, pp. 14032–14039. DOI: https://doi.org/10.1039/C8RA01019F

5. Sui Z.-Y., Wang C., Yang Q.-S., Shu K., Liu Y.-W., Han B.-H., Wallace G.G. A highly nitrogen-doped porous graphene – an anode material for lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, vol. 3, iss. 35, pp. 18229–18237. DOI: https://doi.org/10.1039/C5TA05759K

6. Elessawy N.A., El Nady J., Wazeer W., Kashyout A.B. Development of high-performance supercapacitor based on a novel controllable green synthesis for 3D nitrogen doped graphene. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, art. no. 1129. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-018-37369-x

7. Lei H., Tu J., Tian D., Jiao S. A nitrogen-doped graphene cathode for high-capacitance aluminum-ion hybrid supercapacitors. *New Journal of Chemistry*, 2018, vol. 42, iss. 19, pp. 15684–15691. DOI: https://doi.org/10.1039/C8NJ02170H

8. Xu W., Lim T.-S., Seo H.-K., Min S.-Y., Cho H., Park M.-H., Kim Y.-H., Lee T.-W. N-doped graphene field-effect transistors with enhanced electron mobility and air stability. *Small*, 2014, vol. 10 (10), pp. 1999–2005. DOI: https://doi.org/10.1002/smll.201303768

9. Foroughi F., Rahsepar M., Kim H. A highly sensitive and selective biosensor based on nitrogen-doped graphene for non-enzymatic detection of uric acid and dopamine at biological pH value. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, vol. 827, pp. 34–41. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.09.008

10. Lu Y.-F., Lo S.-T., Lin J.-C., Zhang W., Lu J.-Y., Liu F.-H., Tseng Ch.-M., Lee Y.-H., Liang Ch.-T., Li L.-J. Nitrogen-doped graphene sheets grown by chemical vapor deposition: synthesis and influence of nitrogen impurities on carrier transport. *ACS Nano*, 2013, vol. 7, no. 8, pp. 6522–6532. DOI: https://doi.org/10.1021/nn402102y

11. Qu L., Liu Y., Baek J.-B., Dai L. Nitrogen-doped graphene as efficient metal-free electrocatalyst for oxygen reduction in fuel cells. *ACS Nano*, 2010, vol. 4, no. 3, pp. 1321–1326. DOI: https://doi.org/10.1021/nn901850u

12. Usachov D., Vilkov O., Grüneis A., Haberer D., Fedorov A., Adamchuk V.K., Preobrajenski A.B., Dudin P., Barinov A., Oehzelt M., Laubschat C., Vyalikh D.V. Nitrogen-doped graphene: efficient growth, structure, and electronic properties. *Nano Lett.*, 2011, vol. 11, no. 12, pp. 5401–5407. DOI: https://doi.org/10.1021/nl2031037

13. Li Z., Li X., Zong Y., Tan G., Sun Y., Lan Y., He M., Ren Zh., Zheng X. Solvothermal synthesis of nitrogen-doped graphene decorated by superparamagnetic Fe_3O_4 nanoparticles and their applications as enhanced synergistic microwave absorbers. *Carbon*, 2017, vol. 115, pp. 493–502. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.01.036

14. Liu Q., Guo B., Rao Z., Zhang B., Gong J.R. Strong two-photon-induced fluorescence from photostable, biocompatible nitrogen-doped graphene quantum dots for cellular and deep-tissue imaging. *Nano Lett.*, 2013, vol. 13, no. 6, pp. 2436−2441. DOI: https://doi.org/10.1021/nl400368v

15. Quan B., Yu S.-H., Chung D.Y., Jin A., Park J.H., Sung Y.-E., Piao Y. Single source precursor-based solvothermal synthesis of heteroatom-doped graphene and its energy storage and conversion applications. *Sci. Rep.*, 2014, vol. 4, art. no. 5639. DOI: https://doi.org/10.1038/srep05639

16. Lin Y.-P., Ksari Y., Prakash J., Giovanelli L., Valmalette J.-C., Themlin J.-M. Nitrogen-doping processes of graphene by a versatile plasma-based method. *Carbon*, 2014, vol. 73, pp. 216–224. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.02.057

17. Zeng J.J., Lin Y.J. Tuning the work function of graphene by nitrogen plasma treatment with different radio-frequency powers. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 104, iss. 23, art. ID: 233103. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4882159

18. Baraket M., Stine R., Lee W.K., Robinson J.T., Tamanaha C.R., Sheehan P.E., Walton S.G. Aminated graphene for DNA attachment produced via plasma functionalization. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 100, iss. 23, art. ID: 233123. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4711771

19. Rabchinskii M.K., Ryzhkov S.A., Gudkov M.V., Baidakova M.V., Saveliev S.D., Pavlov S.I., Shnitov V.V., Kirilenko D.A., Stolyarova D.Yu., Lebedev A.M. et al. Unveiling a facile approach for large-scale synthesis of N-doped graphene with tuned electrical properties. *2D Materials*, 2020, vol. 7, no. 4, art. ID: 045001. DOI: https://doi.org/10.1088/2053-1583/ab9695

20. Nath P., Chowdhury S., Sanyal D., Jana D. Ab-initio calculation of electronic and optical properties of nitrogen and boron doped graphene nanosheet. *Carbon*, 2014, vol. 73, pp. 275–282. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.02.064

21. Herath D., Dinadayalane T. Computational investigation of double nitrogen doping. *J. Mol. Model.*, 2018, vol. 24, art. no. 26. DOI: https://doi.org/10.1007/s00894-017-3560-0

22. Al-Aqtash N., Vasiliev I. Ab initio study of boron- and nitrogen-doped graphene and carbon nanotubes functionalized with carboxyl groups. *J. Phys. Chem. C*, 2011, vol. 115, iss. 38, pp. 18500–18510. DOI: https://doi.org/10.1021/jp206196k

23. Moon S., Hijikata Y., Irle S. Structural transformations of graphene exposed to nitrogen plasma: quantum chemical molecular dynamics simulations. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2019, vol. 21, pp. 12112–12120. DOI: https://doi.org/10.1039/C8CP06159A

24. Dong Y., Gahl M.T., Zhang C., Lin J. Computational study of precision nitrogen doping on graphene nanoribbon edges. *Nanotechnology*, 2017, vol. 28, no. 50, art. ID: 505602. DOI: https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa9727

25. Guo D., Shibuya R., Akiba C., Saji S., Kondo T., Nakamura J. Active sites of nitrogen-doped carbon materials for oxygen reduction reaction clarified using model catalysts. *Science*, 2016, vol. 351, iss. 6271, pp. 361–365. DOI: https://doi.org/10.1126/science.aad0832

26. Liu Y., Zhao J., Cai Q. Pyrrolic-nitrogen doped graphene: a metal-free electrocatalyst with high efficiency and selectivity for the reduction of carbon dioxide to formic acid: a computational study. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2016, vol. 18 (7), pp. 5491–5498. DOI: https://doi.org/10.1039/C5CP07458D

27. Jeong H.M., Lee J.W., Shin W.H., Choi Y.J., Shin H.J., Kang J.K., Choi J.W. Nitrogen-doped graphene for high-performance ultracapacitors and the importance of nitrogen-doped sites at basal planes. *Nano Lett.*, 2011, vol. 11, no. 6, pp. 2472–2477. DOI: https://doi.org/10.1021/nl2009058

28. Tian K., Wang J., Cao L., Yang W., Guo W., Liu Sh., Li W., Wang F., Li X., Xu Zh., Wang Zh., Wang H., Hou Y. Single-site pyrrolic-nitrogen-doped sp^2-hybridized carbon materials and their pseudocapacitance. *Nature Communications*, 2020, vol. 11, art. no. 3884. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-020-17727-y

29. Elstner M., Porezag D., Jungnickel G., Elsner J., Haugk M., Frauenheim Th., Suhai S., Seifert G. Self-consistent-charge density-functional tight-binding method for simulations of complex materials properties. *Phys. Rev. B*, 1998, vol. 58, pp. 7260–7268. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.7260

30. Parr R.G., Pearson R.G. Absolute hardness: companion parameter to absolute electronegativity. *J. Am. Chem. Soc.*, 1983, vol. 105, no. 26, pp. 7512–7516. DOI: https://doi.org/10.1021/ja00364a005

31. Gaus M., Goez A., Elstner M. Parametrization and benchmark of DFTB3 for organic molecules. *J. Chem. Theory Comput.*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 338–354. DOI: https://doi.org/10.1021/ct300849w

32. He H., Yang Q., Xiao S., Han X., Li Q., Lv K., Hong J., Tang D., Kejian D. Investigation of edge-selectively nitrogen-doped metal free graphene for oxygen reduction reaction. *Journal of Advances in Nanotechnology*, 2020, vol. 1, iss. 2, pp. 5–13.

33. Sheng Z.-H., Shao L., Chen J.-J., Bao W.-J., Wang F.-B., Xia X.-H. Catalyst-free synthesis of nitrogen-doped graphene via thermal annealing graphite oxide with melamine and its excellent electrocatalysis. *ACS Nano*, 2011, vol. 5, no. 6, pp. 4350–4358. DOI: https://doi.org/10.1021/nn103584t

34. Barone V., Hod O., Scuseria G.E. Electronic structure and stability of semiconducting graphene nanoribbons. *Nano Lett.*, 2006, vol. 6, no. 12, pp. 2748–2754. DOI: https://doi.org/10.1021/nl0617033

35. Lemes G., Sebastián D., Pastor E., Lázaro M.J. N-doped graphene catalysts with high nitrogen concentration for the oxygen reduction reaction. *Journal of Power Sources*, 2019, vol. 438, art. ID: 227036. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227036

Received 27.04.2021; Revised 07.07.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the authors:

Vladislav V. Shunaev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Radio Engineering and Electrodynamics Department, Senior Researcher of the Educational and Scientific Institute of Nanostructures and Biosystems, Saratov State University (Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya st., 81), vshunaev@list.ru

Alexander Yu. Gerasimenko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Senior Researcher of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Head of the Laboratory of Biomedical Nanotechnologies, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Russia, 119991, Moscow, Trubetskaya st., 8/2), Senior Researcher of Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 119991, Moscow, Leninsky av., 32a), gerasimenko@bms.zone

Olga E. Glukhova – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Educational and Scientific Institute of Nanostructures and Biosystems, Saratov State University (Russia, 410012, Saratov, Astrakhanskaya st., 81), Senior Researcher, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Russia, 119991, Moscow, Trubetskaya st., 8/2), glukhovaoe@info.sgu.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- **по каталогу** «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «УП Урал-Пресс». Подписной индекс 47570
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934
- **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 «УП Урал-Пресс»:** www.delpress.ru
- **ООО «ИВИС»:** www.ivis.ru

УДК 539.216.2-022.539:620.18 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-459-467

Исследование химического состава пленок, полученных методом электродугового распыления графита и титана из двух источников

З.М. Хамдохов[1], З.Ч. Маргушев[1], З.Х. Калажоков[1,2], Х.Х. Калажоков[2], Д.Д. Левин[3]

[1]Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, г. Нальчик, Россия
[2]Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Россия
[3]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

hamdohov@mail.ru

Перспективным материалом для создания холодных катодов являются углеродные пленки с приемлемыми эмиссионными свойствами и удовлетворительной адгезией к подложке. Включения металлических элементов в углеродную пленку, например хрома, титана и т.д., улучшают ее адгезию к подложке. В работе представлен один из способов получения покрытий на основе углерода и титана – электродуговое распыление композитного катода Ti/C в атмосфере аргона. Отмечено, что наличие в общем плазменном потоке микрочастиц углерода является источником структурных дефектов в растущей пленке. Решить данную проблему позволяет магнитная сепарация углеродной плазмы. Методом одновременного электродугового распыления графита в магнитном поле и титана из двух испарителей получены композитные металл-углеродные пленки. С использованием методов спектроскопии комбинационного рассеяния света и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии изучен состав пленок. Установлено, что полученные образцы представляют собой композитные пленки, состоящие из наночастиц графита, нанокластеров $Ti_{14}C_{13}$ или Ti_8C_{12}, оксидов титана и соединений карбида титана TiC_xN_{1-x}.

Ключевые слова: углерод; электродуговой метод; титан; графит; наночастицы; карбид титана; КРС- и РФЭС-спектры

Для цитирования: Исследование химического состава пленок, полученных методом электродугового распыления графита и титана из двух источников / З.М. Хамдохов, З.Ч. Маргушев, З.Х. Калажоков и др. // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 459–467. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-459-467

© З.М. Хамдохов, З.Ч. Маргушев, З.Х. Калажоков, Х.Х. Калажоков, Д.Д. Левин, 2021

Investigation of the Chemical Composition of Films Obtained by Electric Arc Spraying of Graphite and Titanium from Two Sources

Z.M. Khamdokhov[1], Z.Ch. Margushev[1], Z.Kh. Kalazhokov[1,2], Kh.Kh. Kalazhokov[2], D.D. Levin[3]

[1]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: A promising material for cold cathodes creation are carbon films with both acceptable emission properties and satisfactory adhesion to the substrate. It is known that inclusions of metallic elements (chromium, titanium, etc.) improve the adhesion of the carbon film to the substrate. One of the methods for producing coatings based on carbon and titanium is electric arc spraying of a Ti/C composite cathode in an argon atmosphere. The disadvantage of this method is the presence in the total plasma flow of carbon microparticles, which are sources of structural defects in the growing film. Magnetic separation of carbon plasma solves the above problem. In this work, composite metal-carbon films were obtained by simultaneous electric arc spraying of graphite in a magnetic field and of titanium from two evaporators. The composition of the films was studied by Raman spectroscopy (RS) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). It has been established that the samples obtained are composite films consisting of graphite nanoparticles, $Ti_{14}C_{13}$ nanoclusters or Ti_8C_{12}, titanium oxides, and titanium carbide TiC_xN_{1-x} compounds.

Keywords: carbon; electric arc spraying; titanium; graphite; nanoparticles; titanium carbide; Raman spectrum; XPS spectrum

For citation: Khamdokhov Z.M., Margushev Z.Ch., Kalazhokov Z.Kh., Kalazhokov Kh.Kh., Levin D.D. Investigation of the chemical composition of films obtained by electric arc spraying of graphite and titanium from two sources. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 459–467. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-459-467

Введение. Перспективным материалом для создания холодных катодов являются углеродные пленки, содержащие эмиссионные центры – нанокластерные структуры (графен, углеродные нанотрубки, нанографиты) с низкой работой выхода электронов. Особый интерес представляют углеродные покрытия, имеющие как приемлемые эмиссионные свойства, так и удовлетворительную адгезию к подложке. Включения металлических элементов, например хрома, титана и т.д., как правило, улучшают адгезию [1]. Один из способов получения покрытий на основе углерода и титана – электродуговое распыление композитного катода Ti/C в атмосфере аргона. В работе [2] данным способом получены покрытия TiC-C, которые помимо аморфного углерода содержат кластеры карбида титана и наночастицы углерода в графитоподобном состоянии. Недостаток электродугового распыления катода Ti/C заключается в том, что в общем

плазменном потоке присутствуют микрочастицы углерода, бомбардирующие растущую пленку и являющиеся источниками структурных дефектов. Это делает практически невозможным применение литографии и создание многослойных структур. Применение магнитного поля для сепарации продуктов распыления графита (выделения микрочастиц углерода из плазменного потока) [3, 4] решает данную проблему. Для этого используют испаритель с графитовым катодом, оснащенный системой магнитной сепарации плазменного потока, и испаритель с титановым катодом.

Цель настоящей работы – изучение фазового состава покрытий на основе TiC-C, полученных методом одновременного электродугового распыления графита и титана из двух испарителей, для создания высокоэффективных катодов.

Эксперимент. Для эксперимента использовали кремниевые подложки, покрытые субмикронными пленками нитрида титана. Исследуемые пленки осаждали методом электродугового распыления графитового и углеродного катодов в аргоновой среде на установке вакуумного нанесения износостойких покрытий УВНИПА. Вакуум обеспечивали форвакуумным механическим насосом НВР-16Д и диффузионным насосом Н-400/7000. Ток дуги при горении катода из графита или титана составлял ≈ 90 А, температура осаждения не превышала 80 °С. Отрицательный потенциал смещения, подаваемый на образец, равнялся 150 В. Толщина осажденной пленки ~ 0,5 мкм. Перед осаждением поверхность подложки подвергали обработке ионами аргона в течение 15 мин. Непрерывное горение дугового разряда поддерживали напуском в откаченную камеру аргона до парциального давления $2 \cdot 10^{-1}$ Па. Схема плазменных пучков углерода и титана приведена на рис.1.

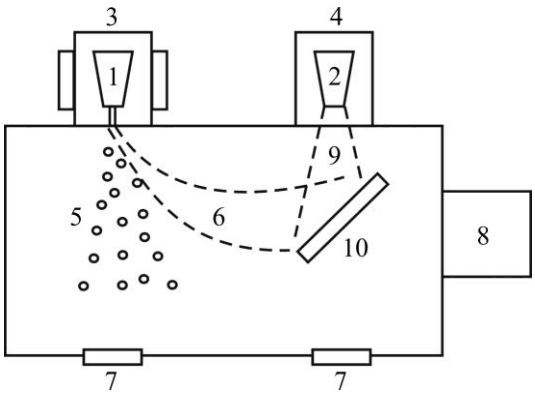


Рис.1. Схема плазменных пучков углерода и титана: 1 – графитовый катод; 2 – титановый катод; 3 – испаритель № 1; 4 – испаритель № 2; 5 – микрочастицы графита; 6 – углеродная плазма; 7 – смотровые окна; 8 – ионная пушка; 9 – титановая плазма; 10 – подложка

Fig.1. Scheme of plasma beams of carbon and titanium: 1 – graphite cathode; 2 – titanium cathode; 3 – evaporator No. 1; 4 – evaporator No. 2; 5 – graphite microparticles; 6 – carbon plasma; 7 – viewing windows; 8 – ion gun; 9 – titanium plasma; 10 – substrate

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) исследуемых образцов получены с помощью спектрометра Centaur U HR (ООО «Нано Скан Технология», г. Долгопрудный, Россия). Длина волны лазера равна 532,8 нм при мощности лазера 25 мВт. Исследования методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) выполнены с использованием спектрометра K-Alpha (Termo Scientific) с источником рентгеновского излучения Al-$K\alpha$ (1486,6 эВ) при вакууме не хуже $4{,}5 \times 10^{-9}$ мбар. Вычитание фона вторичных электронов проводили методом Ширли. Калибровку спектрометра осуществляли по пикам Au $4f_{7/2}$; Cu $2p_{3/2}$; Ag $3d_{5/2}$, отвечающим энергиям связи 83,96; 932,62; 368,21 эВ.

Результаты и их обсуждение. Типичный КРС-спектр поверхности исследуемых пленок показан на рис.2. На спектре наблюдаются три пика:

- пик *D* (1361 см$^{-1}$) – «дышащая» мода, связанная с рассеянием фононов на дефектах решетки, соответствующая ОН-деформации группы С–ОН, имеет сдвиг относительно пика *D* (1350 см$^{-1}$) графена [5];

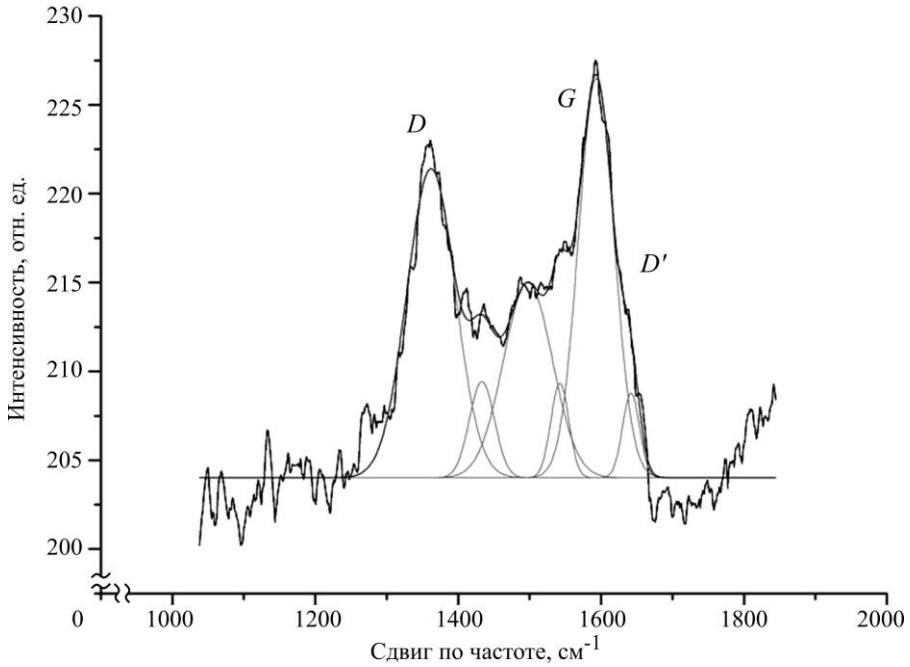


Рис.2. КРС-спектр поверхности пленки TiC-C
Fig.2. Raman spectra of the TiC-C film surface

- пик *G* (1593 см$^{-1}$) – относится к внутриплоскостным колебаниям соседних атомов углерода (рассеянию на фононах вблизи центра зоны Бриллюэна), имеет сдвиг относительно пика *D* (1382 см$^{-1}$) графена [5];

- пик *D′* (1621 см$^{-1}$) – можно отнести к колебаниям в плоскости (C=C) от неокисленных CC-связей sp^2.

В зависимости от дефектов в образце положение пиков меняется. Пики *D* и *D′* также могут быть связаны с окислением пленки. Отношение интенсивности пиков *D* к *G* прямо пропорционально отношению вклада sp^3-областей к sp^2-областям в пленке. Положение пика *G* смещается в сторону меньших волновых чисел по мере увеличения длины волны возбуждения. В рассматриваемом случае пик *G* составляет 1593 см$^{-1}$. Это позволяет говорить о том, что исследуемый материал находится между высокоориентированным пиролитическим графитом (HOPG) и нанокристаллическим графитом (C-*ng*).

При исследовании состава пленки методом РФЭС проводили послойное травление пленки пучком ионов аргона с энергией 1 кэВ с одновременным контролем состава по глубине. На рис.3 представлена зависимость относительных атомных концентраций компонентов пленки от глубины травления, рассчитанной относительно скорости травления TaO_2. РФЭС-спектры высокого разрешения для уровней C 1*s*, O 1*s*, N 1*s* и Ti 2*p* получены с поверхности исходной пленки (до процесса ионного травления) и при травлении пленки в течение 50 с (режим *A*), 900 с (режим *B*) и 2000 с (режим *C*).

На рис.4 представлены РФЭС-спектры для уровня Ti 2*p*, снятые до и после травления пленки (режимы *A* и *B*). Видно, что по мере травления происходит разрушение оксидного слоя титана на поверхности пленки. После ухода оксидного слоя проявляется пик Ti 2*p*3/2 с энергией связи 454,8 эВ и энергией расщепления пика дублета 6 эВ, характерного для соединения TiC_xN_{1-x} [6]. Для сравнения приведен пик дублета Ti 2*p*, снятый с контрольного образца металлического титана после его очистки травлением ионами аргона с энергией 3 кэВ в течение 30 мин. Энергия связи пика Ti 2*p*3/2 металлического титана составляет 454,1 эВ, энергия расщепления равна 6,1 эВ [2].

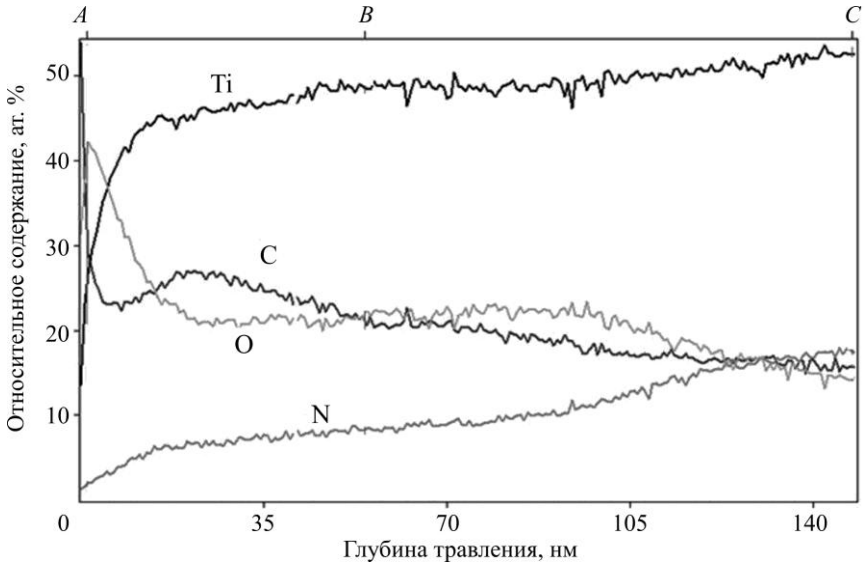


Рис.3. Профиль распределения компонентов пленки по глубине
Fig.3. Profile of the distribution of film components in depth

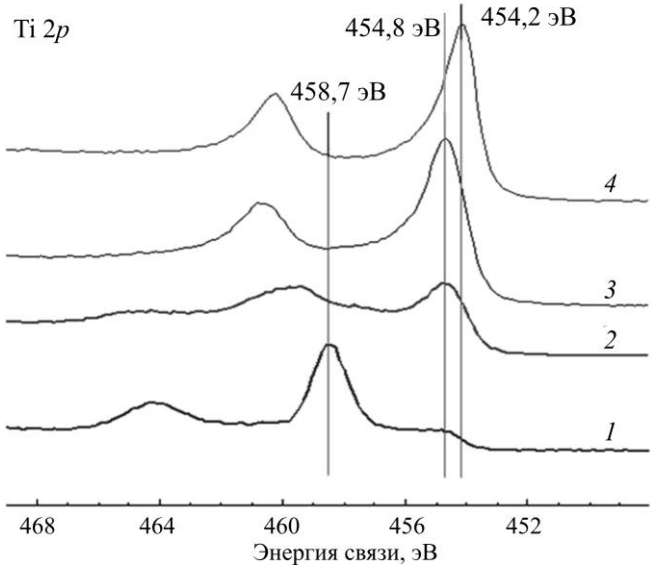


Рис.4. РФЭС-спектры для уровня Ti 2*p*: *1* – поверхности осажденной пленки; *2* – режим *A*; 3 – режим *B*; 4 – поверхности пленки Ti
Fig.4. XPS spectra for Ti 2*p*: *1* – surfaces of the deposited film; *2* – mode *A*; *3* – mode *B*; *4* – surfaces of the Ti film

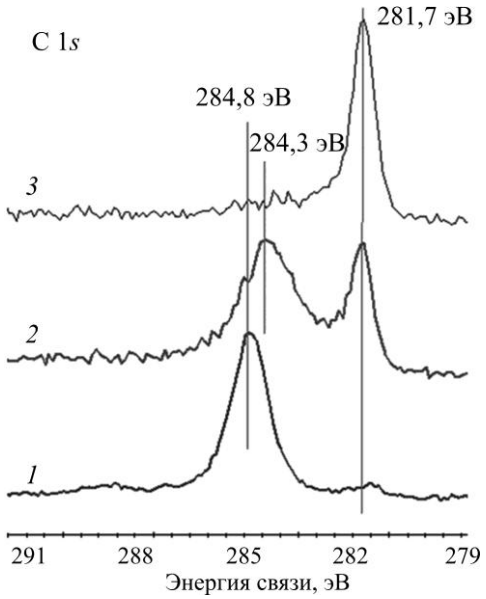


Рис.5. РФЭС-спектры для уровня C 1*s*, снятые на поверхности образца до (*1*) и после травления в режимах *B* (*2*) и *C* (*3*)
Fig.5. XPS spectra for C 1*s* recorded on the sample surface (*1*), etching modes *B* (*2*) and *C* (*3*)

На рис.5 представлены РФЭС-спектры поверхности образца для уровня C 1*s*, снятые до и после травления в режимах *B* и *C*. Характер спектров показывает, что травление приводит к очистке поверхностных загрязнений. Пик с энергией связи 281,7 эВ соответствует соединению Ti-C. Смещение интенсивного пика с энергией 284,8 эВ на 0,4 эВ в сторону более низких энергий связи объясняют наличием углерода в кристаллическом состоянии [7, 8].

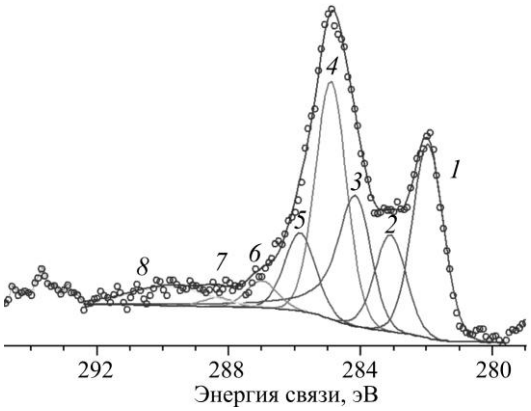


Рис.6. РФЭС-спектр для уровня C 1*s* (режим *A*): *1* – C-Ti; *2* – $Ti_{14}C_{13}$ или Ti_8C_{12}; *3* – C-*ng*; *4* – C-C; *5* – C-O-C/C-OH; *6* – C=O; *7* – C(O)O; *8* – π-π*

Fig.6. XPS spectrum of C 1*s* level (mode A): *1* – C-Ti; *2* – $Ti_{14}C_{13}$ or Ti_8C_{12}; *3* – C-*ng*; *4* – C-C; *5* – C-O-C / C-OH; *6* – C = O; *7* – C (O) O; 8 – π-π*

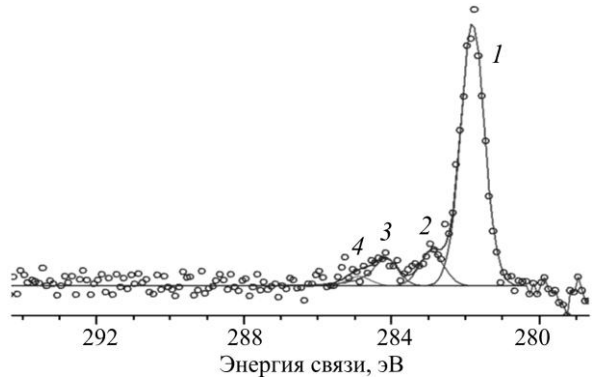


Рис.7. РФЭС-спектр для уровня C 1*s* (режим *B*): *1* – C-Ti; *2* – $Ti_{14}C_{13}$ или Ti_8C_{12}; *3* – C-*ng*; *4* – C-C

Fig.7. XPS spectrum of C 1*s* level (mode *B*): *1* – C-Ti; *2* – $Ti_{14}C_{13}$ or Ti_8C_{12}; *3* – C-*ng*; *4* – C-C

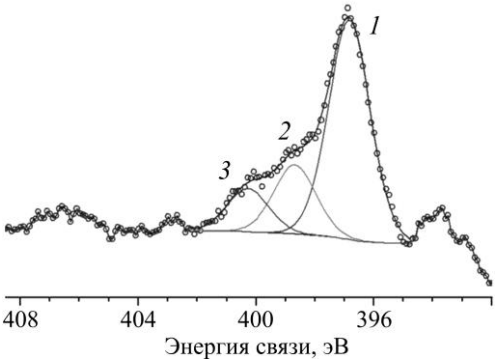


Рис.8. РФЭС-спектр для уровня N 1*s* (режим *A*): *1* – TiC_xN_{1-x}; *2* и *3* – N-C

Fig.8. XPS spectrum of level N 1*s* (mode *A*): *1* – TiC_xN_{1-x}; *2* and *3* – N-C

РФЭС-спектр для уровня C 1*s* (рис.6) указывает на наличие пика с энергией ~281,8 эВ, который можно отнести к энергии связи атомов углерода в соединении Ti-C. Другая часть спектра проявляется в виде асимметричного пика с максимумом ~284,2 эВ, характерного для графита и пика плазмонных потерь с энергией связи 291 эВ [5]. Остатки органических соединений из атмосферы на поверхности пленки представлены пиками C-C (284,8 эВ), C-O-C/C-OH (286,4 эВ), C=O (287,9) и C(O)O (288,3 эВ). Корректное описание данного спектра возможно при условии учета еще одной составляющей – пика с энергией ~ 283 эВ. Авторы работы [7] считают, что этот пик относится к молекулам монооксида углерода CO, адсорбированным на поверхности Ti, а авторы работы [2] – к соединениям $Ti_{14}C_{13}$ или Ti_8C_{12}.

На рис.7 показан РФЭС-спектр для уровня C 1*s*, полученный в режиме *B*. Видно, что дальнейшее травление приводит к уходу органической составляющей соединений углерода. На спектре присутствуют в основном пики, характерные для соединений C-Ti, нанокластеров $Ti_{14}C_{13}$ и нанографита C-*ng*. На рис.8 представлен РФЭС-спектр для уровня N 1*s*, полученный в режиме *A*. Большая часть азота содержится в фазе TiC_xN_{1-x}, что подтверждается доминированием пика с энергией связи 396,8 эВ. Остальные два пика с энергиями 398,7 и 400,4 эВ связаны с соединениями N-C [9–12].

Заключение. Исследования КРС- и РФЭС-спектров образца покрытия TiC-C, выращенного одновременным электродуговым распылением графита и титана из двух испарителей при сепарации продуктов испарения графита в магнитном поле, показали следующее. Полученный образец представляет собой композитную пленку, состоящую из наночастиц графита, нанокластеров $Ti_{14}C_{13}$ или Ti_8C_{12}, оксидов титана и соединений карбида титана TiC_xN_{1-x}.

Представленный в работе метод электродугового распыления графита и титана из двух источников является дальнейшим развитием метода плазменного напыления пленок. По сравнению с электродуговым распылением композитного катода Ti/C рассмотренный метод позволяет, варьируя в процессе напыления содержанием углерода и титана в плазменном потоке, получать гладкие пленки Ti/C разного химического и фазового составов.

Материалы статьи доложены на 5-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника – 2021», (3–9 февраля 2021 г., Кабардино-Балкарская Республика, пос. Эльбрус).

Литература

1. ***Andrievskii R.A.*** The synthesis and properties of interstitial phase films // Russ. Chem. Rev. 1997. Vol. 66 (1). P. 53–72. DOI: https://doi.org/10.1070/RC1997v066n01ABEH000290

2. Investigation of TiC-C coatings by X-ray photoelectron spectroscopy / ***M.V. Kuznetsov, S.V. Borisov, O.P. Shepatkovskii et al.*** // J. Synch. Investig. 2009. Vol. 3. Iss. 3. P. 331–337. DOI: https://doi.org/10.1134/S102745100903001X

3. Effect of thermal annealing on the properties of a C/Ni heterostructure / ***E.Z. Khamdohov, Z.M. Khamdohov, V.S. Kulikauskas et al.*** // J. Synch. Investig. 2014. Vol. 8. Iss. 6. P. 1297–1301. DOI: https://doi.org/10.1134/S1027451014060305

4. Свойства хром-никелевых пленок после воздействия пучка ионов углерода / ***Э.З. Хамдохов, З.М. Хамдохов, А.З. Хамдохов и др.*** // Изв. Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2015. № 5 (67). С. 18–23.

5. ***Ferrari A.C., Robertson J.*** Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 61. Iss. 20. P. 14095–14107. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095

6. NIST Standard Reference Database 20, Version 4.1 // National Institute of Standards and Technology: [Web] / U.S. Department of Commerce. URL: https://srdata.nist.gov/xps/ (дата обращения: 29.09.2021).

7. ***Lu M., Cheng H., Yang Y.*** A comparison of solid electrolyte interphase (SEI) on the artificial graphite anode of the aged and cycled commercial lithium ion cells // Electrochimica Acta. 2008. Vol. 53. Iss. 9. P. 3539–3546. DOI: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.09.062

8. Microwave assisted exfoliation and reduction of graphite oxide for ultracapacitors / ***Y. Zhu, Sh. Murali, M.D. Stoller et al.*** // Carbon. 2010. Vol. 48. Iss. 7. P. 2118–2122. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.02.001

9. ***Ocal C., Ferrer S.*** The strong metal-support interaction (SMSI) in Pt-TiO_2 model catalysts. A new CO adsorption state on Pt-Ti atoms // J. Chem. Phys. 1986. Vol. 84. Iss. 11. P. 6474–6478. DOI: https://doi.org/10.1063/1.450743

10. Thin TiCN films prepared by hybrid magnetron-laser deposition / ***T. Kocourek, M. Jelinek, J. Kadlec et al.*** // Plasma Process. Polym. 2007. Vol. 4. Iss. S1. P. S651–S654. DOI: https://doi.org/10.1002/ppap.200731603

11. ***Mi P., He J., Qin Y., Chen K.*** Nanostructure reactive plasma sprayed TiCN coating // Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 309. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.033

12. ***Bertóti I.*** Characterization of nitride coatings by XPS // Surface and Coatings Technology. 2002. Vol. 151-152. P. 194–203. DOI: https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01619-X

Поступила в редакцию 26.07.2021 г.; после доработки 26.07.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

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

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

References

1. Andrievskii R.A. The synthesis and properties of interstitial phase films. *Russ. Chem. Rev.*, 1997, vol. 66 (1), pp. 53–72, DOI: https://doi.org/10.1070/RC1997v066n01ABEH000290

2. Kuznetsov M.V., Borisov S.V., Shepatkovskii O.P., Veksler Yu.G., Kozhevnikov V.L. Investigation of TiC-C coatings by X-ray photoelectron spectroscopy. *J. Synch. Investig.*, 2009, vol. 3, iss. 3, pp. 331–337. DOI: https://doi.org/10.1134/S102745100903001X

3. Khamdohov E.Z., Khamdohov Z.M., Kulikauskas V.S., Chernikh P.N., Serushkin S.V., Migunova E.S. Effect of thermal annealing on the properties of a C/Ni heterostructure. *J. Synch. Investig.*, 2014, vol. 8, iss. 6, pp. 1297–1301. DOI: https://doi.org/10.1134/S1027451014060305

4. Khamdokhov E.Z., Khamdokhov Z.M., Khamdokhov A.Z., Teshev R.Sh., Kalazhokov Z.H., Kalazhokov H.H., Kulikauskas V.S., Eriskin A.A. Properties of chromium-nickel alloy films after exposure to carbon ion beam. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN = News of the Kabardin-Balkar Scientific Center of RAS*, 2015, no. 5 (67), pp. 18–23. (In Russian).

5. Ferrari A.C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 61, iss. 20, pp. 14095–14107. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095

6. NIST Standard Reference Database 20, Version 4.1. *National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce.* Available at: https://srdata.nist.gov/xps/ (accessed: 29.09.2021).

7. Lu M., Cheng H., Yang Y. A comparison of solid electrolyte interphase (SEI) on the artificial graphite anode of the aged and cycled commercial lithium ion cells. *Electrochimica Acta*, 2008, vol. 53, iss. 9, pp. 3539–3546. DOI: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.09.062

8. Zhu Y., Murali Sh., Stoller M.D., Velamakanni A., Piner R.D., Ruoff R.S. Microwave assisted exfoliation and reduction of graphite oxide for ultracapacitors. *Carbon*, 2010, vol. 48, iss. 7, pp. 2118–2122. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.02.001

9. Ocal C., Ferrer S. The strong metal-support interaction (SMSI) in Pt-TiO_2 model catalysts. A new CO adsorption state on Pt-Ti atoms. *J. Chem. Phys.*, 1986, vol. 84, iss. 11, pp. 6474–6478. DOI: https://doi.org/10.1063/1.450743

10. Kocourek T., Jelinek M., Kadlec J., Popov C., Santoni A. Thin TiCN films prepared by hybrid magnetron-laser deposition. *Plasma Process. Polym.*, 2007, vol. 4, iss. S1, pp. S651–S654. DOI: https://doi.org/10.1002/ppap.200731603

11. Mi P., He J., Qin Y., Chen K. Nanostructure reactive plasma sprayed TiCN coating. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 309, pp. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.033

12. Bertóti I. Characterization of nitride coatings by XPS. *Surface and Coatings Technology*, 2002, vol. 151-152, pp. 194–203. DOI: https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01619-X

Received 26.07.2021; Revised 26.07.2021; Accepted 11.10.2021.

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, Chernishevsky 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, Chernishevsky st., 173), khh49@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

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 «УП Урал-Пресс»:** www.delpress.ru
- **ООО «ИВИС»:** www.ivis.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 621.38.049.77:339.9(100)(470+571)(048.8) **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-468-480**

Обзор полупроводниковой промышленности в мире и России: производство и оборудование

А.А. Зеленский, М.С. Морозкин, А.А. Грибков

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

andarmo@yandex.ru

Ведущими мировыми производителями полупроводниковой продукции в настоящее время являются США, Южная Корея, Япония, страны ЕС и Китай. Доля России в мировом производстве незначительна (0,06 %). Основной объем мирового производства специализированного оборудования для полупроводниковой промышленности сосредоточен в пяти ведущих компаниях: Applied Materials, Tokyo Electron, ASML, Lam Research и KLA Corporation. В России такое оборудование не производится, что приводит к импортозависимости. В работе представлена текущая ситуация на мировом и российском рынках полупроводниковой продукции, а также рынках обрабатывающего оборудования и промышленных роботов, используемых в полупроводниковой промышленности. Рассмотрено решение проблемы обеспечения полупроводниковой промышленности обрабатывающим оборудованием и промышленными роботами как в ведущих странах мира, так и в России. Анализ внешней торговли и потребления оборудования в мире показал, что главным фактором в определении позиции страны на мировом рынке является внешнеполитическая конъюнктура при обеспечении ее технологической безопасности. В отношении Китая и России необходимо создание собственного машиностроительного производства оборудования для полупроводниковой промышленности.

Ключевые слова: полупроводник; микросхема; оборудование; рынок; производство

Для цитирования: Зеленский А.А., Морозкин М.С., Грибков А.А. Обзор полупроводниковой промышленности в мире и России: производство и оборудование // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 468–480. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-468-480

© А.А. Зеленский, М.С. Морозкин, А.А. Грибков, 2021

Overview of the Semiconductor Industry in the World and in Russia: Production and Equipment

A.A. Zelensky, M.S. Morozkin, A.A. Gribkov

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

andarmo@yandex.ru

Abstract: The world's leading manufacturers of semiconductor products are currently the United States, South Korea, Japan, the EU, and China. Russia's share in world production is insignificant (0.06 %). The main volume of global production of specialized equipment for the semiconductor industry is concentrated in five leading companies: Applied Materials, Tokyo Electron, ASML, Lam Research and KLA Corporation. This kind of equipment is not produced in Russia, which leads to dependence on the import of such equipment. In this work, the current situation in the global and Russian markets of semiconductor products, as well as the markets of processing equipment and industrial robots used in the semiconductor industry, are described. The authors consider the solution to the problem of providing the semiconductor industry with processing equipment and industrial robots in the leading countries of the world and the possibility of solving this problem in Russia. As the analysis of foreign trade and equipment consumption in the world has shown, the main factor in determining the country's position in the world market is the foreign policy environment while ensuring its technological security. In the case of China and Russia, it is necessary to create domestic machine-building production of equipment for the semiconductor industry.

Keywords: semiconductor; chip; equipment; market; industry

For citation: Zelensky A.A., Morozkin M.S., Gribkov A.A. Overview of the semiconductor industry in the world and Russia: production and equipment. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 468–480. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-468-480

Введение. Определяющей тенденцией развития мировой экономики в последнее десятилетие и на несколько ближайших десятилетий является цифровая трансформация производства в рамках четвертой промышленной революции. Основой цифровой трансформации служит развитие цифровых технологий. В настоящее время мировой рынок цифровых технологий включает в себя несколько сегментов, наиболее значимым из которых является полупроводниковая продукция (около 450 млрд долл. в 2020 г.). Масштабы других сегментов рынка цифровых технологий на сегодняшний день сравнительно невелики: мировой рынок квантовых технологий составляет около 2 млрд долл., мировой рынок нейроморфных вычислительных систем – около 2,5 млрд долл.

Анализ производства полупроводниковой продукции. По данным консалтинговой компании Gartner [1], в 2020 г. мировой объем продаж полупроводниковой продукции (интегральных микросхем, оптоэлектронных, сенсорных и дискретных (O-S-D) компонентов) составил 449,8 млрд долл., что на 7,3 % выше уровня 2019 г. (419,1 млрд долл.) и на 5,2 % ниже уровня 2018 г. (474,6 млрд долл.). При этом за период 2010–2020 гг. объем мирового рынка вырос более чем в 1,5 раза.

Основными отраслями-потребителями полупроводниковой продукции являются (2019 г.) [2]: производство средств связи – 33,0 %; производство компьютерной техники (включая серверное оборудование) – 28,5 %; производство товаров широкого потребления – 13,3 %; автомобилестроение – 12,2 %; машиностроение – 11,9 %. Полупроводниковая промышленность приносит существенную часть выручки обрабатывающей промышленности (2019 г.): в США – 16,4 % от выручки всей обрабатывающей промышленности страны, в странах Европы – 15,3 %, Тайване – 10,3 %, Японии – 8,4 %, Китае – 8,3 %, Южной Корее – 7,7 %. Распределение потребления полупроводниковой продукции по регионам мира следующее [3]: Китай – 34 %, Америка – 20 %, Европа – 9 %, Япония – 9 %, другие регионы – 28 %. На долю России приходится примерно 0,7 % мирового потребления.

Крупнейшими мировыми производителями полупроводниковой продукции являются [4]: США (47 % мирового производства по стоимости), Южная Корея (19 %), Япония (10 %), ЕС (10 %), Тайвань (6 %), Китай (5 %). На все другие страны приходится 3 % мирового производства. Вклад России в мировое производство полупроводниковой продукции составляет 0,06 % (около 20 млрд руб.). Половина мирового производства полупроводниковой продукции в натуральном выражении и две трети в стоимостном выражении в настоящее время осуществляются по проектным нормам 28 нм и менее. В этих сегментах наиболее весомо представлены Тайвань, Южная Корея и Япония (табл.1). Компоненты по нормам 10–5 нм выпускаются только в Тайване (TSMC) и Южной Корее (Samsung).

Таблица 1

Распределение мирового производства микросхем по проектным нормам, % шт., эквивалентных 200-мм пластин (2019 г.)

Table 1

Distribution of world production of microcircuits by design standards, % pcs., equivalent to 200 mm plates (2019)

Страна, регион	Проектные нормы, нм					
	≥ 200	≥65, <200	≥28, <65	≥20, <28	<20	Всего
Тайвань	13,2	25,6	42,4	24,5	15,5	21,9
Южная Корея	4,7	10,9	9,2	39,3	33,8	21,2
Япония	21,1	16,2	4,8	2,7	24,2	16,7
Северная Америка	18,3	13,1	15,7	6,2	11,3	12,9
Китай	15,1	17,8	11,7	14,0	8,1	12,5
Европа	16,2	7,1	6,1	2,9	1,2	6,0
Прочие страны*	11,5	9,3	10,0	10,5	5,9	8,7
Всего	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

*Сингапур, Малайзия, Израиль и др.

К числу ведущих производителей полупроводниковой продукции относятся Intel, Samsung, TSMC, SK Hynix и Micron (табл.2), а также Qualcomm (США), Broadcom (США), Texas Instruments (США), Toshiba (Япония), Nvidia (США) и др. [5]. В полупроводниковой промышленности России в настоящее время имеется всего несколько компаний с большими объемами производства: группа компаний «Микрон», АО «Группа Кремний Эл» и группа компаний «Ангстрем». Согласно финансовой отчетности компаний, выручка группы компаний «Микрон» в 2020 г. составила 15,62 млрд руб. (2019 г. – 11,86 млрд руб.), АО «Группа Кремний Эл» – 1,99 млрд руб. (2019 г. – 2,16 млрд руб.), группы компаний «Ангстрем» – 1,44 млрд руб. (2019 г. – 1,49 млрд руб.).

Таблица 2

Выручка ведущих мировых производителей полупроводниковой продукции в 2019 и 2020 гг., млрд долл.

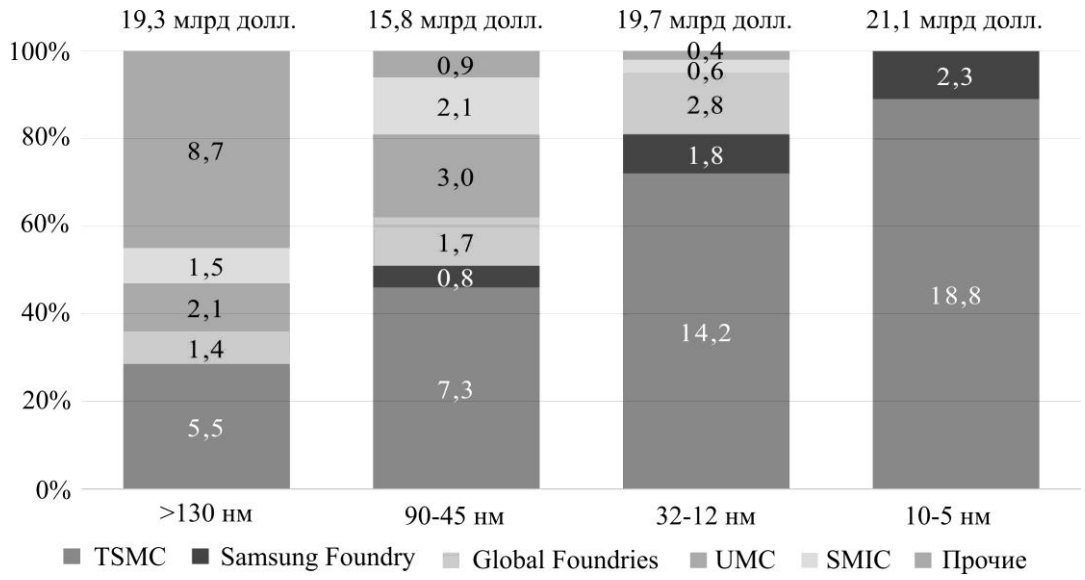
Table 2

Revenue of the world's leading manufacturers of semiconductor products in 2019 and 2020, billion USD

Компания	2019			2020		
	ИС	O-S-D	Всего	ИС	O-S-D	Всего
Intel (США)	70,797	0	70,797	73,894	0	73,894
Samsung (Южная Корея)	52,486	3,223	55,709	56,899	3,583	60,482
TSMC* (Тайвань)	34,668	0	34,668	45,420	0	45,420
SK Hynix (Южная Корея)	22,578	0,607	23,185	25,499	0,971	26,470
Micron (США)	22,405	0	22,405	21,659	0	21,659

*Компания, выполняющая изготовление полупроводников на заказ.

Среди производителей, занимающихся изготовлением полупроводниковой продукции по заказам других компаний-производителей, доминирующее положение в мире занимает компания TSMC (Тайвань) (рисунок) [6]. В 2020 г. на долю TSMC пришлось 28 % общеотраслевой выручки, которая составила 19,3 млрд долл., в производстве компонентов по проектным нормам свыше 130 нм, 46 % (15,8 млрд долл.) – по нормам 90–45 нм, 72 % (19,7 млрд долл.) – по нормам 12–32 нм, 89 % (21,1 млрд долл.) – по нормам 10–5 нм. В России в настоящее время осуществляется производство по проектным нормам не менее 180–90 нм (группа компаний «Микрон»). АО «Группа Кремний Эл» освоено пока производство только по проектным нормам 500 нм, в планах – 350 нм; у группы компаний «Ангстрем» современных проектных норм не имеется.



Изготовление полупроводников на заказ в 2020 г. ведущими foundry-компаниями, млрд долл.
Custom manufacturing of semiconductors in 2020 by leading foundry companies, billion USD

Развитие полупроводниковой промышленности в России – актуальная задача, ее решение обозначено в рамках государственной промышленной политики, ключевыми составляющими которой являются:

– Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 января 2020 г. № 20-р);

– Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Новые поколения микроэлектроники и создание электронной компонентной базы», предложенная ГК «Ростех» и утвержденная согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 17 февраля 2020 г. № 312-р.

Согласно консервативному сценарию развития электронной промышленности России к 2030 г. объем выручки промышленных и научных организаций электронной промышленности должен вырасти (по отношению к 1868 млрд руб. в 2018 г.) в 2,3 раза, согласно целевому сценарию – в 2,8 раза, согласно инновационному сценарию – в 3 раза. Для полупроводниковой промышленности России, являющейся частью электронной промышленности, ввиду существенного отставания от мирового уровня темпы роста производства должны быть более высокими. Целевой объем российского производства полупроводниковой продукции может быть оценен исходя из соотношения между мировым рынком электроники и мировым рынком полупроводниковой продукции. В 2020 г. мировой рынок полупроводниковой продукции (450 млрд долл.) составлял около 15 % мирового рынка электроники (2972 млрд долл. [7]).

Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Новые поколения микроэлектроники и создание электронной компонентной базы» (ГК «Ростех») выделяет в качестве приоритетных два направления [8]: разработка и производство чипов с проектными нормами 65 (55), 28, 14 нм; разработка и производство чипов памяти для твердотельных накопителей в 96 слоев и техническим процессом 25–30 нм. Исходя из дорожной карты ГК «Ростех» планирует развивать эти технологии самостоятельно на мощностях дочерних предприятий. Ожидаемый вклад государства – 615 млрд руб., внебюджетные средства составят 103 млрд руб., в том числе средства ГК «Ростех» (30 млрд руб.). В результате реализации дорожной карты к 2024 г. российский внутренний рынок полупроводниковой продукции должен вырасти до 466 млрд руб., а экспорт – до 20 млрд руб.

Намеченные в рамках государственной промышленной политики России планы представляются крайне амбициозными. При их практической реализации в условиях жесткой конкуренции на мировом и российском (с импортной продукцией) рынках могут возникнуть существенные сложности. При этом форсированное развитие полупроводниковой промышленности России необходимо для обеспечения как глобальной конкурентоспособности на рынке электронной продукции, системной конкурентоспособности в ходе цифровой трансформации мировой экономики, так и технологической независимости и обороноспособности страны.

Рынок обрабатывающего оборудования и промышленных роботов для полупроводниковой промышленности. Одним из определяющих факторов в развитии производства полупроводниковой продукции является обеспечение производства необходимым оборудованием. В настоящее время в мире имеются пять наиболее крупных производителей обрабатывающего оборудования для полупроводниковой промышленности: Applied Materials, Tokyo Electron, ASML, Lam Research и KLA Corporation. На долю этих компаний приходится 65 % мирового производства. Среди крупных компаний также можно отметить [9]: Advantest – объем производства обрабатывающего оборудования для полупроводниковой промышленности в 2019 г. составил 2,47 млрд долл.,

Screen – 2,2 млрд долл., Teradyne – 1,55 млрд долл., Hitachi High Technologies – 1,53 млрд долл., ASM International – 1,26 млрд долл., Nikon – 1,20 млрд долл., Kokusai Electric – 1,14 млрд долл., Daifuku – 1,11 млрд долл. и др.

Крупнейший мировой производитель обрабатывающего оборудования для производства полупроводниковой продукции – компания Applied Materials (США). В 2020 г. суммарная выручка Applied Materials составила 17,2 млрд долл. (2019 г. – 14,6 млрд долл.). Согласно данным финансовой отчетности компании, объем продаж систем для производства полупроводниковой продукции в 2020 г. составил 11,37 млрд долл. (2019 г. – 9,03 млрд долл.), в том числе полупроводников и логики – 6,71 млрд долл. (2019 г. – 4,69 млрд долл.), DRAM (динамической памяти с произвольным доступом) – 2,27 млрд долл. (2019 г. – 1,99 млрд долл.), флеш-памяти – 2,39 млрд долл. (2019 г. – 2,35 млрд долл.). Оборудование компании в 2020 г. поставлялось в Китай (32 %), Тайвань (23 %), Южную Корею (18 %), Японию (11 %), США (10 %), страны Европы (4 %), страны Юго-Восточной Азии (2 %).

Tokyo Electron (Япония) – крупнейший в мире изготовитель обрабатывающего оборудования для производства полупроводников. По данным компании, в 2020 г. ее выручка составила 10,37 млрд долл. (2019 г. – 11,50 млрд долл.), в том числе от продажи оборудования для производства полупроводников – 9,75 млрд долл. (2019 г. – 10,50 млрд долл.), оборудования для производства плоских панельных дисплеев – 0,61 млрд долл. (2019 г. – 1 млрд долл.). Поставки оборудования компании осуществляются в Тайвань (24,2 %), Северную Америку (19,4 %), Китай (18,3 %), Японию (15 %), Южную Корею (14,3 %), страны Европы (5,5 %) и страны Юго-Восточной Азии (3,3 %).

Основным производителем (до 80 % от мирового производства) литографического оборудования для полупроводниковой промышленности является компания ASML (Нидерланды). Литографические установки ASML используются в производстве интегральных микросхем. Компания ASML – единственный производитель оборудования для фотолитографии в глубоком ультрафиолете (EUV) с длиной волны 13,5 нм, с 2019 г. – с длиной волны 7 нм. По данным компании ASML, в 2020 г. выручка от продаж составила 13,98 млрд евро (2019 г. – 11,82 млрд евро), в том числе от продаж оборудования – 10,32 млрд евро (2019 г. – 9,00 млрд евро). Поставки оборудования в 2020 г. осуществлялись в Тайвань (36 %), Южную Корею (31 %), Китай (18 %), США (9 %), Японию (3 %), EMEA – Европа, Россия, Ближний Восток, Африка (3 %).

Lam Research (США) – корпорация, занимающаяся проектированием, производством, маркетингом и обслуживанием оборудования для обработки полупроводников, используемого для изготовления интегральных микросхем. По данным финансовой отчетности компании Lam Research, в 2020 г. выручка от продаж составила 11,93 млрд долл. (2019 г. – 9,55 млрд долл.), в том числе от продаж оборудования – 7,97 млрд долл. (2019 г. – 6,30 млрд долл.). Поставки оборудования в 2020 г. осуществлялись в Китай (34 %), Южную Корею (25 %), Тайвань (16 %), Японию (10 %), страны Юго-Восточной Азии (6 %), США (6 %), страны ЕС (3 %).

KLA Corporation (США) – компания, поставляющая системы управления технологическими процессами и производствами для полупроводниковой промышленности и других отраслей, связанных с наноэлектроникой. По данным компании, в 2020 г. ее выручка составила 5,95 млрд долл. (2019 г. – 4,96 млрд долл.), в том числе от продаж обрабатывающего оборудования – 4,06 млрд долл. (2019 г. – 3,42 млрд долл.). Оборудование компании в 2020 г. поставлялось в Тайвань (26 %), Китай (26 %),

Южную Корею (13 %), США (13 %), Японию (12 %), страны ЕС (6 %), страны Юго-Восточной Азии (4 %).

Результаты анализа объемов и географии продаж ведущих мировых производителей обрабатывающего оборудования для полупроводниковой промышленности позволяют оценить распределение потребления по странам и регионам мира. Общий объем мирового потребления обрабатывающего оборудования для полупроводниковой промышленности в 2020 г. составил около 69 млрд долл. (2019 г. – 59 млрд долл.), в том числе Тайвань – 26 %, Китай – 25 %, Южная Корея – 21 %, США – 11 %, Япония – 10 %, страны Европы – 4 %, страны Юго-Восточной Азии – 3 %.

Российское потребление обрабатывающего оборудования для полупроводниковой промышленности в 2020 г. составило 4,6 млрд руб. (64 млн долл.); практически все потребляемое в России оборудование импортное. В настоящее время в России имеется лишь несколько микропредприятий, занимающихся производством оборудования для полупроводниковой промышленности: ООО «СОРЭНЖ» (г. Санкт-Петербург) – выручка в 2020 г. составила 7,9 млн. руб.; ООО «НордЛаб» (г. Москва) – 7,3 млн руб.; ООО «Технолаб» (г. Владивосток) – 2,6 млн руб. и др. В 2019 г., согласно данным Росстат, в России произведено оборудования и аппаратуры для производства полупроводниковых слитков или пластин, полупроводниковых устройств, электронных интегральных микросхем или плоскопанельных дисплеев на сумму всего 5 млн руб.

Наряду с обрабатывающим оборудованием необходимое условие развития полупроводниковой промышленности – обеспечение производства промышленными роботами. По оценке Research and Markets [10], объем мирового рынка промышленных роботов (не включая стоимости компонентов, программного обеспечения и системного инжиниринга) в 2020 г. составил 24,35 млрд долл., ожидаемые темпы роста мирового рынка на период до 2026 г. – 14,1 % в год. По данным IFR (Международной федерации робототехники) [11], в конце 2019 г. мировой парк промышленных роботов достиг 2,72 млн ед., в том числе в производстве электронной и электротехнической продукции – 672 тыс. ед. Количество новых промышленных роботов, установленных в 2019 г., составило 373 тыс. ед. (2018 г. – 422 тыс. ед.), в том числе в производстве электронной и электротехнической продукции – 88 тыс. ед. (2018 г. – 105 тыс. ед.). Снижение темпов установки новых промышленных роботов в производстве электронной и электротехнической продукции связано с «насыщением» указанных производств роботами, поскольку в предыдущие годы темпы их роботизации были наиболее высокими.

Достоверным показателем роботизации является показатель плотности роботов в обрабатывающей промышленности (количество используемых роботов на 10 тыс. работников). Лидеры по данному показателю в 2019 г. – страны с наиболее развитой электронной промышленностью: Сингапур (918 ед. на 10 тыс. работников), Южная Корея (855 ед.), Япония (364 тыс. ед.), Германия (346 ед.). Две крупнейшие экономики мира – США и Китай – имеют менее высокую степень роботизации обрабатывающей промышленности (228 и 187 ед. соответственно). Это связано с тем, что в этих странах отрасли – ключевые пользователи промышленных роботов (в частности, электронная промышленность) – не имеют в ВВП столь существенной доли, как в странах-лидерах по уровню роботизации. Например, электронная промышленность Сингапура, включающая в себя филиалы большинства ведущих транснациональных компаний мира (Broadcom, Micron Technology, Texas Instruments, Global Foundries, UMC, Infineon и др.), а также крупные сингапурские компании (STATS ChipPAC и др.) и формирующая 48 % выручки всей промышленности, использует до 75 % парка промышленных роботов этой страны.

Показатель плотности роботов в обрабатывающей промышленности России в настоящее время крайне низкий и составляет 5 ед. на 10 тыс. работников (всего установлено 6 тыс. промышленных роботов). Объем российского потребления промышленных роботов в 2019 г. равен 1 тыс. ед. Для сравнения: в Китае – 140,5 тыс. ед., в Японии – 49,9 тыс. ед., в США – 33,3 тыс. ед., в Южной Корее – 27,9 тыс. ед., в Германии – 20,5 тыс. ед.

Из общего объема промышленных роботов наиболее значимыми для полупроводниковой промышленности являются коллаборативные роботы (коботы) и SCARA-роботы. SCARA-роботы могут быть как коботами, так и традиционными промышленными роботами, а коботы – как SCARA, так и роботами других типов.

SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm – шарнирно-сочлененный робот с избирательной податливостью манипулятора) – это усовершенствованные модели роботов-манипуляторов, которые отличаются высокой точностью позиционирования благодаря ограничению степени подвижности и использованию систем технического зрения. Конструктивно они жесткие в вертикальной плоскости, при этом достаточно гибкие в горизонтальной. К числу ведущих мировых производителей SCARA относятся ABB, Fanuc, Kuka, а также Seiko, Stäubli, Omron и Delta Electronics. Мировой рынок SCARA-роботов в 2019 г. составил 7,8 млрд долл. (53,6 тыс. шт.), в том числе грузоподъемностью до 5 кг – 3,2 млрд долл. Среднегодовой темп роста рынка SCARA – 9,5 % [12]. Значительная часть SCARA-роботов потребляется предприятиями электронной и электротехнической промышленности – 32 %, или 2,48 млрд долл.

Кобот создан для совместной работы с человеком и спроектирован так, чтобы не подвергать опасности находящегося рядом работника. Кобот является более универсальным, экономичным и гибким решением роботизации по сравнению с традиционным промышленным роботом. Одна из областей, где использование коботов наиболее перспективно, – электронная промышленность, в том числе полупроводниковая. Коботы в электронной промышленности используются преимущественно для операций перемещения изделий, упаковки / распаковки, а также контроля качества и выполнения тестов. Лидеры в производстве коботов – Kuka, Fanuc, Hanwha и Universal Robots.

Один из значимых трендов мирового рынка промышленных роботов – активный рост сегмента коботов. В 2019 г. в мире произведено 18 тыс. таких роботов (2018 г. – 16 тыс., 2017 г. – 11 тыс.). Рынок коботов в 2019 г. оценивался в 725,8 млн долл., в том числе 292,5 млн долл. (40,3 %) – грузоподъемностью до 5 кг [13]. Ожидаемые темпы роста рынка коботов на период до 2027 г. – 42 % в год.

Российское производство промышленных роботов имеет очень малые объемы: в 2020 г. произведено всего 200 ед. стоимостью 360 млн руб. Промышленных роботов в России производят ООО «Эйдос-Робототехника» (выручка в 2020 г. составила 221,2 млн руб., в 2019 г. – 75,7 млн руб.), «Андроидная техника» (выручка в 2020 г. – 68,3 млн руб.), ООО «АвангардПЛАСТ» (выручка в 2020 г. – 37,3 млн руб.), ООО «БиАйДи Технолоджис Рус» (выручка в 2020 г. – 11,8 млн руб.) и др.

Отсутствие в России существенного по объемам и номенклатуре производства обрабатывающего оборудования и промышленных роботов для полупроводниковой промышленности – насущная проблема. Развитие такого производства – необходимое условие реализации намеченных планов по развитию полупроводниковой промышленности России в рамках Стратегии развития электронной промышленности России и Дорожной карты развития в России высокотехнологичной области «Новые поколения микроэлектроники и создание электронной компонентной базы».

Проблема обеспечения полупроводниковой промышленности обрабатывающим оборудованием и промышленными роботами. Результаты анализа мирового опыта показывают, что страны-лидеры в области полупроводниковой промышленности не всегда имеют достаточное собственное машиностроительное производство обрабатывающего оборудования и промышленных роботов (табл.3,4) [14].

Таблица 3

Импорт и экспорт обрабатывающего оборудования, используемого для полупроводниковой промышленности (код ТН ВЭД 8486), млрд долл.

Table 3

Import and export of processing equipment used for the semiconductor industry (HS code 8486), billion USD

Страна	Импорт			Экспорт		
	2019	2020	Рейтинг 2020	2019	2020	Рейтинг 2020
Китай	27,68	32,82	1	3,75	4,28	6
Тайвань	19,33	18,24	2	3,23	3,54	7
Южная Корея	9,04	15,48	3	7,85	8,41	5
США	10,58	8,11	4	15,46	19,61	2
Сингапур	4,21	5,18	5	8,54	11,26	4
Япония	3,71	4,82	6	22,64	23,62	1
Нидерланды	3,66	4,60	7	13,71	15,20	3
Германия	1,17	1,23	8	2,45	2,27	8
Малайзия	1,15	0,98	9	0,94	1,23	9
Россия	0,11	0,07	23	0,006	0,002	32

Таблица 4

Импорт и экспорт промышленных роботов (код ТН ВЭД 847950), млн долл.

Table 4

Import and export of industrial robots (HS code 847950), million USD

Страна	Импорт			Экспорт		
	2019	2020	Рейтинг 2020	2019	2020	Рейтинг 2020
Китай	1032	1085	1	305	308	4
США	445	432	2	225	230	7
Германия	424	374	3	695	619	2
Италия	218	174	4	454	367	3
Индия	191	167	5	32	60	20
Южная Корея	182	150	6	204	156	8
Франция	172	150	7	335	253	5
Тайвань	105	99	15	136	136	12
Япония	89	83	21	1592	1724	1
Дания	43	23	32	259	249	6
Россия	33	35	37	2,3	2,8	42

Тайвань, один из крупнейших в мире производителей полупроводниковой продукции (6 % от мирового производства по стоимости в 2019 г.), существенно зависит от поставок обрабатывающего оборудования, используемого для полупроводниковой промышленности. Общий объем импорта такого оборудования в 2020 г. составил 18,2 млрд долл., в том числе из Нидерландов – 5 млрд долл., Японии – 4,6 млрд долл.,

США – 3,9 млрд долл. Зависимость от импорта роботов значительно ниже: объем тайваньского импорта промышленных роботов – 99,3 млн долл., в том числе из Японии – 46,4 млн долл., Китая – 19,1 млн долл. и Германии – 13,2 млн долл.

Аналогичный пример – Южная Корея (19 % от мирового производства полупроводниковой продукции по стоимости в 2019 г.). Импорт обрабатывающего оборудования, используемого для полупроводниковой промышленности, в 2020 г. – 15,5 млрд долл., в том числе из Японии – 4,22 млрд долл., США – 4,15 млрд долл., Нидерландов – 4,15 млрд долл. Корейский импорт промышленных роботов – 150 млн долл., в том числе из Японии – 82,4 млн долл., Китая – 29,8 млн долл., Германии – 13,8 млн долл.

Примером страны, обеспечивающей большую часть потребностей полупроводниковой промышленности в обрабатывающем оборудовании и промышленных роботах за счет собственного производства, является Япония (10 % от мирового производства полупроводниковой продукции по стоимости). В 2020 г. Япония импортировала обрабатывающее оборудование, используемое для полупроводниковой промышленности, всего на 4,8 млрд долл., в том числе из США – 1,9 млрд долл. Японский импорт промышленных роботов сравнительно небольшой (83 млн долл.), что обусловлено локализацией в Японии наиболее крупных компаний-производителей промышленных роботов (Fanuc, Yaskawa, Kawasaki, Nachi, Denso, Mitsubishi, Epson Robots и др.).

США – страна-лидер по производству полупроводниковой продукции (47 % по стоимости от мирового производства в 2019 г.), являющаяся также ведущим мировым производителем (52 % от мирового производства) обрабатывающего оборудования для полупроводниковой промышленности. Несмотря на второе (после Японии) место в мире по экспорту (19,61 млрд долл. в 2020 г.), в 2020 г. США импортировали обрабатывающее оборудование, используемое для полупроводниковой промышленности, на 8,11 млрд долл., в том числе из Японии – 3 млрд долл., Нидерландов – 1,6 млрд долл. Импорт в США промышленных роботов (432 млн долл., в том числе из стран ЕС – 251 млн долл.) существенно превышает экспорт (230 млн долл.).

Китай – один из ведущих производителей (5 % по стоимости от мирового производства в 2019 г.) и потребителей (34 % по стоимости от мирового потребления в 2020 г.) полупроводниковой продукции. Китай зависит от импорта обрабатывающего оборудования, используемого для полупроводниковой промышленности. В 2020 г. объем импорта такого оборудования составил 32,82 млрд долл., в том числе из Японии – 9,6 млрд долл., Южной Кореи – 6 млрд долл., США – 5,3 млрд долл., Нидерландов – 2,8 млрд долл., Тайваня – 2,6 млрд долл. Китайский экспорт обрабатывающего оборудования для полупроводниковой промышленности значительно ниже импорта и составляет 2,7 млрд долл. Китайский импорт промышленных роботов – немногим менее 1,1 млрд долл., в основном из Японии (737 млн долл.). Основные потребности Китая в промышленных роботах удовлетворяются за счет собственного производства. По данным информационного агентства «Синьхуа», в 2020 г. в Китае произведено 226 тыс. промышленных роботов стоимостью (в соответствии с курсом юаня к доллару) 7,4 млрд долл.

По торгово-экономической позиции на рынке оборудования страны-лидеры в полупроводниковой промышленности можно разделить на три группы:

– страны, аффилированные США (Тайвань, Южная Корея и др.), имеющие значительную зависимость от импортных поставок оборудования из США, Японии, Германии, Нидерландов и других стран ЕС. США не заинтересованы в их экономическом ослаблении. При этом возможности экономического (наряду с политическим и военным) давления у США имеются. Примером такого давления служит успешное продвижение

планов по строительству в США филиала тайваньской компании TSMC. Строительство началось в I квартале 2021 г., ввод в эксплуатацию намечен на 2024 г. Продукция предприятия позволит уменьшить зависимость США от поставок 7–5-нм чипов из Тайваня примерно на 30 %;

– страны – технологические лидеры (США, Япония, Германия), полностью или в основном удовлетворяющие потребности полупроводниковой промышленности в оборудовании за счет собственного машиностроительного производства. Импортозависимость в отдельных сегментах рынка друг от друга или от стран первой группы не создает угрозы их технологической безопасности или обороноспособности;

– страны – конкуренты США, имеющие высокую импортозависимость от поставок оборудования и промышленных роботов для полупроводниковой промышленности. Наиболее заметным представителем этой группы является Китай. Успешное развитие полупроводниковой промышленности в России может добавить в список конкурентов США и нашу страну.

Значительный интерес представляет ситуация, сложившаяся в 2019–2020 гг. с поставками в Китай сканеров диапазона EUV (13,5 нм) и DUV (193 нм) – фотолитографического оборудования нидерландской компании ASML, необходимых для производства современной полупроводниковой продукции. Под давлением США поставки такого оборудования были приостановлены: сканеров EUV-диапазона – полностью, DUV-диапазона – были возобновлены в конце 2020 г. после объявления о начале работ по созданию производства DUV-сканеров китайской компанией Shanghai Micro Electronic Equipment (SMEE). Поставки литографических установок SMEE должны начаться в IV квартале 2021 г. Это оборудование позволит выпускать продукцию по нормам 28 нм. Для экономически эффективного выпуска продукции по нормам 14 нм и менее необходимы сканеры EUV-диапазона (13,5 нм), оснащение которыми китайских предприятий (SMIC и др.) пока невозможно.

Заключение. Для России в долгосрочной перспективе неактуален вариант развития полупроводниковой промышленности с опорой на поставки импортного обрабатывающего оборудования и промышленных роботов, особенно из стран, аффилированных США. Ввиду неизбежных ограничений поставок в Россию высокотехнологичного оборудования такое «зависимое» развитие никогда не позволит достичь глобальной конкурентоспособности на рынке полупроводниковой продукции. Кроме того, будут сохраняться угрозы технологической безопасности и обороноспособности страны.

Таким образом, единственным ответственным решением проблемы технологического обеспечения полупроводниковой промышленности России является формирование собственного производства обрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Имеющиеся российские предприятия, производящие такую продукцию, характеризуются малыми объемами выпуска продукции и не могут рассматриваться в качестве базы для разворачивания крупного производства. Перспективным представляется вариант формирования нескольких крупных компаний (по основным группам машиностроительной продукции) при участии государства. В дальнейшем эти компании могут быть приватизированы. Такой подход в создании высокотехнологичных производств, значимых для обеспечения глобальной конкурентоспособности страны, практикуется в Китае, США, Франции и других странах.

Литература

1. ***Rimol M.*** Gartner says worldwide semiconductor revenue grew 7,3 % in 2020 // Gartner: [Web] / Gartner, Inc. 14.01.2021. URL: https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-01-14-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-grew-7-percent-in-2020 (дата обращения: 02.06.2021).

2. 2020 State of the U.S. semiconductor industry // Semiconductor Industry Association: [Web]. URL: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2020/06/2020-SIA-State-of-the-Industry-Report.pdf (дата обращения: 02.06.2021).

3. ***Rosso D.*** Global semiconductor sales increase 6,5 % to $439 billion in 2020 // Semiconductor Industry Association: [Web]. 01.02.2021. URL: https://www.semiconductors.org/global-semiconductor-sales-increase-6-5-to-439-billion-in-2020/ (дата обращения: 02.06.2021).

4. Share of the global semiconductor industry by country in 2018 and 2019 // Statista: [Web]. URL: https://www.statista.com/statistics/510374/worldwide-semiconductor-market-share-by-country/ (дата обращения: 02.06.2021).

5. Intel to keep its number one semiconductor supplier ranking in 2020 // Research Bulletin: [Web] / IC Insights. 23.11.2020. URL: https://www.icinsights.com/data/articles/documents/1320.pdf (дата обращения: 02.06.2021).

6. TSMC wants to end the global semiconductor shortage // Observatorio Nacional 5G: [Web] / Mobile World Capital Barcelona. 08.04.2021. URL: https://on5g.es/en/tsmc-quiere-acabar-con-la-escasez-mundial-de-semiconductores/ (дата обращения: 02.06.2021).

7. Production forecasts for the global electronics and information technology industries // JEITA: [Web]. 16.12.2020. URL: https://www.jeita.or.jp/english/press/2020/1216.pdf (дата обращения: 02.06.2021).

8. ***Кинякина Е., Исакова Т.*** На модернизацию российской микроэлектроники нужно почти 800 млрд рублей // Ведомости: [Электронный ресурс] / АО Бизнес Ньюс Медиа. 07.09.2020. URL: https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2020/09/07/838963-modernizatsiyu-mikroelektroniki (дата обращения: 02.06.2021).

9. Semiconductor equipment revenue worldwide from 2017 to 2019, by supplier // Statista: [Web]. URL: https://www.statista.com/statistics/532224/worldwide-semiconductor-wafer-level-manufacturing-equipment-vendor-revenue/ (дата обращения: 02.06.2021).

10. Industrial robotics market – growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2021–2026) // Research and Markets: [Web]. Jan. 2021. 126 p. URL: https://www.researchandmarkets.com/reports/4756868/industrial-robotics-market-growth-trends (дата обращения: 02.06.2021).

11. IFR Press Conference, 24th September 2020, Frankfurt // International Federation of Robotics: [Web]. URL: https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation_WR_2020.pdf (дата обращения: 02.06.2021).

12. Global SCARA robots market 2019–2028. 198 p. // Triton Market Research: [Web]. URL: https://www.tritonmarketresearch.com/reports/scara-robots-market (дата обращения: 01.06.2020).

13. Collaborative robots market size, share & COVID-19 impact analysis, 2020–2027 // Fortune Business Insights: [Web]. URL: https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/collaborative-robots-market-101692 (дата обращения: 02.06.2021).

14. International Trade Centre: [Web]. URL: https://www.trademap.org (дата обращения: 02.06.2021).

Поступила в редакцию 07.06.2021 г.; после доработки 07.06.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

Зеленский Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой промышленной электроники и интеллектуальных цифровых систем Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, 127994, ГСП-4, г. Москва, Вадковский пер., 1), a.zelenskiy@stankin.ru

Морозкин Марьян Сергеевич – начальник отдела технического контроля Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, 127994, ГСП-4, г. Москва, Вадковский пер.,1), marikonec@gmail.com

Грибков Андрей Армович – доктор технических наук, директор Аналитического центра Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Россия, 127994, ГСП-4, г. Москва, Вадковский пер., 1), andarmo@yandex.ru

References

1. Rimol M. Gartner says worldwide semiconductor revenue grew 7.3 % in 2020. *Gartner, Inc.* 14.01.2021. Available at: https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-01-14-gartner-says-worldwide-semiconductor-revenue-grew-7-percent-in-2020 (accessed: 02.06.2021).

2. 2020 State of the U.S. semiconductor industry. *Semiconductor Industry Association.* Available at: https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2020/06/2020-SIA-State-of-the-Industry-Report.pdf (accessed: 02.06.2021).

3. Rosso D. Global semiconductor sales increase 6.5 % to $439 billion in 2020. *Semiconductor Industry Association.* 01.02.2021. Available at: https://www.semiconductors.org/global-semiconductor-sales-increase-6-5-to-439-billion-in-2020/ (accessed: 02.06.2021).

4. Share of the global semiconductor industry by country in 2018 and 2019. *Statista.* Available at: https://www.statista.com/statistics/510374/worldwide-semiconductor-market-share-by-country/ (accessed: 02.06.2021).

5. Intel to keep its number one semiconductor supplier ranking in 2020. *Research Bulletin, IC Insights.* 23.11.2020. Available at: https://www.icinsights.com/data/articles/documents/1320.pdf (accessed: 02.06.2021).

6. TSMC wants to end the global semiconductor shortage. *Observatorio Nacional 5G, Mobile World Capital Barcelona.* 08.04.2021. Available at: https://on5g.es/en/tsmc-quiere-acabar-con-la-escasez-mundial-de-semiconductores/ (accessed: 02.06.2021).

7. Production forecasts for the global electronics and information technology industries. *JEITA.* 16.12.2020. Available at: https://www.jeita.or.jp/english/press/2020/1216.pdf (accessed: 02.06.2021).

8. Kinyakina E., Isakova T. Almost 800 billion rubles are needed for modernization of Russian microelectronics. *Vedomosti, AO Business News Media.* 07.09.2020. Available at: https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2020/09/07/838963-modernizatsiyu-mikroelektroniki (accessed: 02.06.2021). (In Russian).

9. Semiconductor equipment revenue worldwide from 2017 to 2019, by supplier. *Statista.* Available at: https://www.statista.com/statistics/532224/worldwide-semiconductor-wafer-level-manufacturing-equipment-vendor-revenue/ (accessed: 02.06.2021).

10. Industrial robotics market – growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2021–2026). *Research and Markets.* Jan. 2021. 126 p. Available at: https://www.researchandmarkets.com/reports/4756868/industrial-robotics-market-growth-trends (accessed: 02.06.2021).

11. IFR Press Conference, 24th September 2020, Frankfurt. *International Federation of Robotics.* Available at: https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation_WR_2020.pdf (accessed: 02.06.2021).

12. Global SCARA robots market 2019–2028. 198 p. *Triton Market Research.* Available at: https://www.tritonmarketresearch.com/reports/scara-robots-market (accessed: 01.06.2020).

13. Collaborative robots market size, share & COVID-19 impact analysis, 2020–2027. *Fortune Business Insights.* Available at: https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/collaborative-robots-market-101692 (accessed: 02.06.2021).

14. *International Trade Centre.* Available at: https://www.trademap.org (accessed: 02.06.2021).

Received 07.06.2021; Revised 07.06.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the authors:

Alexander A. Zelensky – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Acting Head of the Industrial Electronics and Intelligent Digital Systems Department, Moscow State Technological University «STANKIN» (Russia, 127994, Moscow, Vadkovsky ln., 1), a.zelenskiy@stankin.ru

Maryan S. Morozkin – Head of the Technical Control Department, Moscow State Technological University «STANKIN» (Russia, 127994, Moscow, Vadkovsky ln., 1), marikonec@gmail.com

Andrey A. Gribkov – Dr. Sci. (Eng.), Director of the Analytical Centre, Moscow State Technological University «STANKIN» (Russia, 127994, Moscow, Vadkovsky ln., 1), andarmo@yandex.ru

УДК 621.315.592-022.592:620.179.152.1 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-481-490

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия поверхностных слоев ограненных наностержней оксида цинка

З.В. Шомахов[1], С.С. Налимова[2], А.А. Бобков[2], В.А. Мошников[2]

[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

Управление гидрофильными свойствами поверхности наноматериалов представляет интерес для различных областей применения, включая оптику, фотокатализ и спинтронику. В работе описаны методики дизайна дефектной структуры поверхностных слоев ограненных наностержней оксида цинка при жертвенном легировании йодом в рамках гидротермального синтеза. Особенности химического состава поверхности полученных слоев исследованы с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Обнаружено, что на рентгеновских фотоэлектронных спектрах пики, соответствующие энергии связи йода, отсутствуют. На спектре уровня O 1s для наностержней оксида цинка, легированных йодом, наблюдается дополнительный пик с энергией связи 531,8 эВ, соответствующий кислороду OH-групп. При термообработке синтезированных слоев йод улетучивается, что приводит к изменению состава поверхности и увеличению содержания кислорода поверхностных гидроксильных групп. Предложена модель, объясняющая полученные экспериментальные результаты. Установлено, что методики рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии эффективны для анализа дефектной структуры поверхности функциональных слоев на основе ограненных наностержней оксида цинка.

Ключевые слова: оксид цинка; наностержни; легирование; рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия; дефекты

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

© З.В. Шомахов, С.С. Налимова, А.А. Бобков, В.А. Мошников, 2021

X-ray Photoelectron Spectroscopy of Surface Layers of Faceted Zinc Oxide Nanorods

Z.V. Shomakhov[1], S.S. Nalimova[2], A.A. Bobkov[2], V.A. Moshnikov[2]

[1]Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia
[2]Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

shozamir@yandex.ru

Abstract: The control of the nanomaterials surface's hydrophilic properties is of interest for various applications, including optics, photocatalysis, and spintronics. In this work, techniques for designing the defective structure of the surface layers of faceted zinc oxide nanorods during sacrificial doping with iodine by hydrothermal synthesis were considered. The features of the chemical composition of the surface of the obtained layers were studied using X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). It was found that peaks corresponding to the binding energy of iodine were not observed in the X-ray photoelectron spectra. An additional peak with a binding energy of 531.8 eV, corresponding to the oxygen of OH groups, was observed in the O 1*s* level spectrum for zinc oxide nanorods doped with iodine. During the heat treatment of the synthesized layers, iodine evaporates, which leads to a change in the surface composition and an increase in the oxygen content of the surface hydroxyl groups. A model has been proposed to explain the experimental results. It has been established that XPS techniques are effective for analyzing the defective surface structure of functional layers based on faceted zinc oxide nanorods.

Keywords: zinc oxide; nanorods; doping; X-ray photoelectron spectroscopy; defects

For citation: Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Bobkov A.A., Moshnikov V.A. X-ray photoelectron spectroscopy of surface layers of faceted zinc oxide nanorods. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 481–490. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-481-490

Введение. Оксид цинка (ZnO) – широкозонный полупроводник *n*-типа, характеризующийся уникальными электрофизическими и оптическими свойствами. Материалы на основе ZnO применяются при создании супергидрофильных и супергидрофобных поверхностей [1], наносенсоров [2–6], полевых эмиссионных и электролюминесцентных устройств [7], нанолазеров [8] и солнечных элементов [9–12]. В настоящее время получены различные наноструктуры ZnO: наночастицы [13, 14], иерархические агрегаты [15, 16], пористые пленки [17], наностержни [18], тетраподы [19, 20].

Направленное изменение дефектной структуры в кристаллах позволяет управлять их свойствами и получать новые функции материалов на их основе. Это расширяет области применения таких материалов, например: индуцированная дефектами люминесценция в широкозонных полупроводниках может применяться в оптике, улучшенное оптическое поглощение перспективно для эффективного фотокатализа, магнетизм в немагнитных материалах – для спинтроники. В работе [21] путем гидрирования полу-

чен TiO_2 с высоким содержанием кислородных вакансий и улучшенной фотокаталитической активностью.

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС) на сегодняшний день широко применяется в области материаловедения, химии и химической инженерии для оценки химии поверхности, структуры связей и состава поверхностей и интерфейсов. Метод РФЭС основан на том, что химическое окружение атома оказывает выраженное влияние на энергию связи электронов (химический сдвиг). Это позволяет определить структуру связей и ее изменение в зависимости от параметров синтеза или обработки поверхности. Благодаря высокой чувствительности РФЭС эффективна для анализа дефектных состояний на поверхности материалов. Так, с помощью данного метода в работе [22] показано, что с повышением температуры отжига на поверхности тонкой пленки ZnO увеличивается концентрация кислородных вакансий, являющихся центрами люминесценции для эмиссии зеленого света. В работах [23–25] изучены перераспределение поверхностных центров при образовании цинкового феррита и пористого кремния, а также зависимость газочувствительных и структурных свойств оксида от функционального состава поверхности. Установлено, что адсорбционные свойства оксидов определяются концентрацией молекул воды на их поверхности, а также отрицательно заряженных ионов кислорода и собственных дефектов, главным образом кислородных вакансий.

В настоящее время большое внимание уделяется атомно-молекулярному дизайну и наноархитектонике. При этом технологии могут включать методики top-down и bottom-up, а общая архитектоника может иметь иерархическую структуру. Методы дизайна дефектов в атомно-молекулярных структурах могут включать в себя введение жертвенных примесей на этапах формирования атомно-молекулярных структур с последующими операциями модифицирования поверхностных слоев.

Для анализа особенностей структур, синтезированных с добавлением жертвенных легирующих примесей, необходима разработка новых методик анализа. В настоящей работе рассматриваются методики с применением РФЭС для анализа перераспределения электронной плотности и изменения энергетики адсорбционных центров при легировании слоев ZnO.

Эксперимент. Функциональные слои на основе наностержней ZnO синтезировали гидротермальным методом. Сначала на подложке синтезировали зародышевый слой центрифугированием водного раствора ацетата цинка (5 мМ) с последующим отжигом при температуре 350 °С. На полученных зародышевых слоях выращивали наностержни ZnO. В качестве ростового раствора использовали водный раствор гексаметилентетрамина (HMTA) и шестиводного нитрата цинка $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ в эквимолярном соотношении (25 мМ). Для синтеза легированных йодом образцов в ростовой раствор добавляли йодид натрия (10 мМ). Рост проводили в течение 1 ч при температуре 86 °С. Образцы отжигали в муфельной печи при температуре 350 °С для удаления органики с поверхности слоя.

Химический состав поверхности слоев, состоящих из наностержней ZnO, исследовали методом РФЭС. Экспериментальные спектры получены на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре K-Alpha фирмы Thermo Scientific (США). Для возбуждения фотоэмиссии использовали монохроматическое излучение Al-*K*α (энергия кванта $h\nu$ = 1486,7 эВ). Обзорные спектры получены в диапазоне энергий связи 0–1350 эВ, позволяющие определить все элементы, присутствующие в образцах. Спектры элементов шириной 20 эВ сняты с целью более точного определения положения пиков. Проведено

разложение спектров остовных уровней элементов, позволившее определить их содержание в образцах в различных связанных состояниях.

Результаты и их обсуждение. В ростовом растворе, используемом для синтеза наноструктур, нитрат цинка служит источником ионов Zn^{2+}, а ГМТА при медленном разложении обеспечивает щелочную среду раствора и необходимое количество ионов OH^-. Химические реакции, протекающие в растворе, описываются следующими уравнениями:

$$C_6H_{12}N_4 + 6H_2O \rightarrow 6HCHO + 4NH_3,$$
$$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-,$$
$$2OH^- + Zn^{2+} \rightarrow Zn(OH)_2,$$
$$2Zn(OH)_2 \rightarrow [ZnO]_b + [ZnO]_s + 2H_2O,$$
$$[ZnO]_s + 2NaI + H_2O \rightarrow ZnI_2 + 2NaOH.$$

В приведенных уравнениях химических реакций молекулы ZnO, образующиеся в объеме слоя и на его поверхности, обозначены как $[ZnO]_b$ и $[ZnO]_s$ соответственно.

На обзорных рентгеновских фотоэлектронных спектрах нелегированных и легированных образцов наностержней ZnO (рис.1) наблюдаются пики, характерные для энергий связи цинка, кислорода и углерода. Положения всех пиков совпадают с литературными данными по исследованию подобных материалов. Наличие пиков углерода во всех образцах свидетельствует об адсорбции на их поверхности углеводородов из окружающей атмосферы. Из спектров видно, что на поверхности нелегированного образца преобладает углерод (рис.1,*а*), в то время как для легированного йодом образца наиболее интенсивный пик соответствует цинку (рис.1,*б*).

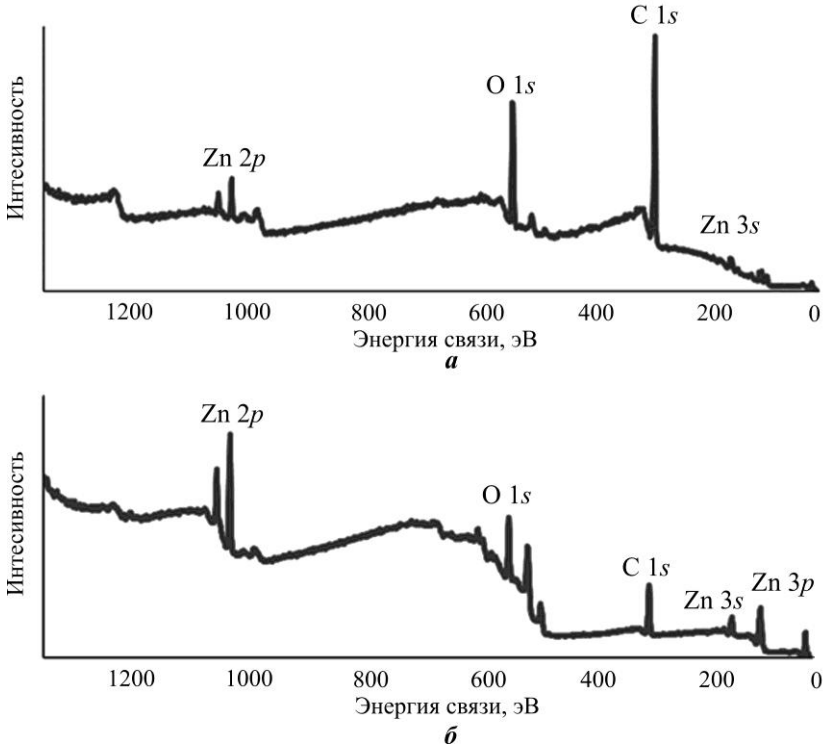


Рис.1. Обзорные рентгеновские фотоэлектронные спектры слоя на основе нелегированных (*а*) и легированных йодом (*б*) наностержней ZnO
Fig.1. Survey X-ray photoelectron spectra of the layer based on ZnO nanorods undoped with iodine (*a*) and doped with iodine (*b*)

На рис.2 представлены спектры остовных уровней кислорода для нелегированных и легированных образцов. Пик O 1*s* (534 эВ) на рис.2,*а* соответствует энергии связи кислорода, присутствующего на поверхности в виде адсорбированных групп C-O и H_2O. На спектре остовного уровня кислорода легированного йодом образца, представленном на рис.2,*б*, наблюдаются пики, соответствующие кислороду OH-групп (531,8 эВ) и кислороду адсорбированных групп H_2O/C-O (533,5 эВ). Наблюдается сдвиг пика кислорода адсорбированных групп H_2O/C-O на 0,5 эВ в сторону меньших энергий связи по сравнению с образцом ZnO.

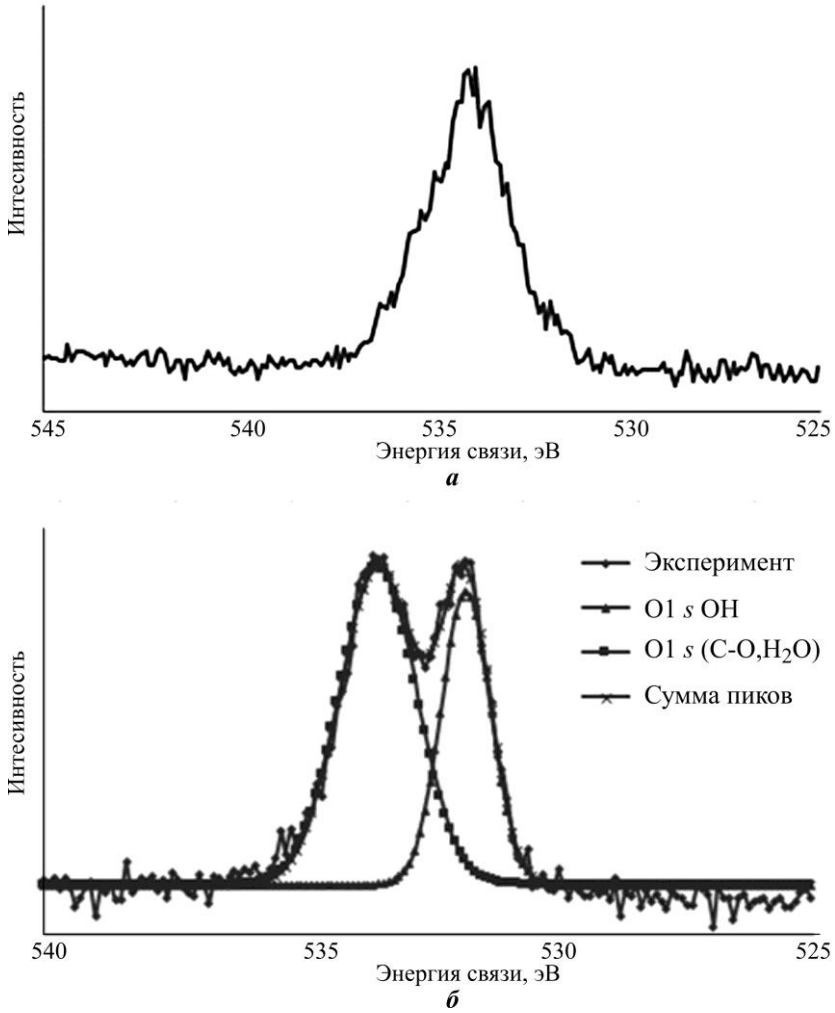


Рис.2. Рентгеновские фотоэлектронные спектры уровня O 1*s* для слоя на основе нелегированных (*а*) и легированных йодом (*б*) наностержней ZnO
Fig.2. X-ray photoelectron spectra of O 1*s* level for a layer based on the nanorods of ZnO undoped with iodine (*a*) and doped with iodine (*b*)

Полученные результаты согласуются с данными обзорных спектров. На поверхности образца, синтезированного без добавления йодида натрия в ростовой раствор, преобладают слабосвязанные группы C-O. При добавлении йодида натрия в ростовой раствор характер распределения связей на поверхности существенно изменяется. На поверхности преобладают ионы цинка, связанные в основном с OH-группами.

После изотермического отжига при температуре 350 °C на воздухе в поверхностных слоях йод не обнаруживается (см. рис.1,*б*). В то же время происходит существен-

ное изменение в спектрах остовных уровней кислорода для легированного образца (см. рис.2,*б*) по сравнению с нелегированным (см. рис.2,*а*). При этом изменение спектра остовных уровней кислорода проявляется при энергиях 531,8 эВ, которые соответствуют энергетике остовных уровней кислорода гидроксильных групп OH^-.

Таким образом, особенности поведения элементов в легированных нанокристаллах, включая легированные ограненные наностержни ZnO, могут существенно модифицировать функциональные свойства поверхности и изменять условия адсорбции гидроксильных групп. Для этой цели перспективным представляется легирование ZnO легколетучей примесью, например йодом.

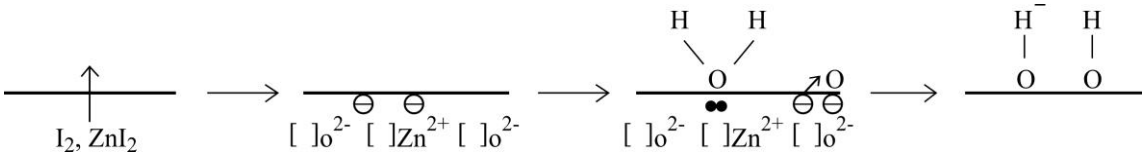


Рис.3. Механизм изменения структуры поверхности ZnO при жертвенном легировании йодом
Fig.3. The mechanism of changing the structure of the ZnO surface during sacrificial doping with iodine

На рис.3 показана модель модификации структуры поверхности ZnO, поясняющая влияние йода на перераспределение поверхностных функциональных групп. Известно, что в оксидных нанокристаллах существуют хорошо организованные анионные и катионные подрешетки. При отжиге йод выходит из поверхностных слоев, что находит подтверждение экспериментально, поскольку методом РФЭС на поверхности образцов йода не обнаружено. Йод может уходить в виде I_2 и в виде соединения ZnI_2. С точки зрения изменения гидрофильности важнейшее значение имеет уход в виде ZnI_2 в нейтральной форме с образованием дополнительных вакансий: одной в подрешетке цинка и двух в подрешетке йода. Соответственно, в решетке должны оставаться локализованные отрицательные заряды от йода и положительно заряженная вакансия цинка. Положительно заряженная вакансия цинка имеет высокую адсорбционную способность для молекул водяных паров с образованием связи между неподеленной электронной парой атома кислорода и положительно заряженной вакансией цинка. Так как в решетке остается отрицательный заряд, то повышается вероятность адсорбции кислорода в виде отрицательно заряженных ионов. Таким образом, на поверхности находятся адсорбированные молекулы водяных паров и отрицательно заряженные ионы кислорода. Между этими частицами может протекать реакция с образованием отрицательно заряженной и нейтральной гидроксильных групп (см. рис.3).

Заключение. Анализ состава поверхности наностержней оксида цинка показал, что при легировании йодом происходит существенное перераспределение электронной плотности с увеличением содержания гидроксильных групп. Согласно предложенной модели перестройки поверхностных связей в результате удаления йода при термообработке, для исследования перераспределения поверхностных связей в наностержнях ZnO наиболее информативным является определение содержания кислорода в различных связанных состояниях.

Таким образом, легирование йодом при гидротермальном синтезе ограненных наностержней ZnO приводит к увеличению степени гидроксилирования поверхности полученных слоев, что расширяет области применения таких материалов. Полученные наноструктуры могут быть использованы для создания газовых сенсоров, устойчивых к влиянию влажности, а также в качестве эффективных фотокатализаторов.

Материалы статьи доложены на 5-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника – 2021» (3–9 февраля 2021 г., Кабардино-Балкарская Республика, пос. Эльбрус).

Литература

1. ***Pauporté T., Bataille G., Joulaud L., Vermersch F.J.*** Well-aligned ZnO nanowire arrays prepared by seed-layer-free electrodeposition and their Cassie−Wenzel transition after hydrophobization // J. Phys. Chem. C. 2010. Vol. 114. Iss. 1. P. 194–202. DOI: https://doi.org/10.1021/jp9087145

2. 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. ID: 4265. DOI: https://doi.org/10.3390/s19194265

3. Sensitivity enhancement of ammonia gas sensor based on Ag/ZnO flower and nanoellipsoids at low temperature / ***R. Sankar Ganesh, M. Navaneethan, V.L. Patil et al.*** // Sensors and Actuators B: Chemical. 2018. Vol. 255. P. 672–683. DOI: https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.08.015

4. Complex-surfactant-assisted hydrothermal synthesis of one-dimensional ZnO nanorods for high-performance ethanol gas sensor / ***S. Zhao, Y. Shen, X. Yan et al.*** // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 286. P. 501–511. DOI: https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.127

5. Micropatternable double-faced ZnO nanoflowers for flexible gas sensor / ***J.-W. Kim, Y. Porte, K.Y. Ko et al.*** // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017. Vol. 9. Iss. 38. P. 32876–32886. DOI: https://doi.org/10.1021/acsami.7b09251

6. 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.

7. Epitaxial electrodeposition of ZnO nanowire arrays on p-GaN for efficient UV-light-emitting diode fabrication / ***O. Lupan, T. Pauporté, B. Viana et al.*** // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2010. Vol. 2. Iss. 7. P. 2083–2090. DOI: https://doi.org/10.1021/am100334c

8. Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers / ***M.H. Huang, S. Mao, H. Feick et al.*** // Science. 2001. Vol. 292. Iss. 5523. P. 1897–1899. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1060367

9. Синтез наноструктур на основе оксида цинка для создания гетероструктурных фотовольтаических элементов / ***Н.А. Лашкова, А.И. Максимов, А.А. Рябко и др.*** // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 9. С. 1276–1282.

10. ***Luo J., Wang Y., Zhang Q.*** Progress in perovskite solar cells based on ZnO nanostructures // Solar Energy. 2018. Vol. 163. P. 289–306. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.035

11. ***Zang Z.*** Efficiency enhancement of ZnO/Cu_2O solar cells with well oriented and micrometer grain sized Cu_2O films // Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 112. Iss. 4. Art. ID: 042106. DOI: https://doi.org/10.1063/1.5017002

12. Stable 6 %-efficient Sb_2Se_3 solar cells with a ZnO buffer layer / ***L. Wang, D.B. Li, K. Li et al.*** // Nature Energy. 2017. Vol. 2. Art. No. 17046. DOI: https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.46

13. ***Parihar V., Raja M., Paulose R.*** A brief review of structural, electrical and electrochemical properties of zinc oxide nanoparticles // Reviews on Advanced Materials Science. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 119–130. DOI: https://doi.org/10.1515/rams-2018-0009

14. ***Siddiqi K.S., ur Rahman A., Tajuddin, Husen A.*** Properties of zinc oxide nanoparticles and their activity against microbes // Nanoscale Res. Lett. 2018. Vol. 13. Art. No. 141. DOI: https://doi.org/10.1186/s11671-018-2532-3

15. ***Wang X., Ahmad M., Sun H.*** Three-dimensional ZnO hierarchical nanostructures: solution phase synthesis and applications // Materials. 2017. Vol. 10. Iss. 11. Art. ID: 1304. DOI: https://doi.org/10.3390/ma10111304

16. Synthesis of ZnO hierarchical structures and their gas sensing properties / ***C. Fan, F. Sun, X. Wang et al.*** // Nanomaterials. 2019. Vol. 9. Iss. 9. Art. ID: 1277. DOI: https://doi.org/10.3390/nano9091277

17. Усиление флуоресценции наноразмерных пленок ZnO : SiO_2 в присутствии сывороточного альбумина человека / ***И.А. Наговицын, Г.К. Чудинова, А.В. Лобанов и др.*** // Химическая физика. 2018. Т. 37. № 8. С. 29–35. DOI: https://doi.org/10.1134/S0207401X18080149

18. Двухэтапный синтез структурированных микросистем из наностержней оксида цинка с использованием ультразвукового спрей-пиролиза и низкотемпературного гидротермального метода / ***А.А. Рябко, А.И. Максимов, В.Н. Вербицкий и др.*** // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54. № 11 (111177). С. 1251–1257. DOI: https://doi.org/10.21883/FTP.2020.11.50098.9480

19. Synthesis of ZnO tetrapods for high-performance supercapacitor applications / ***Q. Luo, P. Xu, Y. Qiu et al.*** // Materials Letters. 2017. Vol. 198. P. 192–195. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.04.032

20. ZnO tetrapods and activated carbon based hybrid composite: Adsorbents for enhanced decontamination of hexavalent chromium from aqueous solution / ***M. Sharma, M. Joshi, S. Nigam et al.*** // Chemical Engineering Journal. 2019. Vol. 358. P. 540–551. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.031

21. ***Chen X., Liu L., Yu P.Y., Mao S.S.*** Increasing solar absorption for photocatalysis with black hydrogenated titanium dioxide nanocrystals // Science. 2011. Vol. 331. Iss. 6018. P. 746–750. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1200448

22. ***Hsieh P.-T., Chen Y.-C., Kao K.-S., Wang C.-M.*** Luminescence mechanism of ZnO thin film investigated by XPS measurement // Appl. Phys. A. 2008. Vol. 90. Iss. 2. P. 317–321. DOI: https://doi.org/10.1007/s00339-007-4275-3

23. Study of the effect of the acid-base surface properties of ZnO, Fe_2O_3 and $ZnFe_2O_4$ oxides on their gas sensitivity to ethanol vapor / ***S.S. Karpova, V.A. Moshnikov, A.I. Maksimov et al.*** // Semiconductors. 2013. Vol. 47. Iss. 8. P. 1026–1030. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063782613080095

24. An X-ray photoelectron spectroscopy study of zinc stannate layer formation / ***S.S. Nalimova, Z.V. Shomakhov, V.A. Moshnikov et al.*** // Technical Physics. 2020. Vol. 65. Iss. 7. P. 1087–1090. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063784220070142

25. ***Шомахов З.В., Налимова С.С., Калажоков З.Х., Мошников В.А.*** Анализ изменения состава поверхности при образовании наноструктур станната цинка // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2020. № 12. С. 222–231. DOI: https://doi.org/10.26456/pcascnn/2020.12.222

Поступила в редакцию 16.04.2021 г.; после доработки 16.04.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

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), sskarpova@list.ru

Бобков Антон Алексеевич – кандидат физико-математических наук, инженер кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (Россия, 197376, г. Санкт-Петербург, ул. профессора Попова, 5), anton.a.bobkov@yandex.ru

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. Pauporté T., Bataille G., Joulaud L., Vermersch F.J. Well-aligned ZnO nanowire arrays prepared by seed-layer-free electrodeposition and their Cassie−Wenzel transition after hydrophobization. *J. Phys. Chem. C*, 2010, vol. 114, iss. 1, pp. 194–202. DOI: https://doi.org/10.1021/jp9087145

2. Bobkov A., Varezhnikov A., Plugin I., Fedorov F.S., Goffman V., Moshnikov V., Sysoev V., Trouillet V., Geckle U., Sommer M. 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. ID: 4265. DOI: https://doi.org/10.3390/s19194265

3. Sankar Ganesh R., Navaneethan M., Patil V.L., Ponnusamy S., Muthamizhchelvan C., Kawasaki S., Patil P.S., Hayakawa Y. Sensitivity enhancement of ammonia gas sensor based on Ag/ZnO flower and nanoellipsoids at low temperature. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, vol. 255, pp. 672–683. DOI: https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.08.015

4. Zhao S., Shen Y., Yan X., Zhou P., Yin Y., Lu R., Han C., Cui B., Wei D. Complex-surfactant-assisted hydrothermal synthesis of one-dimensional ZnO nanorods for high-performance ethanol gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 286, pp. 501–511. DOI: https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.127

5. Kim J.-W., Porte Y., Ko K.Y., Kim H., Myoung J.M. Micropatternable double-faced ZnO nanoflowers for flexible gas sensor. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2017, vol. 9, iss. 38, pp. 32876–32886. DOI: https://doi.org/10.1021/acsami.7b09251

6. Nalimova S.S., Kononova I.E., Moshnikov V.A., Dimitrov D.Tz., 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.

7. Lupan O., Pauporté T., Viana B., Tiginyanu I.M., Ursaki V.V., Cortès R. Epitaxial electrodeposition of ZnO nanowire arrays on p-GaN for efficient UV-light-emitting diode fabrication. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010, vol. 2, iss. 7, pp. 2083–2090. DOI: https://doi.org/10.1021/am100334c

8. Huang M.H., Mao S., Feick H., Yan H., Wu Y., Kind H., Weber E., Russo R., Yang P. Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers. *Science*, 2001, vol. 292, iss. 5523, pp. 1897–1899. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1060367

9. Lashkova N.A., Maximov A.I., Ryabko A.A., Bobkov A.A., Moshnikov V.A., Terukov E.I. Synthesis of ZnO-based nanostructures for the creation of heterostructure photovoltaic cells. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, iss. 9, pp. 1254–1260. DOI: https://doi.org/10.1134/S106378261609013X

10. Luo J., Wang Y., Zhang Q. Progress in perovskite solar cells based on ZnO nanostructures. *Solar Energy*, 2018, vol. 163, pp. 289–306. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.035

11. Zang Z. Efficiency enhancement of ZnO/Cu_2O solar cells with well oriented and micrometer grain sized Cu_2O films. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 112, iss. 4, art. ID: 042106. DOI: https://doi.org/10.1063/1.5017002

12. Wang L., Li D.B., Li K., Chen C., Deng H.-X., Gao L., Zhao Y., Jiang F., Li L., Huang F., He Y., Song H., Niu G., Tang J. Stable 6 %-efficient Sb_2Se_3 solar cells with a ZnO buffer layer. *Nature Energy*, 2017, vol. 2, art. no. 17046. DOI: https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.46

13. Parihar V., Raja M., Paulose R. A brief review of structural, electrical and electrochemical properties of zinc oxide nanoparticles. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2018, vol. 53, no. 2, pp. 119–130. DOI: https://doi.org/10.1515/rams-2018-0009

14. Siddiqi K.S., ur Rahman A., Tajuddin, Husen A. Properties of zinc oxide nanoparticles and their activity against microbes. *Nanoscale Res. Lett.*, 2018, vol. 13, art. no. 141. DOI: https://doi.org/10.1186/s11671-018-2532-3

15. Wang X., Ahmad M., Sun H. Three-dimensional ZnO hierarchical nanostructures: solution phase synthesis and applications. *Materials*, 2017, vol. 10, iss. 11, art. ID: 1304. DOI: https://doi.org/10.3390/ma10111304

16. Fan C., Sun F., Wang X., Huang Z., Keshvardoostchokami M., Kumar P., Liu B. Synthesis of ZnO hierarchical structures and their gas sensing properties. *Nanomaterials*, 2019, vol. 9, iss. 9, art. ID: 1277. DOI: https://doi.org/10.3390/nano9091277

17. Nagovitsyn I.A., Chudinova G.K., Lobanov A.V., Boruleva E.A., Moshnikov V.A., Nalimova S.S., Kononova I.E. Enhanced fluorescence of nanosized ZnO : SiO_2 films in the presence of human serum albumin. *Rus. J. Phys. Chem. B*, 2018, vol. 12, iss. 4, pp. 651–656. DOI: https://doi.org/10.1134/S1990793118040292

18. Ryabko A.A., Maximov A.I., Verbitskii V.N., Levitskii V.S., Moshnikov V.A., Terukov E.I. Two-stage synthesis of structured microsystems based on zinc-oxide nanorods by ultrasonic spray pyrolysis and the low-temperature hydrothermal method. *Semiconductors*, 2020, vol. 54, iss. 11, pp. 1496–1502. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063782620110238

19. Luo Q., Xu P., Qiu Y., Cheng Z., Chang X., Fan H. Synthesis of ZnO tetrapods for high-performance supercapacitor applications. *Materials Letters*, 2017, vol. 198, pp. 192–195. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.04.032

20. Sharma M., Joshi M., Nigam S., Shree S., Avasthi D.K., Adelung R., Srivastava S.K., Mishra Y.K. ZnO tetrapods and activated carbon based hybrid composite: Adsorbents for enhanced decontamination of hexavalent chromium from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 358, pp. 540–551. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.031

21. Chen X., Liu L., Yu P.Y., Mao S.S. Increasing solar absorption for photocatalysis with black hydrogenated titanium dioxide nanocrystals. *Science*, 2011, vol. 331, iss. 6018, pp. 746–750. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1200448

22. Hsieh P.-T., Chen Y.-C., Kao K.-S., Wang C.-M. Luminescence mechanism of ZnO thin film investigated by XPS measurement. *Appl. Phys. A*, 2008, vol. 90, iss. 2, pp. 317–321. DOI: https://doi.org/10.1007/s00339-007-4275-3

23. 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, Fe_2O_3 and $ZnFe_2O_4$ oxides on their gas sensitivity to ethanol vapor. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, iss. 8, pp. 1026–1030. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063782613080095

24. Nalimova S.S., Shomakhov Z.V., Moshnikov V.A., Bobkov A.A., Ryabko A.A., Kalazhokov Z.Kh. An X-ray photoelectron spectroscopy study of zinc stannate layer formation. *Technical Physics*, 2020, vol. 65, iss. 7, pp. 1087–1090. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063784220070142

25. Shomakhov Z.V., Nalimova S.S., Kalazhokov Z.Kh., Moshnikov V.A. Analysis of changes in the surface composition during formation of zinc stannate nanostructures. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov = Physical and Chemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials*, 2020, no. 12, pp. 222–231. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.26456/pcascnn/2020.12.222

Received 16.04.2021; Revised 16.04.2021; Accepted 11.10.2021.

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

Anton A. Bobkov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Engineer of the Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University (Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov st., 5), anton.a.bobkov@yandex.ru

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

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

УДК 620.3.049.77 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-491-507**

Исследование робастности наноэлектронных структур на базе резонансно-туннельных элементов

А.В. Бондарев, В.Н. Ефанов

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

bondarevav@rambler.ru

Многовходовые логические элементы на базе двухуровневых логических ячеек MOBILE характеризуются малым (пикосекундным) временем переключения и более высокой функциональностью благодаря возможности реализовывать логические функции меньшим количеством элементов. Это создает хорошие перспективы для разработки сверхбыстродействующих ПЛИС с высокой степенью интеграции, необходимых при организации высокопроизводительных вычислений. Однако чрезвычайно высокая чувствительность резонансно-туннельных элементов к изменению энергий квантовых состояний требует оценки устойчивости таких структур к внешним воздействиям в условиях реальной эксплуатации. В работе рассмотрена задача оценки стабильности наноэлектронных структур, в состав которых входят резонансно-туннельные элементы. Предложена методика исследования робастности логических ячеек MOBILE на базе резонансно-туннельного диода и HBT-транзистора, позволяющая находить внешнюю интервальную оценку выходного напряжения исследуемого устройства при заданных интервальных моделях исходных компонентов. Методика базируется на использовании систем топологических и параметрических уравнений, записанных в конечных приращениях. Показано, что предложенный принцип декомпозиции исходной интервальной модели обеспечивает алгоритмическую разрешимость поставленной задачи. Разработан вычислительный алгоритм расчета процессов в двухуровневой логической ячейке MOBILE. Алгоритм предусматривает поэтапное интегрирование интервальных дифференциальных уравнений и решение интервальных нелинейных алгебраических уравнений на каждом шаге интегрирования с использованием интервальной арифметики Каухера. Полученные результаты исследования процессов в двухуровневой логической ячейке MOBILE создают предпосылки для расширения области применения устройств резонансного туннелирования в высокоскоростных монолитных ИС.

© А.В. Бондарев, В.Н. Ефанов, 2021

Ключевые слова: наноэлектронные структуры; резонансно-туннельный диод; двухуровневая логическая ячейка; интерполяционная формула; структурно-параметрическая модель; интервальный анализ; вычислительный алгоритм

Для цитирования: Бондарев А.В., Ефанов В.Н. Исследование робастности наноэлектронных структур на базе резонансно-туннельных элементов // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 491–507. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-491-507

Investigation of Robustness of Nanoelectronic Structures Based on Resonant Tunneling Elements

A.V. Bondarev, V.N. Efanov

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

bondarevav@rambler.ru

Abstract: Multi-input logic gates based on two-level logic cells MOBILE have short (picosecond) switching times and higher functionality due to the ability to implement logic functions with fewer gates. This creates good prospects for the development of ultra-high-speed FPGAs with a high degree of integration, which are required for organizing high-performance computing. However, the extremely high sensitivity of resonant tunneling elements to changes in the energies of quantum states requires an assessment of the stability of such structures to external influences in real operation. In this work, the problem of assessing the stability of nanoelectronic structures that include resonant tunneling elements is considered. The method for studying the robustness of logic cells MOBILE based on a resonant tunneling diode and an HBT transistor was proposed, making it possible to find an external interval estimate of the output voltage of the device under study for given interval models of the initial components. The technique is based on the use of systems of topological and parametric equations written in finite increments. It was shown that the proposed decomposition principle for the initial interval model ensures the algorithmic solvability of the problem posed. A computational algorithm for calculating processes in a two-level logical cell MOBILE has been developed. The algorithm provides for step-by-step integration of interval differential equations and solution of interval nonlinear algebraic equations at each step of integration using Kaucher interval arithmetic. The obtained results of the study of processes in a two-level logic cell MOBILE create prerequisites for expanding the field of application of resonant tunneling devices in high-speed monolithic integrated circuits.

Keywords: nanoelectronic structures; resonant tunneling diode; two-level logic cell; interpolation formula; structural parametric model; interval analysis; computational algorithm

For citation: Bondarev A.V., Efanov V.N. Investigation of robustness of nanoelectronic structures based on resonant tunneling elements. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 491–507. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-491-507

Введение. Разработка устройств на основе наноэлектронных структур относится к актуальной и динамично развивающейся области науки. Интерес к этой области связан как с принципиально новыми фундаментальными научными проблемами и физическими явлениями, так и с перспективами создания на основе уже открытых явлений новых квантовых устройств и систем с широкими функциональными возможностями. Использование приборов, в функционировании которых квантовые эффекты играют ключевую роль, позволяет значительно повысить производительность вычислительных систем, увеличить пропускную способность каналов связи, резко увеличить информационную емкость и качество систем отображения информации с одновременным снижением энергозатрат; существенно повысить чувствительность сенсорных устройств и расширить спектр измеряемых величин; создать высокоэкономичные твердотельные осветительные приборы; увеличить удельный вес использования электронных и оптоэлектронных компонентов в медицинских, биологических, химических, машиностроительных и других технологиях [1–6].

Элементная база, основанная на использовании разнообразных низкоразмерных структур, является наиболее перспективной для электронной техники нового поколения. Однако при переходе к системам нанометрового диапазона начинает отчетливо проявляться квантовомеханическая природа квазичастиц в твердом теле. В результате возникает ряд проблем при использовании наноэлектронных структур в радиоэлектронных системах. Эти проблемы в основном связаны как с конструированием таких структур, так и с обеспечением работоспособности подобных устройств в условиях реальной эксплуатации [7, 8]. Электронные системы должны работать при низких или высоких температурах, при наличии вибрации и воздействии электромагнитных полей и т.д. В связи с этим ставится задача оценки работоспособности наноэлектронных устройств при изменении внешних воздействий в широком диапазоне. Такая оценка должна проводиться на всех этапах разработки устройства, в том числе при его схемотехническом проектировании.

Анализ физических процессов в наноэлектронных структурах, построенных на основе резонансно-туннельных элементов. Физические процессы в резонансно-туннельных диодах (РТД) и резонансно-туннельных транзисторах основаны на эффекте туннелирования носителей электрического заряда через потенциальный барьер. При этом туннелирование в наноэлектронных структурах имеет особенности, связанные с волновыми свойствами носителей и квантованием их энергетических состояний. В связи с этим туннелирование носителей в наноструктурах зависит не только от параметров потенциальных барьеров, но и от разрешенных энергетических состояний для носителей в этих структурах. Если уровень Ферми инжектирующего электрода совпадает с дискретным уровнем структуры, ограниченной барьерами, наблюдается резкий рост туннельного тока (явление резонансного туннелирования). Если нижний дискретный уровень квантовой ямы смещается в область энергий, соответствующую запрещенной зоне эмиттера РТД, то на ВАХ появляется область с отрицательным дифференциальным сопротивлением [9, 10]. На рис.1 приведена ВАХ РТД. Это туннельная структура, состоящая из последовательных квантовых колодцев, которые разделены потенциальными барьерами. Обычно используется структура с одним колодцем и двумя барьерами, так как при большем числе колодцев трудно согласовать резонансный перенос электронов. Двухбарьерная структура обычно изготавливается из сверхрешеток GaAs/AlGaAs. Электроды и квантовый колодец формируются из GaAs, а барьеры – из соединения GaAlAs.

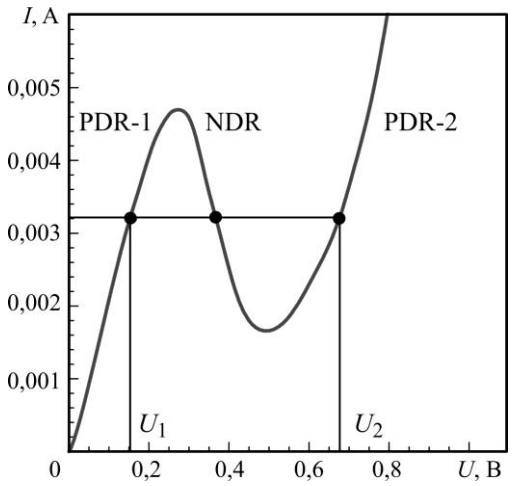


Рис.1. ВАХ двухбарьерной структуры
Fig.1. Current-voltage characteristic of the double-barrier structure

ВАХ содержит три различные рабочие области: с положительным дифференциальным сопротивлением PDR-1, PDR-2 и отрицательным дифференциальным сопротивлением NDR. Две области PDR являются стабильными рабочими областями, а область NDR метастабильна [11, 12]. Приборы, которые имеют участок отрицательного дифференциального сопротивления, называются «негатроны». В негатронах для каждого значения тока имеются два определенных стабильных значения напряжения. На рис.1 для тока I_1 это напряжения U_1 и U_2. Состояние РТД при напряжении U_1 считается низкоомным, или «открытым», состояние U_2 является высокоомным, или «закрытым». Переключение таких схем обеспечивается благодаря разности пиковых токов РТД, что при подаче напряжения смещения приводит к «выключению» РТД с малым током, а РТД с большим током остается в «открытом» состоянии.

Существенная нелинейность ВАХ негатронов определяет следующие преимущества приборов этого класса [13, 14]:

– малое (пикосекундное) время переключения;

– более высокая функциональность РТД по сравнению с традиционными элементами за счет возможности реализовывать аналогичные функции меньшим количеством элементов.

Однако наличие внутренней нестабильности и возможность спонтанной генерации электрических колебаний приводят к тому, что электрические схемы, которые построены только на негатронах, неустойчивы. Проблема устойчивости решается за счет использования двухуровневой логической ячейки MOBILE (MOnostable-to-BIstabletransition Logic Element) [15, 16]. В простейшем случае такая ячейка содержит два последовательно соединенных РТД (пара Гото) или комбинацию двухполюсного РТД и трехполюсных HEMT- и HBT-транзисторов.

В паре Гото (рис.2,*а*) один РТД (RTD_1) выполняет функции нагрузки, а второй РТД (RTD_2) – активного элемента. Управляя пиковым током активного РТД, можно получать на выходе пары Гото, либо стабильный низкий уровень, либо стабильный высокий уровень. В инверторе на основе HEMT-транзистора с РТД-нагрузкой (рис.2,*б*) бистабильная конфигурация возникает, если U_{bias} в два раза превышает пиковое напряжение. Это приводит к двум самостабилизирующимся состояниям цифрового выхода. Если U_{in} соответствует «1» и транзистор открывается, то РТД переходит в высокоомное состояние, т.е. на вторую восходящую ветвь ВАХ, и выходное напряжение становится низким. При подаче «0», т.е. при закрывании транзистора, РТД переключается в низкоомное состояние и выходное напряжение становится высоким. На базе стандартных ячеек MOBILE созданы сверхбыстродействующие многовходовые логические элементы [17, 18]. Их функциональные возможности позволяют реализовать любую логическую функцию за счет расширения базовой конфигурации как последовательными, так и параллельными блоками. На рис.2,*в* показана схема двухвходового порогового вентиля для выполнения пороговых логических функций.

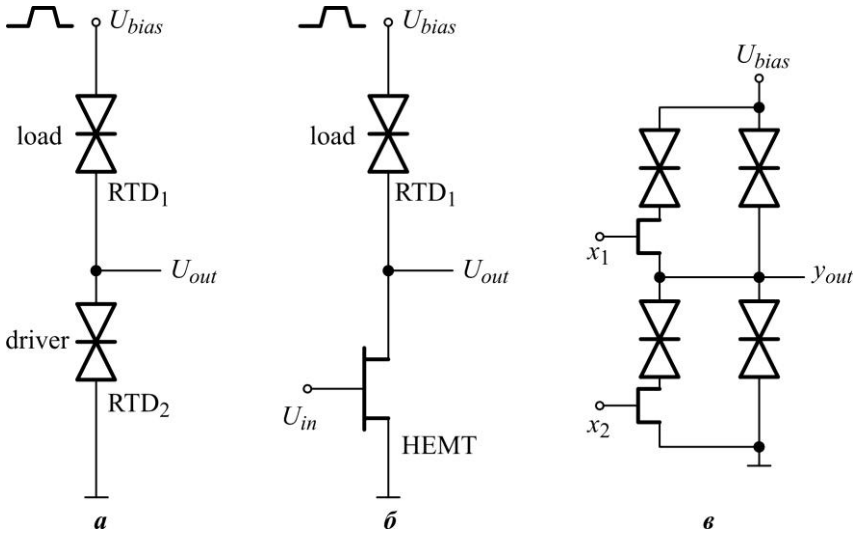


Рис.2. Двухуровневые логические ячейки MOBILE: *а* – пара Гото; *б* – комбинация РТД и НЕМТ-транзистора; *в* – многовходовый логический элемент
Fig.2. Two-level logical cells MOBILE: *a* – Goto pair; *b* – a combination of RTD and HEMT transistor; *c* – multi-input logic element

Разработанные логические элементы MOBILE служат базой для создания ПЛИС, которые имеют малую потребляемую мощность и малые топологические размеры при больших плотностях токов. В настоящее время наблюдается повышенный интерес к использованию ПЛИС с высокой степенью интеграции в различных отраслях техники, особенно там, где требуется организация высокопроизводительных вычислений. Отметим, что реальная производительность многопроцессорных систем, которые объединяют микропроцессоры с традиционной архитектурой, часто не превышает 10–15 % от заявленной пиковой производительности. Это происходит из-за необходимости реализации множества процедур межпроцессорного обмена, а также синхронизации последовательных процессов, выполняемых в процессорах системы. Основная причина этого – несоответствие между жесткой архитектурой вычислительных систем и информационной структурой задач. Данный недостаток позволяет устранить способ построения вычислительной системы с гибкой динамически программируемой архитектурой, подстраиваемой под информационную структуру конкретной задачи. Ранее практическое внедрение данной концепции сдерживалось отсутствием необходимой для реализации реконфигурируемой архитектуры элементной базы. Такая возможность появляется при использовании ПЛИС, конфигурацию которых можно менять, адаптируя тем самым вычислительную систему для решения конкретного типа задач. В связи с этим аппаратная реализация системы обеспечения параллельного выполнения программ SWARM, которая разрабатывается в рамках программы DARPAUHPC и предназначена для поддержки времени выполнения в больших гетерогенных вычислительных системах, предусматривает использование ПЛИС. ПЛИС являются основой одного из самых высокопроизводительных суперкомпьютеров с изменяемой конфигурацией Novo-G (Флоридский университет, США). Novo-G насчитывает в общей сложности 192 вентильные матрицы AlteraStratix-IIIE260, каждая из которых содержит 768 умножителей (18×18), 254 тыс. логических элементов, 204 тыс. регистров и имеет 4,25 Гб памяти. Еще один характерный пример многофункциональной реконфигурируемой системы на базе ПЛИС – система ConveyHC-1ex компании ConveyComputer. Для перепрограммирования пользователю доступны четыре платы для выполнения пользовательских про-

грамм (Application Engines, AE), в которые можно либо загружать собственную прошивку, либо использовать одно из специализированных приложений (финансовый анализ, биоинформатику, распознавание речи, графовые задачи и др.).

Для широкого внедрения ПЛИС на базе резонансно-туннельных приборов необходимо обеспечить их стабильную работу в широком диапазоне внешних воздействий. Резонансное туннелирование чрезвычайно чувствительно к изменению энергий квантовых состояний в наноструктурах. При этом энергии квантовых состояний определяются распределением концентрации носителей тока. Низкоразмерные системы, используемые в резонансно-туннельных приборах, являются открытыми системами с переменным числом частиц. В таких системах термодинамическое равновесие устанавливается путем обмена частиц между туннельно-связанными электронными системами. Существенное влияние различных внешних факторов на процессы квантового транспорта в наноструктурах приводит к значительному разбросу их характеристик. В работах [19, 20] показано, как технологические погрешности конструктивных параметров резонансно-туннельных приборов, в частности время термического отжига, влияют на изменение ВАХ РТД. В работе [21] приводится спектр ВАХ 130 изготовленных РТД, при этом положение пиков и их высота на каждой характеристике существенно различаются. Существующие методы анализа чувствительности позволяют оценить поведение устройств в малой окрестности номинального режима работы. В связи с этим ставится задача анализа робастности радиоэлектронных систем в заданном диапазоне изменения их характеристик. Решение этой задачи позволит оценить диапазон изменения схемотехнических характеристик исследуемых устройств, определяющих условия сохранения работоспособности последних.

Для решения поставленной задачи сформируем обобщенную структурно-параметрическую модель гибридных радиоэлектронных систем на базе микро- и наноэлектронных компонентов с учетом воздействия неопределенных факторов внешней и внутренней среды.

Аналитическая модель резонансно-туннельного диода. Разработку обобщенной структурно-параметрической модели логических ячеек MOBILE начнем с построения модели РТД. В работах [22, 23] приводится имитационная модель РТД, которая состоит из комбинации квантовой емкости $C(U)$ и нелинейного сопротивления $R(U)$ (рис.3).

Квантовая емкость описывает изменение заряда в квантовом колодце. Последовательное сопротивление R_C обусловлено контактным и распределенным сопротивлениями полупроводника. Параметры модели для трех различных областей при типичных смещениях приведены в табл.1.

РТД размером 3×3 мкм обеспечивает соотношение пикового и долинного токов (PVCR) 5,52 с пиковым током I_p = 11,24 мА и пиковым напряжением U_p = 0,8 В. Высокое значение пикового тока при относительно низком пиковом напряжении определяется конструкцией РТД, обеспечивающей равномерное распределение тока.

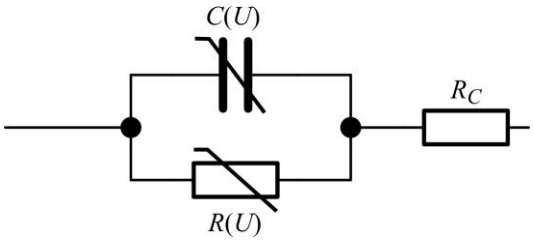


Рис.3. Нелинейная модель резонансного туннельного диода для режима больших сигналов

Fig.3. Large-signal-based nonlinear model for a resonant tunneling diode

ВАХ РТД содержит ряд характерных участков, соответствующих положительным и отрицательным значениям дифференциального сопротивления прибора. В связи с этим при построении математической модели РТД используем кусочно-полиномиальную интерполяцию его ВАХ.

Таблица 1

Параметры РТД

Table 1

RTD parameters

Область ВАХ	Смещение, В	*R*, Ом	*C*, фФ (10^{-5} Ф)
PDR-1	0,2	255,9	40,8
NDR	1,0	–504,4	69,1
PDR-2	1,3	132,1	43,8

Для обеспечения высокой точности описания ВАХ РТД необходимо задавать большое количество узлов интерполяции. При использовании классических интерполяционных формул Ньютона, Бесселя, Стирлинга и т.д. это приводит к необходимости оперировать с интерполяционными полиномами высоких порядков. Как показывают исследования, в этом случае интервал равномерной сходимости интерполяционных полиномов к интерполируемой функции существенно сокращается. Отсутствие равномерной сходимости говорит о том, что задача интерполяции становится некорректной в смысле Адамара. Вследствие этого незначительная модификация исходных данных может привести к значительному изменению результата интерполяции. Указанное противоречие можно устранить с помощью кусочно-полиномиальной интерполяции, когда исходный отрезок $[a,b]$ разбивается на меньшие отрезки, на каждом из которых используется свой полином малой степени.

В настоящей работе будем использовать кубические сплайны. Исходная ВАХ $I(U)$ показана на рис.4,*а*. Эта характеристика получена при комнатной температуредля РТД со структурой InAs/$In_{0,53}Ga_{0,47}As$/AlAs на подложке из InP (3×3 мкм) [22].

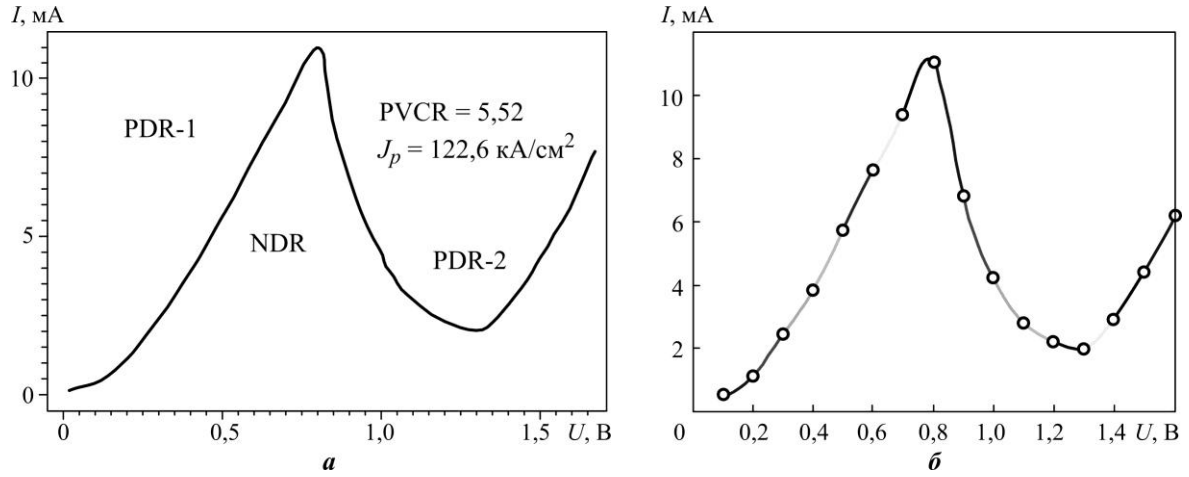


Рис.4. Экспериментальная ВАХ РТД (*а*) и результат ее интерполяции (б)
Fig.4. Experimental current-voltage characteristics of the RTD (*a*) and result of interpolation (*b*)

Для интерполяции выберем интервал по напряжению от 0,1 до 1,6 В. Данный интервал разобьем на 16 отрезков с шагом 0,1:

$$a = 0{,}1 = x_0 < x_1 < \ldots < x_4 < x_{15} = b = 1{,}6. \qquad (1)$$

Значения тока $i_k = I(u_k), k = 0, 1, ..., n$, найденные в узлах интерполяции, приведены в табл.2.

Таблица 2

Исходные данные для интерполяции ВАХ РТД

Table 2

Initial data for current-voltage characteristics of the RTD

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
u_k, В	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
i_k, мА	0,5	1,1	2,4	3,8	5,7	7,6	9,4	11	6,8	4,2	2,8	2,2	2,0	2,9	4,4	6,2

На каждом отрезке $[u_{k-1}, u_k]$, $k = 1, 2, ..., 15$, необходимо найти сплайн-функцию $s(u) = s_i(u)$, которая удовлетворяет следующим условиям:

1) является кубическим многочленом на каждом отрезке $[u_{k-1}, u_k]$, $k = 1, 2, ..., 15$;

2) непрерывна на отрезке [0,1; 1,6], как и ее первая и вторая производные;

3) имеется совпадение в узлах интерполяции: $s(u_k) = I(u_k), k = 0, 1, 2, ..., 15$.

Функция $s(u)$, которая удовлетворяет условиям 1–3, представляет собой полином третьей степени:

$$s_k(u) = a_k + b_k(u - u_k) + \frac{c_k}{2}(u - u_k)^2 + \frac{d_k}{6}(u - u_k)^3, \quad (2)$$

$$u_{k-1} \le u \le u_k, \ k = 1, 2, ..., 15,$$

где a_k, b_k, c_k, d_k – коэффициенты полинома, которые необходимо найти.

Коэффициенты c_i удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$c_0 = c_{15} = 0,$$

$$h_k c_{k-1} + 2(h_k + h_k c_{k-1} + 2(h_k + h_{k+1})c_k + h_{k+1}c_{k+1} = 6\left(\frac{i_{k+1}}{h_{k+1}} - \frac{i_k - i_{k-1}}{h_k}\right); \ k = 1,2,...,14, \quad (3)$$

здесь $h_k = u_k - u_{k-1}$.

Система уравнений (3) имеет единственное решение, так как матрица коэффициентов трехдиагональная. После нахождения коэффициентов c_i оставшиеся коэффициенты определяются по следующим формулам:

$$a_k = I(u_k); d_k = \frac{c_k - c_{k-1} - 1}{h_k}, \quad (4)$$

$$b_k = \frac{h_k}{2}c_k - \frac{h_k^2}{6}d_k + \frac{i_k - i_{k-1}}{h_k}; \ k = 1, 2, ..., 15.$$

Результаты расчетов приведены в табл.3. Результат кусочно-полиномиальной интерполяции ВАХ кубическими сплайнами представлен на рис.4,*б*.

Таблица 3

Коэффициенты интерполяционных полиномов

Table 3

Coefficients of interpolation polynomials

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
a_k	1,1	2,4	3,8	5,7	7,6	9,4	11	6,8	4,2	2,8	2,2	2	2,9	4,4
b_k	–1,5	1,1	0,9	–3,2	–3	3,6	2,3	–0,2	2,7	1,8	1,5	0,9	–1,5	0,2
c_k	3,8	0,5	–0,7	–20	21	–4,6	–8,5	5,7	1,5	–5,7	5,4	–6,4	2,3	–0,1
d_k	–1,8	–0,5	–32	69	–21	–13	5,3	–3,5	–12	2,9	–7,9	4,8	–1	0,04

Структурно-параметрическая модель инвертора на основе HBT-транзистора с РТД-нагрузкой. Используя полученный результат, построим обобщенную структурно-параметрическую модель для оценки робастности логических ячеек MOBILE. Методику исследования робастности логических ячеек MOBILE рассмотрим на примере инвертора, в состав которого входят последовательно соединенные РТД и HBT-транзистор. Высокочастотные HBT-транзисторы из InP широко используются для разработки высокоскоростных аналоговых, цифровых и интегральных схем со смешанными сигналами [24]. Эквивалентная схема этой ячейки представлена на рис.5,*а*. Схема содержит модель РТД и модель Эберса – Молла для HBT-транзистора. Этот нелинейный реактивный многополюсник можно описать с помощью системы нелинейных дифференциальных уравнений. Для обеспечения выполнения условий алгоритмической разрешимости такой системы уравнений проведем топологический и параметрический анализы эквивалентной схемы. Построим топологический граф многополюсника (рис.5,*б*) и найдем основные топологические матрицы: A – матрицу главных сечений, B – матрицу главных контуров:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}.$$

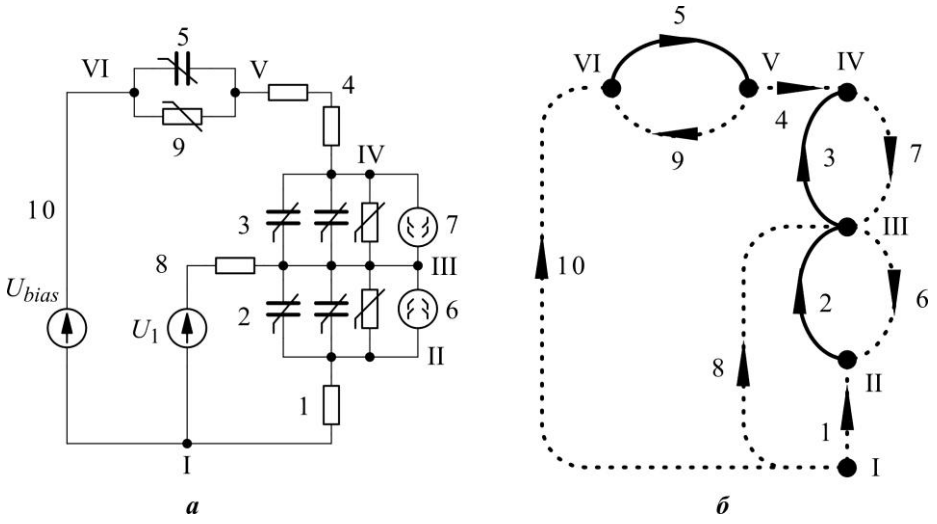


Рис.5. Топологический анализ инвертора: *а* – эквивалентная схема инвертора; *б* – топологический граф многополюсника

Fig.5. Topological analysis of the inverter: *a* – the equivalent circuit of the inverter; *b* – topological graph of a multipole

Систему топологических уравнений запишем относительно векторов отклонений ΔI и ΔU токов и напряжений в возмущенном режиме I_o, U_o от их значений I_n, U_n в номинальном режиме работы:

$$A\Delta I = 0; \quad B\Delta U = 0. \tag{5}$$

Выделим в составе векторов ΔI и ΔU составляющие, которые соответствуют следующим типам ветвей: реактивным (емкостным) ребрам, линейным резистивным ребрам, нелинейным резистивным хордам, линейным резистивным хордам. Упорядоченные подобным образом векторы ΔI и ΔU принимают вид

$$\Delta I = \left[\Delta I_c^P; \Delta I_R^P; \Delta I_H^X; \Delta I_R^X\right],$$
$$\Delta U = \left[\Delta U_H^X; \Delta U_R^X; \Delta U_C^P; \Delta U_R^P\right].$$

При этом топологическим матрицам соответствует следующая блочная форма записи:

$$A = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \vec{I} & 0 & A_H^C & A_R^C \\ \hline 0 & \vec{I} & A_H^R & A_R^R \end{array}\right]; B = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \vec{I} & 0 & B_C^H & B_R^H \\ \hline 0 & \vec{I} & B_C^R & B_R^R \end{array}\right].$$

В результате проведенной декомпозиции система топологических уравнений (5) разбивается на четыре группы уравнений:

$$\Delta I_C^P = -A_H^C \Delta I_H^X - A_R^C \Delta I_R^X, \quad \Delta U_H^X = -B_C^H \Delta U_C^P - B_R^H \Delta U_R^P,$$
$$\Delta I_R^P = -A_H^R \Delta I_H^X - A_R^R \Delta I_R^X, \quad \Delta U_R^X = -B_C^R \Delta U_C^P - B_R^R \Delta U_R^P.$$

Объединение векторов отклонений напряжений и токов для линейных резистивных ветвей позволяет сформировать следующую гибридную систему уравнений:

$$\Delta I_C^P = -A_H^C \Delta I_H^X + \left[0 \mid -A_R^C\right] \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix}, \tag{6}$$

$$\Delta U_H^X = -B_C^H \Delta U_C^P + \left[-B_R^H \mid 0\right] \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix}, \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U_R^X \\ \Delta I_R^P \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c} -B_C^R \\ \hline 0 \end{array}\right] \Delta U_C^P + \left[\begin{array}{c} 0 \\ \hline -A_H^R \end{array}\right] \Delta I_H^X + \left[\begin{array}{c|c} -B_R^R & 0 \\ \hline 0 & -A_R^R \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Далее получим параметрические уравнения для электрических ветвей эквивалентной схемы инвертора с учетом конечных приращений их параметров. Эти уравнения находятся на основе анализа возмущенных состояний, которые вызваны воздействием внешних и внутренних факторов.

Для линейного резистора $u_R(t) = Ri_R(t)$ уравнение возмущенного состояния имеет вид

$$\begin{aligned} u_R(t) + \Delta u_R(t) &= \left(R + \Delta R\right)\left[i_R(t) + \Delta i_R(t)\right] = \\ &= Ri_R(t) + \Delta R i_R(t) + R\Delta i_R(t) + \Delta R \Delta i_R(t). \end{aligned} \tag{9}$$

В результате уравнение в отклонениях будет следующим:

$$\Delta u_R(t) = E_R^{ind} + R_{equ} \Delta i_R(t),$$

где $E_R^{ind} = \Delta R i_R(t)$ – интервально заданный независимый источник напряжения; $R_{equ} \in [R + \Delta R;\ \ R - \Delta R]$ – эквивалентное интервально заданное значение сопротивления резистора для возмущенного режима.

Аналогично для резистора, который задан своей проводимостью, уравнение в отклонениях имеет вид

$$\Delta i_R(t) = J_R^{ind} + Y_{equ}\,\Delta u_R(t). \tag{10}$$

Для нелинейных резисторов и нелинейных емкостей воспользуемся параметрическими уравнениями в отклонениях, которые получены в работах [25, 26]:

$$\Delta u_H(t) = E_H^{ind} + Z_{equ}\left(\Delta i_H, J_{dep}\right), \tag{11}$$

$$\Delta i_C(t) = J_C^{ind} + J_C^{dep}\left(\Delta u_C\right) + Y_C^{equ}(\Delta u_C) + C_{equ}\left(\Delta u_C\right)\frac{d\Delta u_C}{dt}, \tag{12}$$

где E_H^{ind} – интервальный независимый источник напряжения; $Z_{equ}\left(\Delta i_H, J_{dep}\right)$ – нелинейное сопротивление; J_{dep} – зависимый (управляемый током) источник тока; J_C^{ind} – независимый источник тока; $J_C^{dep}\left(\Delta u_C\right)$ – зависимый интервальный источник тока; $Y_C^{equ}\left(\Delta u_C\right)$ – эквивалентная, нелинейная и интервальная, проводимость; $C_{equ}\left(\Delta u_C\right)$ – эквивалентная, нелинейная и интервальная, емкость.

Используя выражения (9)–(12), сформируем векторы приращений токов для емкостных ребер, приращений напряжений для нелинейных резистивных хорд, приращений токов и напряжений для линейных резистивных ребер и хорд:

$$\Delta I_C^P = J_C^P + J_C^P\left(\Delta U_C^P\right) + Y_C^P(\Delta U_C^P) + C_P\left(\Delta U_C^P\right)\frac{d\Delta U_C^P}{dt}, \tag{13}$$

$$\Delta U_H^X = E_H^X + Z_X\left(\Delta I_H^X\right), \tag{14}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta U_R^X \\ \Delta I_R^P\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}E_R^X \\ J_R^P\end{bmatrix} + \left[\begin{array}{c|c} 0 & R_X \\ \hline Y_P & 0 \end{array}\right]\begin{bmatrix}\Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X\end{bmatrix}, \tag{15}$$

где $J_C^P,\ J_C^P\left(\Delta U_C^P\right), Y_C^P(\Delta U_C^P)$ – векторы-столбцы независимых и зависимых источников тока, а также нелинейных проводимостей; $C_P\left(\Delta U_C^P\right)$ – диагональная матрица эквивалентных емкостей; $E_H^X, Z_X\left(\Delta I_H^X\right)$ – векторы-столбцы независимых источников напряжения и нелинейных сопротивлений; $E_R^X,\ J_R^P$ – векторы-столбцы независимых источников напряжения и тока; R_X, Y_P – диагональные матрицы сопротивлений и проводимостей.

Подставим (13), (14), (15) соответственно в (6), (7), (8):

$$J_C^P + J_C^P\left(\Delta U_C^P\right) + Y_C^P(\Delta U_C^P) + C_P\left(\Delta U_C^P\right)\frac{d\Delta U_C^P}{dt} =$$

$$= -A_H^C \Delta I_H^X + \left[0 \,\vdots\, -A_R^C\right]\begin{bmatrix}\Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X\end{bmatrix},$$

$$E_H^X + Z_X\left(\Delta I_H^X\right) = -B_C^H \Delta U_C^P + \left[-B_R^H \;\vdots\; 0\right]\begin{bmatrix}\Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X\end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix}E_R^X \\ J_R^P\end{bmatrix} + \left[\begin{array}{c:c} 0 & R_X \\ \hdashline Y_P & 0 \end{array}\right]\begin{bmatrix}\Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X\end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix}-B_C^R \\ 0\end{bmatrix}\Delta U_C^P + \begin{bmatrix}0 \\ -A_H^R\end{bmatrix}\Delta I_H^X + \left[\begin{array}{c:c} -B_R^R & 0 \\ \hdashline 0 & -A_R^R \end{array}\right]\begin{bmatrix}\Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X\end{bmatrix}.$$

После преобразования получим

$$\frac{d\Delta U_C^P}{dt} = F_C^P(\Delta U_C^P) + V_1^C \Delta I_H^X + V_2^C\begin{bmatrix}\Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X\end{bmatrix} + V_3^C J_C^P, \tag{16}$$

$$Z_X\left(\Delta I_H^X\right) = -B_C^H \Delta U_C^P + \left[-B_R^H \;\vdots\; 0\right]\begin{bmatrix}\Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X\end{bmatrix} E_H^X, \tag{17}$$

$$\left[\begin{array}{c:c} B_R^R & R_X \\ \hdashline Y_P & A_R^R \end{array}\right]\begin{bmatrix}\Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-B_C^R \\ 0\end{bmatrix}\Delta U_C^P + \begin{bmatrix}0 \\ -A_H^R\end{bmatrix}\Delta I_H^X - \begin{bmatrix}E_R^X \\ J_R^P\end{bmatrix}. \tag{18}$$

В (16)

$$F_C^P(\Delta U_C^P) = \left[C_P\left(\Delta U_C^P\right)\right]^{-1}\left[J_C^P\left(\Delta U_C^P\right) + Y_C^P(\Delta U_C^P)\right];\quad V_1^C = -\left[C_P\left(\Delta U_C^P\right)\right]^{-1} A_H^C;$$

$$V_2^C = \left[C_P\left(\Delta U_C^P\right)\right]^{-1}\left[0 \;\vdots\; -A_R^C\right];\quad V_3^C = \left[C_P\left(\Delta U_C^P\right)\right]^{-1} J_C^P.$$

Таким образом, структурно-параметрическая модель (16)–(18) рассматриваемого устройства представляет собой совокупность интервальных обыкновенных дифференциальных уравнений, интервальных нелинейных и линейных алгебраических уравнений. Алгоритмическая разрешимость полученной модели обусловлена ее структурой, которая допускает поэтапное интегрирование дифференциальных уравнений и решение нелинейных алгебраических уравнений на каждом шаге интегрирования. При этом искомые параметры $\Delta = \left[\Delta U_C^P; \Delta U_R^P; \Delta I_H^X; \Delta I_R^X\right]$ – интервальные функции $\Delta_i \in \left[\underline{\Delta_i}; \overline{\Delta_i}\right]$. В связи с этим ставится задача оценивания области значений этих параметров Δ_i. Эта область задается следующим множеством: $\mathrm{range}\left(\Delta_i; \Xi\right) = \left\{\Delta_i(\xi) \middle| \xi \in \Xi\right\}$. Как следует из [27], вычисление интервальных расширений коэффициентов Δ_i на основе только границ интервалов вектора Ξ позволяет получить лишь интервальную оболочку, которая является внешней интервальной оценкой этих коэффициентов. Качество такой оценки определяется следующими неравенствами:

$$\mathrm{dist}\left(\mathrm{range}\left(\Delta_i; \Xi\right), \Delta_i(\xi)\right) \le \gamma \left\|\mathrm{wid}\,\xi\right\|_\infty, \quad \gamma \ge 0,$$

$$\mathrm{wid}\,\Delta_i(\xi) \le \delta \left\|\mathrm{wid}\,\xi\right\|_\infty, \quad \delta \ge 0,$$

где $\mathrm{dist}\left(\xi_1, \xi_2\right)$ – хаусдорфово расстояние между интервалами $\xi_1 = \left[\underline{\xi_1}, \overline{\xi_1}\right]$ и $\xi_2 = \left[\underline{\xi_2}, \overline{\xi_2}\right]$, которое определяется как $\mathrm{dist}\left(\xi_1, \xi_2\right) = \max\left\{\left|\underline{\xi_1} - \underline{\xi_2}\right|, \left|\overline{\xi_1} - \overline{\xi_2}\right|\right\}$; $\mathrm{wid}\,\xi = \overline{\xi} - \underline{\xi}$ – ширина соответствующего интервала.

Основная причина расширения интервальных оценок заключается в том, что стандартная интервальная арифметика является коммутативной полугруппой, в которой вместо дистрибутивного закона выполняется субдистрибутивный. Для устранения подобного недостатка предлагается использовать более широкую и полную алгебраическую систему, которая получила название интервальной арифметики Каухера [28]. Арифметика Каухера является группой по сложению и условно полной решеткой по умножению. С учетом сказанного последовательность вычислительных операций задается следующим алгоритмом:

Шаг 1. Полагаем $t_0 = 0$ и $l = 0$. Задаем начальные приближения искомых параметров.

Шаг 2. Используя правила арифметики Каухера, находим внешнюю интервальную оценку производных:

$$\frac{d\Delta U_C^P}{dt} = F_C^P(\Delta U_C^P) + V_1^C \Delta I_H^X + V_2^C \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} + V_3^C J_C^P .$$

Шаг 3. Находим интервальное расширение вектора:

$$\Delta U_C^P = \Delta U_C^P + \frac{d\Delta U_C^P}{dt} \times \Delta ,$$

где Δ – шаг интегрирования.

Шаг 4. Решаем нелинейную интервальную систему, используя метод конфигураций, который является методом нулевого порядка и не требует вычисления интервальных производных:

$$Z_X\left(\Delta I_H^X\right) = -B_C^H \Delta U_C^P + \begin{bmatrix} -B_R^H & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} E_H^X .$$

Шаг 5. Решаем линейную интервальную систему, используя хорошо апробированный интервальный метод Гаусса:

$$\left[\begin{array}{c|c} B_R^R & R_X \\ \hline Y_P & A_R^R \end{array}\right] \begin{bmatrix} \Delta U_R^P \\ \Delta I_R^X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_C^R \\ 0 \end{bmatrix} \Delta U_C^P + \begin{bmatrix} 0 \\ -A_H^R \end{bmatrix} \Delta I_H^X - \begin{bmatrix} E_R^X \\ J_R^P \end{bmatrix}.$$

Шаг 6. Принимаем $l = l + 1$, $t_l = t_l + \Delta$.

Шаг 7. Процесс закончен? Если «да», идем к шагу 8, иначе – к шагу 2.

Шаг 8. Конец.

Результаты расчета интервала изменения выходного напряжения инвертора представлены на рис.6.

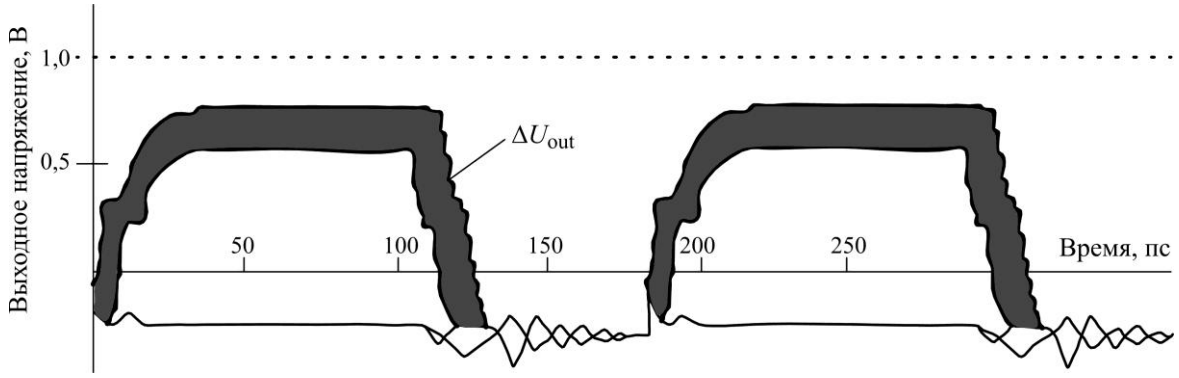


Рис.6. Разброс уровней выходного напряжения инвертора в режиме переключения
Fig.6. The spread of the output voltage levels of the inverter in switching mode

Заключение. Предложенный метод исследования устойчивости наноэлектронных структур позволяет расширить диапазон использования устройств, основанных на квантовых эффектах, в различных технических приложениях. Предварительный анализ работоспособности резонансно-туннельных гетероструктур, изучение особенностей их динамического поведения и реакции на внешние воздействия показали, что можно снизить затраты на расчетно-теоретические работы при создании структурной схемы изделия, обеспечивающей его работу в реальных условиях эксплуатации.

Разработанные интервальные математические модели для базового набора элементов резонансно-туннельных гетероструктур позволяют оценить весь диапазон изменения характеристик исследуемых устройств и избежать перебора всех возможных комбинаций параметров при поиске оптимального варианта. Полученные вычислительные алгоритмы расчета процессов в двухуровневой логической ячейке MOBILE создают предпосылки для расширения области применения устройств резонансного туннелирования в высокоскоростных монолитных ИС.

Литература

1. ***Yamakura H., Suhara M.*** Proposal of bow-tie antenna-integrated resonant tunneling diode transmitter utilizing relaxation oscillations and its application to short-distance wireless communications // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2018. Vol. 39. P. 1087–1111. DOI: https://doi.org/10.1007/s10762-018-0518-y

2. ***Fukuoka M., Asakawa K., Suhara M.*** Analysis of phase mode variation due to bias voltage in arrayed oscillators using resonant tunneling diodes integrated with bow-tie antennas // 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). Toyama: IEEE, 2018. P. 2461–2466. DOI: https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8597876

3. ***Lee J., Choi S., Lee J., Yang K.*** 40 Gb/s low-power 4:1 multiplexer based on resonant tunneling diodes // IEEE Trans. Nanotechnol. 2012. Vol. 11. No. 5. P. 890–895. DOI: https://doi.org/10.1109/TNANO.2012.2204768

4. ***Hu X., Feng G., Duan S., Liu L.*** Multilayer RTD-memristor-based cellular neural networks for color image processing // Neurocomputing. 2015. Vol. 162. P. 150–162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.03.057

5. Toward mobile integrated electronic systems at THz frequencies / ***P. Hillger, M. Van Delden, U.S.M. Thanthrige et al.*** // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2020. Vol. 41. No. 7. P. 846–869. DOI: https://doi.org/10.1007/s10762-020-00699-x

6. Area-efficient series-connected resonant tunneling diode pair as binary neuron in cellular neural network / ***J. Lee, S. Choi, S.-Y. Kim et al.*** // IEEE Electron Device Letters. 2020. Vol. 41. Iss. 9. P. 1308–1311. DOI: https://doi.org/10.1109/LED.2020.3008164

7. ***Lee K., Jeong Y.*** Temperature-dependent characteristics of a RTD-based microwave push-push oscillator // Microwave and Optical Technology Letters. 2018. Vol. 60. P. 803–805. DOI: https://doi.org/10.1002/mop.31060

8. Gamma-induced degradation effect of InP HBTs studied by Keysight model / ***J. Zhang, L. Cao, M. Liu et al.*** // Nuclear Science and Engineering. 2020. Vol. 195. Iss. 2. P. 173–184. DOI: https://doi.org/10.1080/00295639.2020.1798679

9. ***Ткалич В.Л., Макеева А.В., Оборина Е.Е.*** Физические основы наноэлектроники: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 83 с.

10. Investigation of switching time in GaN/AlN resonant tunneling diodes by experiments and P-SPICE models / ***W.-D. Zhang, T.A. Growden, D.F. Storm et al.*** // IEEE Transactions on Electron Devices. 2020. Vol. 67. No. 1. P. 75–79. DOI: https://doi.org/10.1109/TED.2019.2955360

11. ***Shin-Ya H., Suhara M., Asaoka N., Naoi M.*** Implementation of physics-based model for current-voltage characteristics in resonant tunneling diodes by using the Voigt function // IEICE Transactions on Electronics. 2010. Vol. E93.C. Iss. 8. P. 1295–1301. DOI: https://doi.org/10.1587/transele.E93.C.1295

12. ***Dal Bosco A.K., Suzuki S., Asada M., Minamide H.*** Feedback effects and nonlinear dynamics in resonant tunneling diodes // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Nagoya: IEEE, 2018. P. 1–2. DOI: https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2018.8510286

13. Resonant tunneling diode terahertz sources with up to 1 mW output power in the J-band / ***A. Al-Khalidi, Kh.H. Alharbi, J. Wang et al.*** // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2020. Vol. 10. No. 2. P. 150–157. DOI: https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2959210

14. InGaAs/AlAs resonant tunneling diodes for THz applications: an experimental investigation / ***S.G. Muttlak, O.S. Abdulwahid, J. Sexton et al.*** // IEEE Journal of the Electron Devices Society. 2018. Vol. 6. P. 254–262. DOI: https://doi.org/10.1109/JEDS.2018.2797951

15. ***Quintana J.M., Avedillo M.J., Nunez J., Pettenghi Roldan H.*** Operation limits for RTD-based MOBILE circuits // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2009. Vol. 56. No. 2. P. 350–363. DOI: https://doi.org/10.1109/TCSI.2008.925943

16. ***Maezawa K., Sugiyama H., Kishimoto S., Mizutani T.*** 100 GHz operation of a resonant tunneling logic gate MOBILE having a symmetric configuration // 2006 Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials. Princeton, NJ: IEEE, 2006. P. 46–49. DOI: https://doi.org/10.1109/ICIPRM.2006.1634108

17. ***Nikodem M.*** Synthesis of multithreshold threshold gates based on negative differential resistance devices // IET Circuits, Devices & Systems. 2013. Vol. 7. Iss. 5. P. 232–242. DOI: https://doi.org/10.1049/iet-cds.2012.0368

18. ***Yao Mq., Yang K., Shen Jz., Xu C.*** Function synthesis algorithm based on RTD-based three-variable universal logic gates // Frontiers Inf. Technol. Electronic Eng. 2017. Vol. 18. P. 1654–1664. DOI: https://doi.org/10.1631/FITEE.1601730

19. ***Cherkasov K.V., Meshkov S.A., Makeev M.O.*** Application of computer statistical experiment for studying resonant-tunneling diode parameter reproducibility under batch production conditions // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi: IEEE, 2018. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501823

20. Analysis of the eight parameter variation of the resonant tunneling diode (RTD) in the rapid thermal annealing process with resistance compensation effect / ***F. Zhao, Y. Wang, W. Guo et al.*** // AIP Advances. 2020. Vol. 10. Iss. 3. Art. ID: 035103. DOI: https://doi.org/10.1063/1.5133899

21. Resonant-tunnelling diodes as PUF building blocks / ***I.E. Bagci, Th. McGrath, Ch. Barthelmes et al.*** // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing. 2021. Vol. 9. Iss. 2. P. 878–885. DOI: https://doi.org/10.1109/TETC.2019.2893040

22. Time-domain analysis of large-signal-based nonlinear models for a resonant tunneling diode with an integrated antenna / ***K. Asakawa, Y. Itagaki, H. Shin-Ya et al.*** // IEICE Transactions on Electronics. 2012. Vol. E95.C. Iss. 8. P. 1376–1384. DOI: https://doi.org/10.1587/transele.E95.C.1376

23. Accurate small-signal equivalent circuit modeling of resonant tunneling diodes to 110 GHz / ***R. Morariu, J. Wang, A.C. Cornescu et al.*** // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67. No. 11. P. 4332–4340. DOI: https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2939321

24. EM simulation assisted parameter extraction for transferred-substrate InP HBT modeling / ***T. Johansen, R. Doerner, N. Weimann et al.*** // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2018. Vol. 10. Sp. iss. 5-6. P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1017/S1759078718000636

25. ***Бондарев А.В., Ефанов В.Н.*** Принципы формирования математической модели наноэлектронных компонентов квантовых вычислительных комплексов с мемрезистивными ветвями // Системы управления и информационные технологии. 2020. № 1 (79). С. 4–10.

26. ***Bondarev A.V., Efanov V.N.*** Dynamic mode of the mathematical model of an electric multipole with memresistive branches in conditions of interval uncertainty // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 976 (1). Art. ID: 012013. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/976/1/012013

27. ***Alefeld G., Mayer G.*** Interval analysis: theory and applications // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2000. Vol. 121. P. 421–464. DOI: https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00342-3

28. ***Kaucher E.*** Interval analysis in the extended interval space IR // Fundamentals of Numerical Computation (Computer-Oriented Numerical Analysis) / eds. G. Alefeld, R.D. Grigorieff. Wien: Springer, 1980. P. 33–49. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8577-3_3

Поступила в редакцию 11.05.2021 г.; после доработки 09.07.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

Бондарев Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии призводства летательных аппаратов Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12), bondarevav@rambler.ru

Ефанов Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры электроники и биомедицинских технологий Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12), efanov@mail.ru

References

1. Yamakura H., Suhara M. Proposal of bow-tie antenna-integrated resonant tunneling diode transmitter utilizing relaxation oscillations and its application to short-distance wireless communications. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2018, vol. 39, pp. 1087–1111. DOI: https://doi.org/10.1007/s10762-018-0518-y

2. Fukuoka M., Asakawa K., Suhara M. Analysis of phase mode variation due to bias voltage in arrayed oscillators using resonant tunneling diodes integrated with bow-tie antennas. *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama).* Toyama, IEEE, 2018, pp. 2461–2466. DOI: https://doi.org/10.23919/PIERS.2018.8597876

3. Lee J., Choi S., Lee J., Yang K. 40 Gb/s low-power 4:1 multiplexer based on resonant tunneling diodes. *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 2012, vol. 11, no. 5, pp. 890–895. DOI: https://doi.org/10.1109/TNANO.2012.2204768

4. Hu X., Feng G., Duan S., Liu L. Multilayer RTD-memristor-based cellular neural networks for color image processing. *Neurocomputing*, 2015, vol. 162, pp. 150–162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.03.057

5. Hillger P., Van Delden M., Thanthrige U.S.M., Ahmed A.M., Wittemeier J., Arzi Kh., Andree M., Sievert B., Prost W., Rennings A. et al. Toward mobile integrated electronic systems at THz frequencies. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2020, vol. 41, no. 7, pp. 846–869. DOI: https://doi.org/10.1007/s10762-020-00699-x

6. Lee J., Choi S., Kim S.-Y., Lee J., Yang K. Area-efficient series-connected resonant tunneling diode pair as binary neuron in cellular neural network. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, vol. 41, iss. 9, pp. 1308–1311. DOI: https://doi.org/10.1109/LED.2020.3008164

7. Lee K., Jeong Y. Temperature-dependent characteristics of a RTD-based microwave push-push oscillator. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2018, vol. 60, pp. 803–805. DOI: https://doi.org/10.1002/mop.31060

8. Zhang J., Cao L., Liu M., Liu B., Cheng L. Gamma-induced degradation effect of InP HBTs studied by Keysight model. *Nuclear Science and Engineering*, 2021, vol. 195, iss. 2, pp. 173–184. DOI: https://doi.org/10.1080/00295639.2020.1798679

9. Tkalich V.L., Makeeva A.V., Oborina E.E. *Physical foundations of nanoelectronics*, study guide. St. Petersburg, ITMO University, 2011. 83 p. (In Russian).

10. Zhang W.-D., Growden T.A., Storm D.F., Meyer D.J., Berger P.R., Brown E.R. Investigation of switching time in GaN/AlN resonant tunneling diodes by experiments and P-SPICE models. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, vol. 67, no. 1, pp. 75–79. DOI: https://doi.org/10.1109/TED.2019.2955360

11. Shin-Ya H., Suhara M., Asaoka N., Naoi M. Implementation of physics-based model for current-voltage characteristics in resonant tunneling diodes by using the Voigt function. *IEICE Transactions on Electronics*, 2010, vol. E93.C, iss. 8, pp. 1295–1301. DOI: https://doi.org/10.1587/transele.E93.C.1295

12. Dal Bosco A.K., Suzuki S., Asada M., Minamide H. Feedback effects and nonlinear dynamics in resonant tunneling diodes. *2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz).* Nagoya, IEEE, 2018, pp. 1–2. DOI: https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2018.8510286

13. Al-Khalidi A., Alharbi Kh.H., Wang J., Morariu R., Wang L., Khalid A., Figueiredo J.M.L., Wasige E. Resonant tunneling diode terahertz sources with up to 1 mW output power in the J-band. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 150–157. DOI: https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2959210

14. Muttlak S.G., Abdulwahid O.S., Sexton J., Kelly M.J., Missous M. InGaAs/AlAs resonant tunneling diodes for THz applications: an experimental investigation. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2018, vol. 6, pp. 254–262. DOI: https://doi.org/10.1109/JEDS.2018.2797951

15. Quintana J.M., Avedillo M.J., Nunez J., Pettenghi Roldan H. Operation limits for RTD-based MOBILE circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2009, vol. 56, no. 2, pp. 350–363. DOI: https://doi.org/10.1109/TCSI.2008.925943

16. Maezawa K., Sugiyama H., Kishimoto S., Mizutani T. 100 GHz operation of a resonant tunneling logic gate MOBILE having a symmetric configuration. *2006 Int. Conf. Indium Phosphide and Related Materials.* Princeton, NJ, IEEE, 2006, pp. 46–49. DOI: https://doi.org/10.1109/ICIPRM.2006.1634108

17. Nikodem M. Synthesis of multithreshold threshold gates based on negative differential resistance devices. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2013, vol. 7, iss. 5, p. 232–242. DOI: https://doi.org/10.1049/iet-cds.2012.0368

18. Yao Mq., Yang K., Shen Jz., Xu C. Function synthesis algorithm based on RTD-based three-variable universal logic gates. *Frontiers Inf. Technol. Electronic Eng.*, 2017, vol. 18, pp. 1654–1664. DOI: https://doi.org/10.1631/FITEE.1601730

19. Cherkasov K.V., Meshkov S.A., Makeev M.O. Application of computer statistical experiment for studying resonant-tunneling diode parameter reproducibility under batch production conditions. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon).* Sochi, IEEE, 2018, pp. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501823

20. Zhao F., Wang Y., Guo W., Cong J., Tee C.A.T.H., Song L., Zheng Y. Analysis of the eight parameter variation of the resonant tunneling diode (RTD) in the rapid thermal annealing process with resistance compensation effect. *AIP Advances*, 2020, vol. 10, iss. 3, art. ID: 035103. DOI: https://doi.org/10.1063/1.5133899

21. Bagci I.E., McGrath Th., Barthelmes Ch., Dean S., Gavito R.B., Young R.J., Roedig U. Resonant-tunnelling diodes as PUF building blocks. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2021, vol. 9, iss. 2, pp. 878–885. DOI: https://doi.org/10.1109/TETC.2019.2893040

22. Asakawa K., Itagaki Y., Shin-Ya H., Saito M., Suhara M. Time-domain analysis of large-signal-based nonlinear models for a resonant tunneling diode with an integrated antenna. *IEICE Transactions on Electronics*, 2012, vol. E95.C, iss. 8, pp. 1376–1384. DOI: https://doi.org/10.1587/transele.E95.C.1376

23. Morariu R., Wang J., Cornescu A.C., Al-Khalidi A., Ofiare A., Figueiredo J.M.L., Wasige E. Accurate small-signal equivalent circuit modeling of resonant tunneling diodes to 110 GHz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, vol. 67, no. 11, pp. 4332–4340. DOI: https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2939321

24. Johansen T., Doerner R., Weimann N., Hossain M., Krozer V., Heinrich W. EM simulation assisted parameter extraction for transferred-substrate InP HBT modeling. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2018, vol. 10, sp. iss. 5-6, pp. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1017/S1759078718000636

25. Bondarev A.V., Efanov V.N. Principles of formation of mathematical model of nano-electronic components of quantum computer complexes with memoresistive branches. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii = Automation and Remote Control*, 2020, no. 1 (79), pp. 4–10. (In Russian).

26. Bondarev A.V., Efanov V.N. Dynamic mode of the mathematical model of an electric multipole with memresistive branches in conditions of interval uncertainty. *2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 976 (1), art. ID: 012013. DOI:10.1088/1757-899X/976/1/012013.

27. Alefeld G., Mayer G. Interval analysis: theory and applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2000, vol. 121, pp. 421–464. DOI: https://doi.org/10.1016/S0377-0427(00)00342-3

28. Kaucher E. Interval analysis in the extended interval space IR. *Fundamentals of Numerical Computation (Computer-Oriented Numerical Analysis)*, eds. G. Alefeld, R.D. Grigorieff. Wien, Springer, 1980, pp. 33–49. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8577-3_3

Received 11.05.2021; Revised 09.07.2021; Accepted 11.10.2021.

Andrey V. Bondarev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Aircraft Manufacturing Technology Department, Ufa State Aviation Technical University (Russia, 450008, Ufa, K. Marx st., 12), bondarevav@rambler.ru

Vladimir N. Efanov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electronics and Biomedical Technologies Department, Ufa State Aviation Technical University (Russia, 450008, Ufa, K. Marx st., 12), efanov@mail.ru

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 658.512:004.42:510.2/.6:519.1 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-508-520**

Автоматическая настройка программных средств размещения пользовательских схем на ПЛИС

В.И. Эннс[1], С.В. Гаврилов[2], Р.Ж. Чочаев[2]

[1]НИИ молекулярной электроники, г. Москва, Россия
[2]Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Москва, Россия

venns@niime.ru

Специализация конфигурируемых гетерогенных ИС под конкретные предложения заказчика требует сменяемости конструкторских и технологических решений. Это, в свою очередь, приводит к необходимости автоматической настройки САПР, в том числе и программных средств размещения, на внесенные изменения. Разработка эффективных методов и алгоритмов настройки невозможна без опоры на соответствующий математический аппарат. В работе представлена теоретико-множественная математическая модель иерархического проекта, формализован иерархический подход к списку соединений с применением аппарата теории множеств, математической логики и теории графов. Для обеспечения оперативной настройки программных средств кластеризации и размещения с учетом внесенных в базовый кристалл изменений формализованы соответствия между элементами базового проекта ПЛИС и пользовательскими проектируемыми схемами от конечного заказчика. Полученные результаты могут служить основой для разрабатываемых эффективных методов и алгоритмов автоматической настройки программных средств кластеризации и размещения.

Ключевые слова: размещение элементов; автоматизация проектирования; ПЛИС; теоретико-множественная модель

Для цитирования: Эннс В.И., Гаврилов С.В., Чочаев Р.Ж. Автоматическая настройка программных средств размещения пользовательских схем на ПЛИС // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 508–520. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-508-520

© В.И. Эннс, С.В. Гаврилов, Р.Ж. Чочаев, 2021

Automatic FPGA Placement Configuration for Customer Designs

V.I. Enns[1], S.V. Gavrilov[2], R.Zh. Chochaev[2]

[1]Molecular Electronics Research Institute, Moscow, Russia
[2]Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

venns@niime.ru

Abstract: Searching for new ways to improve the efficiency of integrated circuits (IC) led to the development of specialized heterogeneous configurable IC (FPGA) and systems-on-a-chip. Their key feature is an extended interpretation of standard cell library, containing ready-to-use IP cores along with standard cells. Specific customer designs require the flexibility of the configurable heterogeneous IC's architecture and, therefore, automatic CAD clustering and placement algorithms configuration. The development of efficient configuration methods and algorithms is impossible without relying on the mathematical apparatus. In this work, such mathematical apparatus is provided. The authors described a set-theoretic model of a hierarchical project and formalized the hierarchical approach to the netlist, using the apparatus of mathematical logic, set and graph theories. The correspondence between the customers designs' elements and FPGA's elements has been formalized to provide fast clustering and placement configuration. The obtained results provide the basis for future efficient methods for automatic placement and clustering configuration.

Keywords: placement; computer-aided design; field-programmable gate array; FPGA; set-theoretic model

For citation: Enns V.I., Gavrilov S.V., Chochaev R.Zh. Automatic FPGA placement configuration for customer designs. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 508–520. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-508-520

Введение. Современную ситуацию на рынке ПЛИС можно охарактеризовать доминированием двух крупных компаний: Intel и Xilinx. Именно эти компании являются инноваторами в сфере разработки ПЛИС благодаря накопленному за десятилетия опыту и финансированию новых исследований и разработок. Так, в последние годы компания Xilinx тратит не менее 600 млн долл. на НИОКР [1] ежегодно. В таких неравных условиях прямая конкуренция с технологическими гигантами невозможна. Поэтому оптимальной стратегией развития отечественных реконфигурируемых ИС и систем на кристалле (СнК) видится разработка эффективных программируемых гетерогенных схем, ориентированных на целевого потребителя и предоставляющих доступ к большому количеству готовых сложнофункциональных (СФ) блоков [2].

Разработка специализированных гетерогенных ИС и СнК, согласно пожеланиям заказчиков, требует не только быстрой сменяемости архитектурных решений, но и соответствующей оперативной настройки САПР. В настоящей статье разрабатывается математический аппарат для реализации эффективных методов и алгоритмов автоматической настройки программных средств размещения. Рассматривается иерархический подход к

списку соединений и формализация соответствия между элементами базового проекта ПЛИС и пользовательскими проектируемыми схемами от конечного заказчика.

Основные понятия и обозначения. Иерархическое описание базового проекта ПЛИС представляет собой упорядоченную тройку:

$$\Pi = \langle \mathrm{S}, L, s_m \rangle,$$

где $S = \{s_i, i = 1,\ldots,|S|\}$ – множество схем в иерархическом описании проекта; $L \subset S$ – подмножество базисных библиотечных подсхем для текущего уровня (или этапа) проектирования (базис); $s_m \in S, s_m \notin L$ – схема верхнего уровня.

Схема $s \in S$ – это упорядоченная пятерка:

$$s = \langle \mu(s),\ E(s), N(s), P(s), C(s) \rangle,$$

где μ(*s*) – уникальный идентификатор схемы; $E(s) = \{e_i,\ i = 1,\ldots,|E(s)|\}$ – множество элементов в схеме *s*; $N(s) = \{n_i,\ i = 1,\ldots,|N(s)|\}$ – множество цепей в схеме *s*; $P(s) = \{p_i,\ i = 1,\ldots,|P(s)|\}$ – множество внешних контактов схемы *s*; $C(s) = \{\mathrm{c}_i,\ i = 1,\ldots,|C(s)|\}$ – множество соединений схемы *s*.

Каждый элемент $e \in E(s)$ может быть представлен как

$$e = \langle \mu(e),\ m(e), P(e) \rangle\ ,$$

где μ(*e*) – уникальный идентификатор элемента; *m*(*e*)∈*S* – модель элемента, которая представляется схемой нижележащего уровня иерархии; $P(e) = \{p_i,\ i = 1,\ldots,|P(e)|\}$ – множество контактов элемента, такое, что $P(e) \leftrightarrow P(m(e))$; $|P(e)| = |P(m(e))|$.

Любой внешний контакт схемы $p \in P(s)$ можно охарактеризовать следующим образом:

$$p = \langle \mu(p), \tau(p) \rangle\ ,$$

где $\mu(p)$ – уникальное имя контакта; $\tau(p) \in \{\tau_{inp}, \tau_{out}, \tau_{bi}\}$ – тип контакта: вход, выход или двунаправленный.

Множество соединений в схеме – это подмножество пар:

$$C(s) = \left\{ (p,n):\ p \in \left(\bigcup_{i=1,\ldots,|E(s)|} P(e_i) \cup P(s) \right),\ n \in N(s) \right\}.$$

Каждую цепь $n \in N(s)$ можно охарактеризовать уникальным идентификатором и связанным с ней набором соединений:

$$n = \langle \mu(n), C(n) \rangle.$$

На текущем уровне (этапе) проектирования библиотечные подсхемы являются «черными ящиками» и не содержат внутренних данных:

$$\forall s \in L:\ E(s)=\varnothing,\ N(s)=\varnothing,\ C(s)=\varnothing.$$

При этом библиотеку базового проекта L можно представить как совокупность подмножеств:

$$L = L_{LE} \cup L_{IO} \cup L_{M} \cup L_{Ro} \cup L_{BB},$$

где L_{LE} – подмножество логических элементов (ЛЭ); L_{IO} – подмножество элементов ввода-вывода; L_{M} – подмножество СФ-блоков; L_{Ro} – подмножество трассировочных элементов; L_{BB} – подмножество иных вспомогательных элементов, которые выполняют второстепенные функции.

Следует отметить, что для гетерогенных схем ключевой особенностью является то, что в базис L на определенных этапах проектирования помимо стандартных элементов могут входить различные СФ-блоки.

Параметры базового кристалла ПЛИС. Базовый кристалл ПЛИС $\Pi = \langle S, L, s_m \rangle$ на этапе размещения может иметь два представления:

1) плоское (одноуровневое) – $\Pi_f(\Pi) = \langle S_f, L_f, s_f \rangle$, где область размещения представляет собой двухмерную матрицу конфигурируемых ЛЭ, состоящих из K-входовой ячейки асинхронной памяти (Look up Table, LUT) и регистра [3];

2) двухуровневое блочное – $\Pi_b(\Pi) = \langle S_b, L_b, s_b \rangle$, где область размещения на верхнем уровне представляет собой двухмерную матрицу блоков [4, 5], каждый из которых, в свою очередь, представляет собой матрицу из ЛЭ.

Двухуровневое блочное представление проекта $\Pi_b(\Pi)$ наиболее точно отражает архитектуру базовых кристаллов реконфигурируемых гетерогенных схем «островного» типа [6]. В подобном базовом кристалле выделяется уровень «блоков» («островов»), которые не входят в множество L: $B = \{b_i\}:\ B \cap L = \varnothing$, $|B| = 1$.

Итоговое блочное представление проекта $\Pi_b(\Pi) = \langle S_b, L_b, s_b \rangle$ имеет следующий вид:

$$L_b = \{ s : (s \in L) \wedge \varphi(s, s_m) \},$$
$$S_b = \{ s_b \cup L_b \cup B \},\ L_b \cap B = \varnothing,$$
$$s_b = \langle \mu(s_b), E(s_b), N(s_b), P(s_b), C(s_b) \rangle,$$

где $\mu(s_b) = \mu(s_m)$; $P(s_b) = P(s_m)$; $\varphi(s, s_m) = 1$, если $(s = s_m)$ или $\exists e \in E(s_m) : \varphi(s, m(e)) = 1$.

Размещение блочных элементов $E_B(s_b) \subset E(s_b)$, $E_B(s_b) = \{ e :\ e \in E(s_b)\ \&\, m(e) \in B \}$ на верхнем уровне представляет собой двухмерную матрицу блоков:

$$M_b = \{ m_{ij} :\ m_{ij} \in E_B(s_b),\ m(m_{ij}) \in B,\ i = 1, \ldots, I_b,\ j = 1, \ldots, J_b \},$$
$$|M_b| = |E_B(s_b)| = I_b J_b.$$

В свою очередь, каждый блок $b \in B$ в двухуровневом представлении включает в себя элементы нижележащего уровня иерархии:

$$b = \langle \mu(b),\ E(b), N(b), P(b), C(b) \rangle,$$

где $E(b) = \{e:\ m(e),\ m(e) \in L_{LE} \cup L_{Ro} \cup L_{BB}\}$.

Подмножество ЛЭ блока $E_{LE}(b) \subset E(b)$, $E_{LE}(b) = \{e:\ e \in E(b)\ \&m(e) \in L_{LE}\}$ представляет собой матрицу ЛЭ:

$$M_{LE} = \{m_{ij}:\ m_{ij} \in E_{LE}(b),\ m(m_{ij}) \in L_{LE},\ i = 1,\ldots,I_{LE},\ j = 1,\ldots,J_{LE}\},$$
$$|M_{LE}| = |E_{LE}(b)| = I_{LE} J_{LE}.$$

В таком случае общее количество логических элементов в базовом проекте зависит от размеров матриц M_b и M_{LE}:

$$I_f = I_b I_{LE},$$
$$J_f = J_b J_{LE},$$
$$|E_{LE}(s_f)| = |M_f| = I_f J_f = |E_B(s_b)| \cdot |E_{LE}(b)| = I_b J_b I_{LE} J_{LE}.$$

Следует отметить, что на верхнем уровне иерархии ЛЭ отсутствуют:

$$\forall e \in E(s_b) \cup E(b): m(e) \in L_{LE} \to e \in E(b).$$

Важными параметрами базового проекта также являются параметры коммутационных и трассировочных ресурсов. Анализ данных параметров требует классификации и типизации контактов блоков в двухуровневом представлении. Множество всех контактов можно разбить на три большие группы:

$$P(s) = \{p_i,\ i = 1,\ldots,|P(s)|\},\ s \in L_{LE} \cup L_{IO} \cup L_M \cup L_B \cup L_{Ro},$$
$$P(s) = P_r(s) \cup P_m(s) \cup P_s(s),$$
$$\forall p \in P(s): \tau(p) \in \{\tau_{inp}, \tau_{out}, \tau_{bi}\},$$

где $P_r(s)$ – подмножество сигнальных (трассировочных) контактов для подключения внешних сигнальных цепей посредством трассировочных ресурсов $s \in L_{Ro}$; $P_m(s)$ – подмножество программируемых контактов; $P_s(s)$ – подмножество специальных контактов; $\{\tau_{inp}, \tau_{out}, \tau_{bi}\}$ – типы контактов по направлению распространения сигналов: вход, выход, двунаправленный контакт.

Тогда коммутационные возможности блока на верхнем уровне иерархии можно характеризовать количеством сигнальных контактов $P_r(b)$ блока b или, согласно терминологии теории графов [7], локальной степенью блока:

$$d(b) = |P_r(b)|,$$

количество выходов блока – исходящей локальной степенью блока *b*:

$$d^{-}(b)=\left|P_r^{-}(b)\right|,$$
$$P_r^{-}(b)=\left\{p_i^{-}\in P_r(b):\tau\left(p_i^{-}\right)=\tau_{out}\right\},$$

а количество входов – входящей локальной степенью блока *b*:

$$d^{+}(b)=\left|P_r^{+}(b)\right|,$$
$$P_r^{+}(b)=\left\{p_i^{+}\in P_r(b):\tau\left(p_i^{+}\right)=\tau_{in}\right\}.$$

Двунаправленные контакты могут использоваться по-разному, в том числе для сквозных трасс:

$$d^{*}(b)=\left|P_r^{*}(b)\right|,$$
$$P_r^{*}(b)=\left\{p_i^{*}\in P_r(b):\tau\left(p_i^{*}\right)=\tau_{bi}\right\}.$$

Общее количество входов всех ЛЭ в блоке в значительной степени определяет необходимое количество локальных трасс $|N_{loc}(b)|$, где $N_{loc}(b)\subset N(b)$ – подмножество цепей в блоке *b*, которые обеспечивают внутренние коммутации между входами и выходами ЛЭ в блоке, а также могут быть использованы для последующей связи с внешними цепями за пределами блока. Соответственно, необходимое количество локальных трасс можно вычислить следующим образом:

$$N_{loc}(b)\approx P_r^{+}(s)\cdot\left|E_{LE}(b)\right|=P_r^{+}(s)\cdot|\ M_{LE}\ |=P_r^{+}(s)I_{LE}J_{LE}.$$

Реальное количество $|N_{loc}(b)|$ может быть меньше, так как:

– некоторые входы ЛЭ могут использовать общие входные сигналы или быть замкнуты на цепи земли / питания;

– некоторые ЛЭ могут не использоваться в конкретных блоках.

Поэтому в предыдущую формулу следует добавить понижающий коэффициент $\mathrm{K}_{loc}\in(0,1]$, подбираемый экспериментально:

$$\left|N_{loc}(b)\right|=\mathrm{K}_{loc}P_r^{+}(s)\cdot\left|E_{LE}(b)\right|=\mathrm{K}_{loc}P_r^{+}(s)I_{LE}J_{LE}.$$

Количество коммутаций ЛЭ на нижнем уровне можно вычислить на основе информации о трассировочных контактах следующим образом. Для подсхемы $s\in L_{LE}$ степень элемента *s*, т.е. количество цепей, подключенных к контактам *s*:

$$d(s)=\left|P_r(s)\right|.$$

Исходящая степень *s*:

$$d^{-}(s)=\left|P_r^{-}(s)\right|,$$
$$P_r^{-}(s)=\left\{p_i^{-}\in P_r(s):\tau\left(p_i^{-}\right)=\tau_{out}\right\},$$

входящая степень s:

$$d^{+}(s)=\left|P_r^{+}(s)\right|,$$
$$P_r^{+}(s)=\left\{p_i^{+}\in P_r(s):\tau\left(p_i^{+}\right)=\tau_{inp}\right\}.$$

Если архитектура ПЛИС имеет канальную структуру с выделенными областями каналов и блоков коммутаций (switch box) [8, 9], то к важнейшим характеристикам ПЛИС относятся пропускная способность вертикальных / горизонтальных каналов и пропускная способность блоков коммутаций. Однако архитектура базового кристалла ПЛИС может сильно отличаться от классической канальной. В таком случае каналы и блоки коммутации отсутствуют, поэтому главными характеристиками являются пропускные способности вертикальных и горизонтальных сечений, т.е. количество цепей, пересекающих данное сечение. В случае двухуровневого блочного представления $\Pi_b(\Pi)=\langle S_b, L_b, s_b\rangle$ пропускную способность соответствующих сечений можно вычислить по формулам:

$$\sigma_X(X_S^k)=\left|\{n:n\in N(s_b)\ \&X_{\min}(n)<X_S^k\ \&X_{\max}(n)\geq X_S^k\}\right|,$$
$$\sigma_Y(Y_S^k)=\left|\{n:n\in N(s_b)\ \&Y_{\min}(n)<Y_S^k\ \&Y_{\max}(n)\geq Y_S^k\}\right|,$$

где X_S^k, Y_S^k – координаты вертикальных / горизонтальных сечений; $X_{\min}(n), Y_{\min}(n)$, $X_{\max}(n), Y_{\max}(n)$ – координаты цепей $n\in N(s_b)$.

Таким образом, ключевыми параметрами базового кристалла, влияющими на полноту и эффективность реализации пользовательских схем в ПЛИС, являются:

– количество блоков $|E_B(s_b)|$, т.е. количество блочных элементов по вертикали I_b и горизонтали J_{LE};

– размеры блока $|E_{LE}(b)|$, т.е. размер блочной матрицы по вертикали I_{LE} и горизонтали J_{LE};

– количество внешних выводов блока $d(b)$, в том числе количество входящих трасс $d^{+}(b)$ (входов блока);

– количество исходящих трасс $d^{-}(b)$ (выходов блока), количество сквозных трасс $d^{*}(b)$, т.е. двунаправленных выходов блока, соединенных внутри блока;

– количество локальных трасс внутри блока $|N_{loc}(b)|$;

– количество коммутаций ЛЭ $d(s)$, в том числе количество коммутаций для входов ЛЭ $d^{+}(s)$ и выходов ЛЭ $d^{-}(s)$;

– количество связей между блоками и их структура;

– пропускная способность блоков коммутаций между каналами.

Формализация задачи размещения пользовательских схем на ПЛИС. В стандартном маршруте проектирования на ПЛИС [6] после этапа логического синтеза и технологического отображения в базис библиотечных элементов следует один из важнейших этапов – размещение элементов пользовательских схем.

Пусть задана пользовательская проектируемая схема в «плоском» виде, которую требуется запрограммировать в ПЛИС:

$$\Pi_u = \langle S_u,\ L_u,\ s_{mu} \rangle,$$

где $s_{mu} = \langle \mu(s_{mu}),\ E(s_{mu}), N(s_{mu}), P(s_{mu}), C(s_{mu}) \rangle$.

Задача размещения элементов пользовательской схемы [10] по своей сути является задачей установления соответствия $\wp$ между множеством элементов библиотечного уровня пользовательского проекта с элементами библиотечного уровня проекта самой ПЛИС:

$$\wp:\ E(s_{mu}) \to \{e:\ e \in E(s_f),\ m(e) \in \{L_{LE} \cup L_M \cup L_{IO}\}\}\ .$$

Пусть $E_{LE}(s_{mu}), E_M(s_{mu}),\ E_{IO}(s_{mu})$ – непересекающиеся подмножества множества элементов пользовательского проекта соответствующего типа:

$$E(s_{mu}) = E_{LE}(s_{mu}) \cup E_M(s_{mu}) \cup E_{IO}(s_{mu}),$$
$$\forall e \in E_{LE} : m(\wp(e)) \in L_{LE}\ ,$$
$$\forall e \in E_M : m(\wp(e)) \in L_M\ ,$$
$$\forall e \in E_{IO} : m(\wp(e)) \in L_{IO}.$$

Тогда для каждого элемента $e \in E(s_{mu})$ к моменту решения задачи размещения известен как конкретный тип библиотечного элемента $T \in \{LE, IO, M\}$, так и конкретный экземпляр $m(e) \in \{L_{LE} \cup L_M \cup L_{IO}\}$, а также конкретный экземпляр библиотеки пользовательского проекта $s_u \in L_u$, $s_u = \langle \mu(s_u), \varnothing, \varnothing, P(s_u), \varnothing \rangle$.

Количество ЛЭ в пользовательских схемах значительно превышает количество элементов других типов, поэтому их размещение представляет собой наиболее сложную задачу. В случае если базовый кристалл имеет иерархическую двухуровневую структуру, целесообразно сначала выполнить декомпозицию (или кластеризацию) пользовательских схем, а затем выполнить размещение в два этапа: 1) размещение кластеров на верхнем уровне; 2) размещение ЛЭ в пределах блоков [11].

При решении задачи декомпозиции (кластеризации) определяется разбиение элементов пользовательской схемы на кластеры [12], где каждому кластеру соответствует блок ЛЭ базовой ПЛИС. Множество кластеров $K = \{K_i\}$ представляет собой множество непересекающихся подмножеств элементов $e \in E_{LE}(s_{mu})$:

$$\forall i \in \{0,1,\ldots,|K|\} : K_i \subset E_{LE}(s_{mu}),$$
$$E_{LE}(s_{mu}) = K_1 \cup K_2 \cup K_3 \ldots \cup K_{|K|},$$
$$\forall i, j \in \{0,1,\ldots,|K|\}, i \neq j : K_i \cap K_j = \varnothing.$$

Для получения легальной кластеризации необходимо, чтобы алгоритм учитывал следующие ограничения:

1) на общее количество ЛЭ пользовательской схемы:

$$|E_{LE}(s_{mu})| \le |E_{LE}(s_f)|,$$

$$\left|E_{LE}\left(s_f\right)\right|=\left|M_f\right|=I_f J_f=\left|E_B\left(s_b\right)\right|\cdot\left|E_{LE}\left(b\right)\right|=I_b J_b I_{LE} J_{LE};$$

2) на размер кластера:

$$\left|K_i\right|\le\left|E_{LE}\left(b\right)\right|,$$
$$\left|E_{LE}\left(b\right)\right|=\left|M_{LE}\right|=I_{LE} J_{LE};$$

3) на количество кластеров:

$$\left|K\right|\le\left|E_B\left(s_b\right)\right|,$$
$$E_B\left(s_b\right)=\left\{e\in E\left(s_b\right):\ m\left(e\right)\in B\right\},$$
$$\left|E_B\left(s_b\right)\right|=\left|M_b\right|=I_b J_b.$$

В результате алгоритм кластеризации должен автоматически вычислять допустимые размеры кластера и их количество в зависимости от ограничений базового кристалла. Нарушение ограничения 1 можно проверить сразу после этапа логического синтеза и технологического отображения. Ограничение 2 или 3 можно исключить перед кластеризацией. Например, можно автоматически задать количество требуемых кластеров $\left|K\right|=\left|E_B\left(s_b\right)\right|$, тогда средний размер кластера вычисляется по следующей формуле и удовлетворяет ограничению на размер кластера:

$$\left|K_{average}\right|=\left\lceil\frac{\left|E_{LE}\left(s_{mu}\right)\right|}{\left|K\right|}\right\rceil=\left\lceil\frac{\left|E_{LE}\left(s_{mu}\right)\right|}{\left|E_B\left(s_b\right)\right|}\right\rceil=\left\lceil\frac{\left|E_{LE}\left(s_{mu}\right)\right|}{I_b\ J_b}\right\rceil\le\left|E_{LE}\left(b\right)\right|.$$

Если приоритетной задачей является максимальное заполнение площади ПЛИС, то максимальный размер кластера задается как $\left|K_{\max}\right|=\left|E_{LE}\left(b\right)\right|$, а количество требуемых кластеров вычисляется по следующей формуле:

$$\left|K\right|=\left\lceil\frac{\left|E_{LE}\left(s_{mu}\right)\right|}{\left|K_{\max}\right|}\right\rceil=\left\lceil\frac{\left|E_{LE}\left(s_{mu}\right)\right|}{\left|E_{LE}\left(b\right)\right|}\right\rceil=\left\lceil\frac{\left|E_{LE}\left(s_{mu}\right)\right|}{I_{LE} J_{LE}}\right\rceil\le\left|E_B\left(s_b\right)\right|.$$

Помимо ограничений на количество и размер кластера для успешной реализации пользовательского проекта следует учитывать ограничение на количество цепей, связанных с элементами кластера. Среди существующих в пользовательской схеме цепей $N\left(s_{mu}\right)$ можно выделить три группы:

– наружные (внешние) – цепи, которые никак не связаны с элементами в данном кластере K_i:

$$N_{ext}\left(K_i\right)\subset N\left(s_{mu}\right),$$
$$\forall n\in N_{ext}\left(K_i\right);\forall\left(P\left(e\right),n\right)\in C\left(s_{mu}\right):e\notin K_i;$$

– внутренние – цепи, которые связаны только с элементами в данном кластере K_i:

$$N_{int}\left(K_i\right)\subset N\left(s_{mu}\right),$$
$$\forall n\in N_{int}\left(K_i\right);\forall\left(p,n\right)\in C\left(s_{mu}\right):p\in P\left(e\right),e\in K_i;$$

– смежные – цепи, которые связаны с элементами как внутри, так и вне кластера K_i:

$$N_{adj}(K_i) \subset N(s_{mu}),$$
$$\forall n \in N_{adj}(k_i): \exists(p_1, n) \in C(s_{mu}), \exists(p_2, n) \in C(s_{mu}),$$
$$p_1 \in P(e_1) \wedge e_1 \in K_i, p_2 \in P(s_{mu}) \vee p_2 \in P(e_2) \wedge e_2 \notin K_i.$$

В таком случае количество внешних выводов кластера K_i (или его степень) равно:

$$d(K_i) = \left|N_{adj}(K_i)\right|.$$

Аналогично количество выходов (или исходящая степень кластера) равно:

$$d^-(K_i) = \left|N^-(K_i)\right|,\ N^-(K_i) \subset N_{adj}(K_i),$$
$$\forall n \in N^-(K_i) \exists(p, n) \in C(s_{mu}): p \in P(e) \wedge e \in K_i \wedge \tau(p) = \tau_{out}.$$

Количество входов (или входящую степень) кластера можно вычислить следующим образом:

$$d^+(K_i) = \left|N^+(K_i)\right|,\ N^+(K_i) \subset N_{adj}(K_i),$$
$$\forall n \in N^+(K_i) \exists(p, n) \in C(s_{mu}):$$
$$p \in P(s_{mu}) \wedge \tau(p) = \tau_{inp} \vee p \in P(e) \wedge e \notin K_i \wedge \tau(p) = \tau_{out}.$$

Итак, можно выделить дополнительное ограничение на этапе кластеризации для смежных цепей: количество входов-выходов кластера пользовательской схемы должно соответствовать количеству входов-выходов блока базового кристалла:

$$d^+(K_i) \le d^+(b) + d^*(b) = \left|P_r^+(b)\right| + \left|P_r^*(b)\right|,$$
$$d^-(K_i) \le d^-(b) + d^*(b) = \left|P_r^-(b)\right| + \left|P_r^*(b)\right|.$$

Если данное ограничение не выполняется, то вне зависимости от эффективности используемых алгоритмов размещения успешно запрограммировать пользовательскую схему в кристалле не получится. Количество внутренних цепей кластера ограничено количеством локальных трасс внутри блока. При этом локальные трассы внутри блока не только обеспечивают внутренние коммутации между входами и выходами ЛЭ, но и могут быть использованы для последующей связи с внешними цепями за пределами блока. Поэтому их количество в значительной степени связано с количеством ЛЭ в блоке и количеством входов в ЛЭ:

$$\left|N_{loc}(b)\right| \approx P_r^+(s) \cdot \left|E_{LE}(b)\right| = P_r^+(s) \cdot \left|M_{LE}\right| = P_r^+(s) I_{LE} J_{LE},$$
$$\left|N_{loc}(b)\right| = K_{loc} P_r^+(s) \cdot \left|E_{LE}(b)\right| = K_{loc} P_r^+(s) I_{LE} J_{LE},\ K_{loc} \le 1,$$

где K_{loc} – коэффициент, отражающий тот факт, что часть локальных трасс может остаться неиспользованной.

С учетом специфики подключения входов и выходов ЛЭ в блоке получаем следующее ограничение на количество внутренних цепей кластера N_{int}:

$$N_{int}\left(K_i\right)+d^{+}\left(K_i\right)\le\left|N_{loc}\left(b\right)\right|.$$

Таким образом, для успешной реализации пользовательских проектов на этапе кластеризации необходимо учитывать ограничения на количество внутренних и смежных цепей.

После успешного формирования кластеров ЛЭ выполняется непосредственное размещение их на блочном уровне, которое сводится к выбору соответствующего элемента матрицы блоков для каждого из кластеров, т.е. к установлению отображения $K\to M_b$:

$$\mathcal{P}_b:\ K\to M_b;\ m_{ij}=\mathcal{P}_b\left(K_k\right).$$

Как в процессе итерационного решения задачи размещения на блочном уровне, так и по ее результатам одним из критических факторов, обеспечивающих полноту последующей трассировки соединений, является соблюдение ограничений на фактическое количество цепей, пересекающих сечение (разрез) по вертикали для заданного *X*, и фактическое количество цепей, пересекающих сечение (разрез) по горизонтали для заданного *Y*. С учетом выбранного на очередном шаге итерационного размещения блоков $\mathcal{P}_b:\ K\to M_b;\ m_{ij}=\mathcal{P}_b\left(K_k\right)$ можно вычислить граничные координаты цепей пользовательской схемы:

$$X_{\min}\left(n\right),\ Y_{\min}\left(n\right),\ X_{\max}\left(n\right),\ Y_{\max}\left(n\right),\ n\in N\left(s_{mu}\right).$$

Следовательно, для заданной пользовательской схемы s_{mu} пропускная способность сечений вычисляется по формулам:

$$\sigma_X\left(s_{mu},X_S^k\right)=\left|\left\{n:n\in N\left(s_{mu}\right)\ \&X_{\min}\left(n\right)<X_S^k\ \&X_{\max}\left(n\right)\ge X_S^k\right\}\right|,$$
$$\sigma_Y\left(s_{mu},Y_S^k\right)=\left|\left\{n:n\in N\left(s_{mu}\right)\ \&Y_{\min}\left(n\right)<Y_S^k\ \&Y_{\max}\left(n\right)\ge Y_S^k\right\}\right|.$$

Для обеспечения успешной трассировки необходимо, чтобы требуемое для реализации пользовательской схемы число цепей, пересекающих сечение, не превышало фактическую пропускную способность сечения в базовом кристалле:

$$\sigma_X\left(s_{mu},X_S^k\right)\le\sigma_X\left(X_S^k\right),$$
$$\sigma_Y\left(s_{mu},Y_S^k\right)\le\sigma_Y\left(Y_S^k\right).$$

После выполнения размещения на верхнем уровне блоков необходимо выполнить размещение ЛЭ внутри блоков, т.е. каждому элементу в кластере поставить в соответствие ЛЭ в базовом кристалле:

$$\wp':\ E\left(s_{mu}\right)\to M_f,\quad m_{ij}^f=\wp'\left(e\right).$$

При этом размещение элемента $e\in K_e$ не должно выходить за пределы того блока *b*, на который отображен кластер K_e:

$$\forall e\in K_e:\exists m^b\left(I^b,J^b\right)=\mathcal{P}_b\left(K_k\right)\wedge m^f\left(I^f,J^f\right)=\wp'\left(e\right):I^b=\left[\frac{I^f}{I_{LE}}\right]\wedge J^b=\left[\frac{J^f}{J_{LE}}\right].$$

Таким образом, для успешного программирования пользовательских схем в базисе ПЛИС на этапе размещения должны выполняться следующие ограничения:

– на отображения элементов библиотечного уровня пользовательского проекта на элементы соответствующего типа библиотечного уровня проекта самой ПЛИС;

– на максимальную пропускную способность сечений в базовом кристалле.

Заключение. Представленная теоретико-множественная модель проекта и формализация соответствия между элементами базового проекта ПЛИС и проектируемыми схемами от конечного пользователя могут служить основой для будущих эффективных методов и алгоритмов автоматической настройки программных средств кластеризации и размещения.

Литература

1. Xilinx, Inc. Form 10-K // Investor Relations: [Web] / Xilinx. 31.03.2018. URL: http://investor.xilinx.com/static-files/13e52459-fd4c-44da-adee-19e463d02ae8 (дата обращения: 14.04.2021).

2. ***Эннс В.*** СнК, БМК или ПЛИС: выбор варианта исполнения цифровой интегральной схемы // Компоненты и технологии. 2018. № 4 (201). С. 100–102.

3. 5400ТР094 ПАЦИС // ДЦ СОЮЗ: [Электронный ресурс]. 2020. URL: https://dcsoyuz.ru/products/pais/art/1605 (дата обращения: 13.04.2021).

4. iCE40LM family data sheet // Lattice Semiconductor Corp.: [Web]. 2020. URL: http://www.latticesemi.com/view_document?document_id=50152 (дата обращения: 13.04.2021).

5. ***Фролова П.И., Чочаев Р.Ж., Иванова Г.А., Гаврилов С.В.*** Алгоритм размещения с оптимизацией быстродействия на основе матриц задержек для реконфигурируемых систем на кристалле // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 1. С. 2–7. DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-2-7

6. ***Hauck S., DeHon A.*** Reconfigurable computing. Vol. 1: The theory and practice of FPGA-based computation. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2007. 944 p.

7. ***Харари Ф.*** Теория графов / под ред. Г.П. Гаврилова; пер. с англ. и предисл. В.П. Козырева. 5-е изд., доп. М.: Ленанд, 2018. 304 с.

8. ***Строгонов А.В., Давыдов С.И., Мотылев М.С., Быстрицкий А.В.*** Программируемая коммутация межсоединений в ПЛИС типа программируемые пользователем вентильные матрицы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 8. С. 21–24.

9. ***Жуков Д.В., Железников Д.А., Заплетина М.А.*** Применение SAT-подхода к трассировке блоков коммутации для реконфигурируемых систем на кристалле // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 1. С. 26–32. DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-26-32

10. ***Wang W., Meng Q., Zhang Z.*** A survey of FPGA placement algorithm research // 2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). Macau: IEEE, 2017. P. 498–502. DOI: https://doi.org/10.1109/ICEIEC.2017.8076614

11. ***Гаврилов С.В., Железников Д.А., Чочаев Р.Ж., Эннс В.И.*** Адаптация метода моделирования отжига для размещения элементов в базисе реконфигурируемых систем на кристалле // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 2018. № 4 (172). С. 55–61.

12. ***Гаврилов С.В., Железников Д.А., Чочаев Р.Ж., Хватов В.М.*** Алгоритм декомпозиции на основе метода имитации отжига для реконфигурируемых систем на кристалле // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 1. С. 199–204. DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-1-199-204

Поступила в редакцию 28.05.2021 г.; после доработки 28.05.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

Эннс Виктор Иванович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по разработкам и внедрению микросхем специального и космического назначения НИИ молекулярной электроники (Россия, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1), venns@niime.ru

Гаврилов Сергей Витальевич – доктор технических наук, профессор, директор Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), sergey_g@ippm.ru

Чочаев Рустам Жамболатович – инженер-исследователь отдела САПР Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), chochaev_r@ippm.ru

References

1. Xilinx, Inc. Form 10-K. *Investor Relations, Xilinx.* Available at: http://investor.xilinx.com/static-files/13e52459-fd4c-44da-adee-19e463d02ae8 (accessed: 14.04.2021).

2. Enns V. SoC, GA or FPGA: selecting a digital integrated circuit design. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies,* 2018, no. 4 (201), pp. 100–102. (In Russian).

3. 5400TP094 PAZIS. *DC SOYUZ.* Available at: https://dcsoyuz.ru/products/pais/art/1605 (accessed: 13.04.2021). (In Russian).

4. iCE40LM family data sheet. *Lattice Semiconductor Corp.* Available at: http://www.latticesemi.com/view_document?document_id=50152 (accessed: 13.04.2021).

5. Frolova P.I., Chochaev R.Zh., Ivanova G.A., Gavrilov S.V. Timing-driven placement algorithm based on delay matrix model for reconfigurable system-on-chip. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES),* 2020, no. 1, pp. 2–7. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-2-7

6. Hauck S., DeHon A. *Reconfigurable computing. Vol. 1: The theory and practice of FPGA-based computation.* San Francisco, CA, Morgan Kaufmann, 2007. 944 p.

7. Harary F. *Graph theory.* Boca Raton, FL, CRC Press, 2018. 288 p.

8. Strogonov A.V., Davydov S.I., Motylev M.S., Bystritsky A.V. Programmable switching in FPGA interconnect. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University,* 2011, vol. 7, no. 8, pp. 21–24. (In Russian).

9. Zhukov D.V., Zheleznikov D.A., Zapletina M.A. Application of SAT approach to switch blocks routing for reconfigurable systems-on-chip. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES),* 2020, no. 1, pp. 26–32. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-26-32

10. Wang W., Meng Q., Zhang Z. A survey of FPGA placement algorithm research. *2017 7th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC).* Macau, IEEE, 2017, pp. 498–502. DOI: https://doi.org/10.1109/ICEIEC.2017.8076614

11. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Chochaev R.Zh., Enns V.I. The modification of simulated annealing-based placement algorithm for reconfigurable systems-on-chip. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 3. Mikroelektronika = Electronic Engineering. Ser. 3. Microelectronics,* 2018, no. 4 (172), pp. 55–61. (In Russian).

12. Gavrilov S.V., Zheleznikov D.A., Chochaev R.Z., Khvatov V.M. Partitioning algorithm based on simulated annealing for reconfigurable systems-on-chip. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES),* 2018, no. 1, pp. 199–204. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2018-1-199-204

Received 28.05.2021; Revised 28.05.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the authors:

Victor I. Enns – Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director of the Development & Implementation Space & Special Purpose Chips, Molecular Electronics Research Institute (Russia, 124460, Moscow, Zelenograd, Akademik Valiev st., 6/1), venns@niime.ru

Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), sergey_g@ippm.ru

Rustam Zh. Chochaev – Research Engineer of the CAD Department, Institute for Design Problems in Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), chochaev_r@ippm.ru

УДК 38.049.776.372.56-027.3:004.4Elcut DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-521-532

Тонкопленочные поглощающие элементы адаптоаттенюаторов для ГИС

А.В. Пилькевич, В.Д. Садков

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия

sadvd2016@mail.ru

Одной из актуальных задач при проектировании гибридных интегральных схем (ГИС) является построение адаптоаттенюаторов – пленочных поглощающих элементов, обеспечивающих широкий диапазон ослаблений с заданными значениями входного и выходного сопротивлений. Известные варианты адаптоаттенюаторов на основе однородной и кусочно-однородной резистивной пленки обеспечивают коэффициент трансформации сопротивлений не более 3 и 10–12 соответственно. В работе предложены перспективные топологии адаптоаттенюаторов для ГИС с близким к оптимальному профилем входного и выходного контактов. Показано, что данные топологии позволяют не только получать широкий диапазон коэффициентов трансформации (более 100), но и в 10–30 раз уменьшать максимальные значения градиента потенциала и плотности мощности. При расчете прямоугольной топологии использован аппарат теории функций комплексного переменного. Моделирование оптимизированной топологии адаптоаттенюаторов для ГИС проведено методом конечных элементов, реализованным в программном комплексе Elcut. Приведены расчетные соотношения и графики, показывающие взаимосвязь ослабления, коэффициента трансформации, выигрыша в градиенте потенциала и плотности мощности в зависимости от соотношения размеров пленочного элемента и удельных сопротивлений используемых резистивных пленок. Рассмотрены особенности подгонки адаптоаттенюаторов. Полученные результаты важны для работы пленочного элемента адаптоаттенюаторов для ГИС в импульсном режиме.

Ключевые слова: пленочный поглощающий элемент; адаптоаттенюатор; гибридная интегральная схема; градиент потенциала; плотность мощности; оптимальный профиль

Для цитирования: Пилькевич А.В., Садков В.Д. Тонкопленочные поглощающие элементы адаптоаттенюаторов для ГИС // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 521–532. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-521-532

© А.В. Пилькевич, В.Д. Садков, 2021

Thin-Film Absorbing Elements of Adapter-Attenuators for HIC

A.V. Pilkevich, V.D. Sadkov

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

sadvd2016@mail.ru

Abstract: One of the urgent tasks in the design of hybrid integrated circuits (HIC) is the construction of adapter-attenuators – film absorbing elements providing a wide range of attenuations with specified values of input and output resistances. Known variants of adapter-attenuators based on a homogeneous and piecewise homogeneous resistive film provide (by introducing asymmetry in the dimensions of the input and output contacts, changing the location of a piecewise homogeneous resistive film, introducing dielectric or conductive regions) a resistance transformation coefficient of no more than 3 and 10–12, respectively. In this work, promising topologies of adapter-attenuators for HIC with a close to optimal profile of input and output contacts are proposed, which allow not only to obtain a wide range of transformation coefficients (more than 100), but also to reduce the maximum values of the potential gradient and power density by 10–30 times. The rectangular topology calculations were made using the apparatus of the theory of functions of a complex variable. Modeling of the optimized topology of adapter-attenuators for HIC was carried out by the finite element method implemented in the Elcut software package. The calculated ratios and graphs showing the relationship of attenuation, the transformation coefficient, the gain in the value of the potential gradient and the power density, depending on the ratio of the size of the film element and the resistivity of the resistive films used, have been provided. The features of adapter-attenuators fitting have been considered. The results obtained are especially important for the pulse mode of operation of adapter-attenuators' film element for HIC.

Keywords: film absorbing element; adapter-attenuator; hybrid integrated circuits; potential gradient; power density; optimal profile

For citation: Pilkevich A.V., Sadkov V.D. Thin-film absorbing elements of adaptoattenuators for HIC. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 521–532. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-521-532

Введение. Широкополосные фиксированные аттенюаторы с пленочными поглощающими элементами (ПЭ) широко используются в телевизионных, радиоприемных и измерительных системах [1–3]. Разновидностью аттенюаторов являются адаптоаттенюаторы, различающиеся значениями входного и выходного сопротивлений (обеспечивающие трансформацию сопротивлений), что особенно важно для устройств на базе гибридных (ГИС) и полупроводниковых интегральных схем [4, 5].

Цель настоящей работы – анализ перспективных топологий ПЭ адаптоаттенюаторов для ГИС, позволяющих в малых габаритах обеспечить необходимый диапазон ослаблений и коэффициентов трансформации и их моделирование с использованием аналитических и численных методов. Предлагаемые топологии ПЭ адаптоаттенюаторов

для ГИС, обычно симметричных относительно оси OO' и имеющих по сравнению с несимметричными те же параметры при увеличенном вдвое значении удельных сопротивлений резистивных пленок, представлены на рис.1.

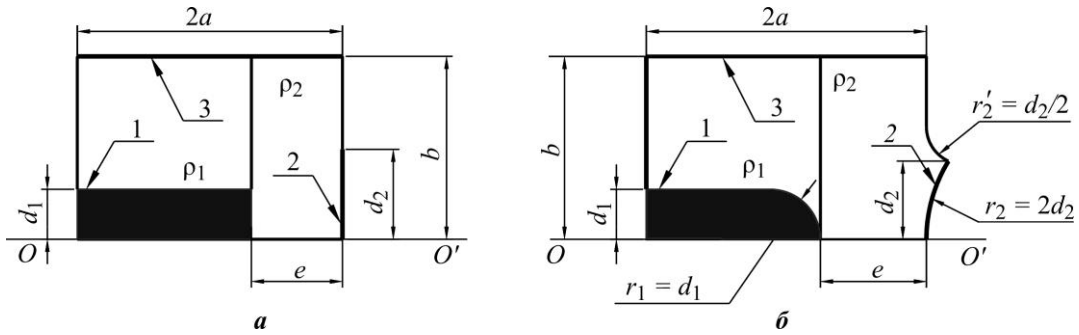


Рис.1. Прямоугольная (*а*) и оптимизированная (*б*) топологии адаптоаттенюатора
Fig.1. Rectangular (*a*) and optimized (*b*) adaptoattenuator topologies

Топология ПЭ, показанная на рис.1,*б*, позволяет за счет оптимизации профиля входного и выходного контактов существенно уменьшить плотность мощности и значения градиента потенциала вблизи этих контактов. Это особенно важно при импульсном режиме работы адаптоаттенюаторов.

Методика расчета. Рассмотрим ПЭ с однородной пленкой (рис.1,*а*), представленный с размерами на рис.2,*а*.

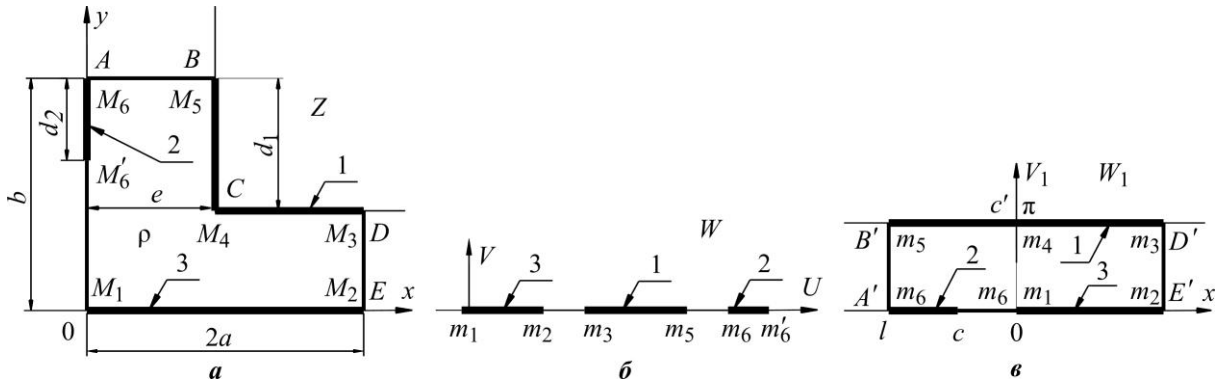


Рис.2. Прямоугольная топология адаптоаттенюатора с однородной резистивной пленкой (*а*) и ее последовательное отображение на плоскость W (*б*) и W_1 (*в*)
Fig.2. Rectangular topology of an adaptoattenuator with a homogeneous resistive film (*a*) and its sequential mapping to the plane W (*b*) and W_1 (*c*)

Для строгого решения задачи использован метод конформных отображений [6, 7]. Отобразим с помощью интеграла Кристоффеля – Шварца верхнюю полуплоскость W (рис.2,*б*) на внутренность шестиугольника $M_1M_2M_3M_4M_5M_6$ в плоскости Z (см. рис.2,*а*) с указанным соответствием точек:

$$Z = A\int_0^w \frac{\sqrt{w-m_4}\,dw}{\sqrt{(w-1)w(w+1)(w-m_5)(w-m_6)}}, \qquad (1)$$

где A – масштабный коэффициент, не существенный в задаче; m_i – константы интеграла Кристоффеля – Шварца (выбраны $m_1 = -1$, $m_2 = 0$, $m_3 = 1$).

Константы m_4, m_5, m_6 получаем из уравнений

$$h/b = I_1/I_2; \quad b/a = I_2/I_3; \quad 1-h/a = I_4/I_1. \tag{2}$$

Здесь

$$I_1 = A\int_{-1}^{0} \frac{\sqrt{w-m_4}\,dw}{\sqrt{(w-1)w(w+1)(w-m_5)(w-m_6)}},$$

$$I_2 = A\int_{0}^{1} \frac{\sqrt{w-m_4}\,dw}{\sqrt{(w-1)w(w+1)(w-m_5)(w-m_6)}},$$

$$I_3 = A\int_{m_5}^{m_6} \frac{\sqrt{w-m_4}\,dw}{\sqrt{(w-1)w(w+1)(w-m_5)(w-m_6)}},$$

$$I_4 = A\int_{1}^{m_4} \frac{\sqrt{w-m_4}\,dw}{\sqrt{(w-1)w(w+1)(w-m_5)(w-m_6)}}.$$

После определения констант (уравнения решаются в MathCADE, MATLABE) вычислим по (1) положение точки m_6 при $z = m–d$ и интегрировании в пределах от m_6 до m'_6. Дальнейший анализ структуры на рис.2,*б*, проводимый согласно работе [7], позволяет определить параметры схемы замещения в виде П-образной схемы с сопротивлениями R_1 и R_3 в вертикальных ветвях и R_2 – в горизонтальной ветви и, следовательно, ослабление, входное и выходное сопротивления.

Предпочтительным является упрощенное решение задачи с контролируемой погрешностью [8]. При этом будем работать не с шестиугольником $M_1M_2M_3M_4M_5M_6$, а с бесконечной полосой AM_1EDM_4B с прямоугольным изгибом. Отобразим полосу на рис.2,*в* в плоскости W_1 на полосу с изгибом в плоскости Z с помощью функции

$$Z = \frac{2b}{\pi}\left[\frac{1}{\sqrt{a_1}}\operatorname{arctg}\beta + \frac{1}{2}\ln\frac{1+\sqrt{a_1}\beta}{1-\sqrt{a_1}\beta}\right], \quad \sqrt{a_1} = \frac{b}{a}, \quad \beta = \sqrt{\frac{e^w-1}{a_1e^w+1}}.$$

Для линий границы *OA,OE, СД, СВ* в плоскости Z получаем следующие соотношения:

$$y_{OA} = \frac{a}{\pi}\left[2\sqrt{a_1}\operatorname{arctg}\left(\sqrt{a_1}\,f\right) - \ln\frac{1+f}{1-f}\right], \quad f = \sqrt{(1-e^{-u})/(1+a_1e^{-u})}, \tag{3}$$

$$x_{OE} = \frac{a}{\pi}\left[2\operatorname{arctg}(g) + \sqrt{a_1}\ln\frac{1+g\sqrt{a_1}}{1-g\sqrt{a_1}}\right], \quad g = \sqrt{(e^u-1)/(a_1e^u+1)}, \tag{4}$$

$$y_{CB} = \frac{a}{\pi}\left[2\sqrt{a_1}\operatorname{arctg}\left(\sqrt{a_1}\xi\right) - \ln\frac{\xi+1}{\xi-1}\right], \quad \xi = \sqrt{(1+e^{-u})/(1-a_1e^{-u})}, \tag{5}$$

$$x_{CД} = \frac{a}{\pi}\left[2\operatorname{arctg}(\alpha) + \sqrt{a_1}\ln\frac{\alpha\sqrt{a_1}+1}{\alpha\sqrt{a_1}-1}\right], \quad \alpha = \sqrt{(e^u+1)/(a_1e^u-1)}. \tag{6}$$

Отображение прямоугольника $m_2m_3m_5m_6$ в плоскости W_1 на шестиугольник $M_2M_3M_4M_5M_6M_1$ в плоскости Z будет строгим только при достаточном удалении линий M_6M_5 и M_2M_3 от начала координат. В противном случае линии m_6m_5 и m_2m_3 отобразятся

в выпуклую линию M_6M_5 и вогнутую M_3M_2. Но уже при x/b и y/b больше 1,5 отношения $x_{OE}/x_{СД}$ и y_{OA}/y_{CB} не превышают 2 %, а погрешность определения интегральных характеристик поля потенциалов (параметров схемы замещения рис.2,*в*) будет еще меньше [8].

Для размеров n, c, ℓ и результирующего размера $n + \ell$ из (3)–(6) получим

$$n = \left(\frac{h\pi}{a\sqrt{a_1}}\right) - \frac{2}{\sqrt{a_1}}\operatorname{artg}\frac{1}{\sqrt{a_1}} - \ln\frac{4a_1}{1+a_1},$$

$$c = \frac{\pi d}{a} + \sqrt{a_1}\operatorname{arctg}\sqrt{a_1} - \ln\frac{4a_1}{1+a_1},$$

$$\ell = \frac{\pi m}{a} + \sqrt{a_1}\operatorname{arctg}\sqrt{a_1} - \ln\frac{4a_1}{1+a_1},$$

$$n+\ell = \frac{\pi}{a}\left(\frac{h}{\sqrt{a_1}} + \ell\right) + \left(\frac{2}{\sqrt{a_1}} + \sqrt{a_1}\right)\operatorname{artg}\sqrt{a_1} - 2\ln\frac{4a_1}{(1+a_1)^2}.$$

Получившийся в плоскости W_1 прямоугольник установим в плоскости Z_1 (рис.3,*а*) и отобразим на верхнюю полуплоскость W_2 (рис.3,*б*) [7]:

$$w_2 = sn\left(\frac{z_1}{\pi/2}K, k\right), \quad \frac{K'}{K} = \frac{n+\ell}{\pi/2},$$

$$\alpha = sn\left(\frac{\pi/2 + in}{\pi/2}K, k\right) = 1/\,dn\left[\left(1 - \frac{\ell}{n+\ell}\right)K', k'\right], \tag{7}$$

$$\beta = sn\left(\frac{\pi/2 + i(n+c)}{\pi/2}K, k\right) = 1/\,dn\left[\left(1 - \frac{\ell - c}{n+\ell}\right)K', k'\right]. \tag{8}$$

Здесь использованы обозначения, принятые в теории полных эллиптических интегралов 1-го рода и эллиптических функций Якоби [6].

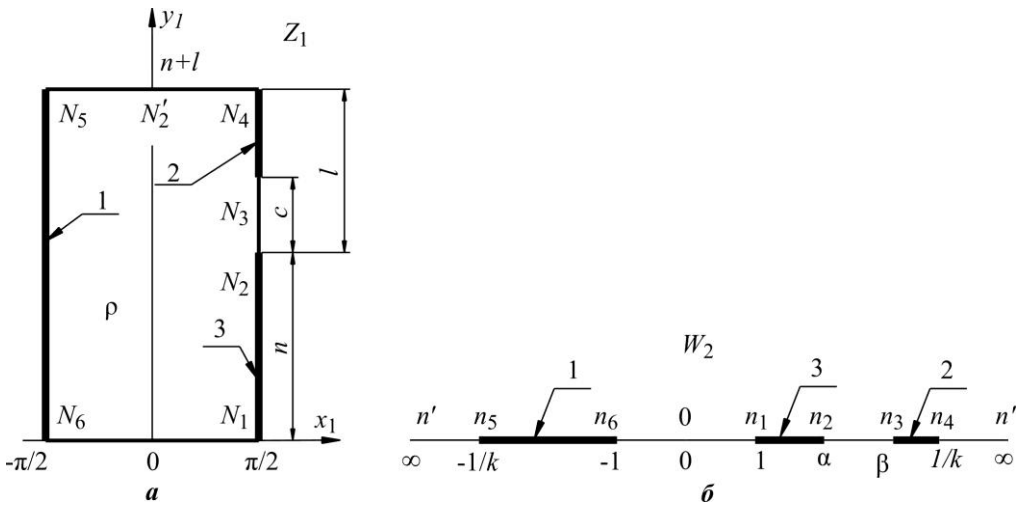


Рис.3. Отображение структуры, показанной на рис. 2,*б* (*а*), на плоскость W_2 (*б*)
Fig.3. Mapping of the structure of fig. 2,*b* (*a*) to the plane W_2 (*b*)

Величины сопротивлений П-образной схемы замещения определим с учетом (7), (8) по соотношениям [7]:

$$R_1 = \frac{\rho}{2}\frac{\det[F]}{\det[E_{21}]}, \quad R_2 = \frac{\rho}{2}\frac{\det[F]}{\det[E_{22}]}, \quad R_3 = \frac{\rho}{2}\frac{\det[F]}{\det[E_{31}]},$$

где det[F], det[E_{km}] – определители матриц [F] и [E_{km}] вида

$$[\mathrm{F}] = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{10} \\ F_{21} & F_{20} \end{bmatrix}, \quad [\mathrm{E}_{21}] = \begin{bmatrix} E_{21} & E_{20} \\ F_{21} & F_{20} \end{bmatrix}, \quad [\mathrm{E}_{22}] = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{10} \\ E_{21} & E_{20} \end{bmatrix}, \quad [\mathrm{E}_{31}] = \begin{bmatrix} E_{31} & E_{30} \\ F_{21} & F_{20} \end{bmatrix},$$

$$F_{km} = (-1)^k \int_{b_k}^{a_{k+1}} \frac{t^m dt}{\sqrt{|R(t)|}}, \quad E_{km} = (-1)^{k+1} \int_{a_k}^{b_k} \frac{t^m dt}{\sqrt{|R(t)|}}, \tag{9}$$

$$R(t) = (t-a_1)(t-b_1)(t-a_2)(t-b_2)(t-a_3)(t-b_3);$$

$$a_1 = -1/k;\ b_1 = -1;\ a_2 = 1/k;\ b_2 = a, a_3 = \beta;\ b_3 = 1/k.$$

С помощью подстановок $t = x(b_k–a_k)/2 + (b_k+a_k)/2$ для E_{km} и $t = x(a_{k+1}–b_k)/2 + (a_{k+1}+b_k)/2$ для F_{km} гиперэллиптические интегралы (9) приведем к стандартному интервалу интегрирования и вычислим с использованием квадратурной формулы наивысшей степени точности [9]:

$$\int_{-1}^{1} \frac{g(x)dx}{\sqrt{1-x^2}} = \frac{\pi}{N}\sum_{n=1}^{N} g\left(\cos\frac{2n-1}{2N}\pi\right) + R_N(g),$$

$$R_N(g) = \frac{\pi}{N}\frac{g^{2N}(\eta)}{2N!}, \ -1 < \eta < 1.$$

После определения параметров R_1–R_3 схемы замещения (см. рис.2,*в*) коэффициент трансформации n^2, входное $R_{вх}$, выходное $R_{вых}$ сопротивления и ослабление q (дБ) ПЭ (см. рис.1,*б*) вычислим по известным соотношениям [10]:

$$n^2 = (1+R_2/R_3)/(1+R_2/R_1),$$

$$R_{вх} = R_1\sqrt{\frac{1+R_3/R_2}{1+R_1/R_2}}\sqrt{\frac{1}{1+R_1/R_2+R_3/R_2}},$$

$$R_{вых} = R_3\sqrt{\frac{1+R_1/R_2}{1+R_3/R_2}}\sqrt{\frac{1}{1+R_1/R_2+R_3/R_2}},$$

$$q = 20\lg\left[\sqrt{(1+R_2/R_3)(1+R_2/R_1)} + \sqrt{(1+R_2/R_3)(1+R_2/R_1)-1}\right]$$

или

$$q = 20\lg\left[(1+R_2/R_1)\sqrt{n^2} + \sqrt{n^2(1+R_2/R_1)^2-1}\right].$$

В случае строгого отображения (1) после определения параметров m_4, m_5, m_6 по уравнениям (2) при $m_1 = –1$, $m_2 = 0$, $m_3 = 1$ дальнейшие вычисления проводим аналогично вычислениям для структуры на рис.3,*б*. В случае кусочно-однородной пленки с отношением $\omega = \rho_2/\rho_1 > 5–10$ структура на рис.1,*а* может быть разделена на прямоугольный резистор с размерами $2a–e$, $b–d_1$ и трехэлектродную структуру с размерами e, b с входным и выходным контактами длиной d_1 и d_2, расчет которой проводится аналогично. Результаты расчета ПЭ, показанного на рис.1,*а*, при $b/a = 1$, $d_1/b = 0{,}5$, $d_2/b = 0{,}5$ приведены на рис.4.

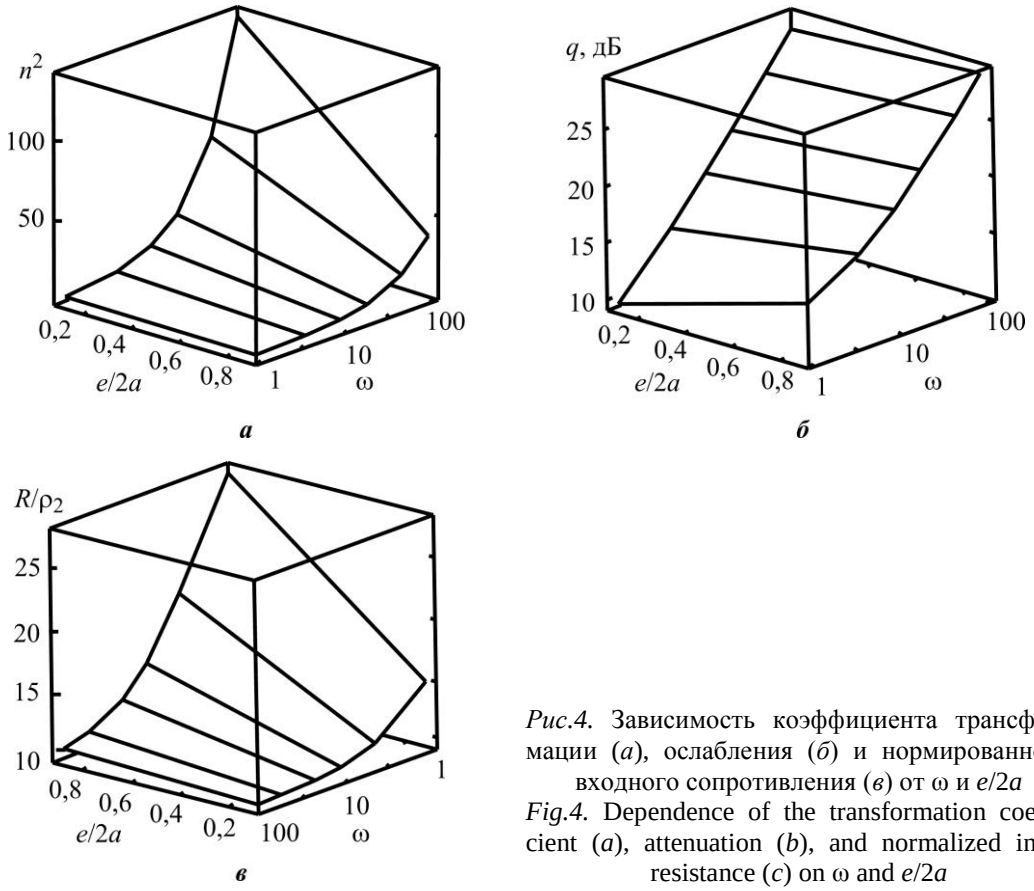


Рис.4. Зависимость коэффициента трансформации (*а*), ослабления (*б*) и нормированного входного сопротивления (*в*) от ω и $e/2a$
Fig.4. Dependence of the transformation coefficient (*a*), attenuation (*b*), and normalized input resistance (*c*) on ω and $e/2a$

Исследования показывают, что распределение плотности тока и рассеиваемой мощности по поверхности рассматриваемых ПЭ сильно неоднородно (особенно в области входного / выходного контакта ПЭ). Это приводит к снижению уровня допустимой мощности, ухудшению температурной и временной стабильности, надежности адаптоаттенюаторов [11].

ПЭ с уменьшенными значениями градиентов потенциалов и плотностей мощности в резистивной пленке получим с учетом того, что оптимальный профиль контактов 1 и 3 ПЭ на рис.1,*а* близок к полуокружности [12]. Результаты расчета в программном комплексе Elcut [13] отношения максимальных значений градиента потенциала E_T и плотности мощности ПЭ P_T без скругления (см. рис.1,*а*) и E_s, P_s со скруглением (см. рис.1,*б*) приведены на рис.5. При этом изменения ослабления, коэффициента трансформации и нормированного входного сопротивления не превосходят 10 % и практически линейно зависят от ω.

При скруглении контакта 1 в области с удельным сопротивлением ρ_2 изменения на графиках (см. рис.5) не превышают 3 % (длина контакта 1 всегда равна $2a - e + d_{1\min}$, где $d_{1\min}$ соответствует отношению $d_1/b = 0{,}3$; при больших d_1 получающийся прямоугольник скругляется сверху радиусом $d_{1\min}$). Оптимизация профиля контактов обеспечивает более чем на порядок снижение градиента потенциалов и плотности мощности вблизи входного контакта. При перевернутом использовании ПЭ (вход – контакт 2) такое снижение не превышает 30 %.

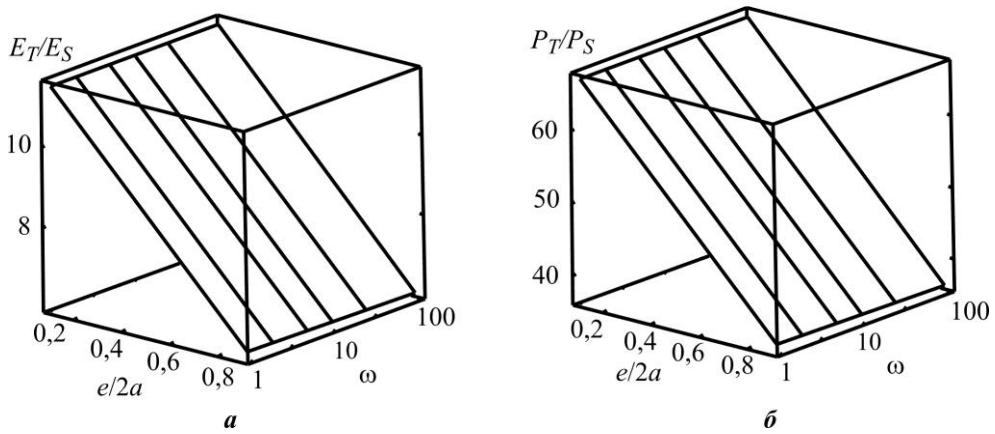


Рис.5. Зависимость отношений максимальных значений градиентов потенциалов E_T/E_S (*а*) и плотностей мощности P_T/P_S (*б*) прямоугольного (см. рис.1,*а*) и скругленного (см. рис.1,*б*) ПЭ от ω и $e/2a$

Fig.5. Dependencies of the relations of maximum values of the potential gradients E_T/E_S (*a*) and power densities P_T/P_S (*b*) of the rectangular (fig.1,*a*) and rounded (fig.1,*b*) film element on ω and $e/2a$

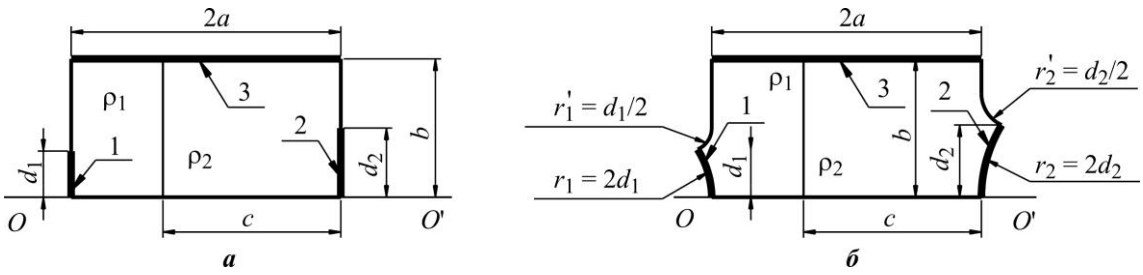
Нанесение двух пленок усложняет процесс изготовления, снижает температурную стабильность ПЭ и, как правило, требует введения дополнительной операции подгонки [14, 15]. Параметры схемы замещения ПЭ находятся путем последовательного замыкания контактов 1-2, 1-3 и 2-3, измерения получающихся сопротивлений R_{12}, R_{13}, R_{23} и вычисляются следующим образом:

$$1/R_1 = 0,5(1/R_{12} + 1/R_{23} - 1/R_{13}),$$
$$1/R_2 = 0,5(1/R_{23} + 1/R_{13} - 1/R_{12}),$$
$$1/R_3 = 0,5(1/R_{13} + 1/R_{12} - 1/R_{23}).$$

Подгонку параметров ПЭ целесообразно проводить введением лазерных прорезей вблизи заземленного контакта 3 справа и слева и вблизи контакта 2 снизу. Подрезка контакта 3 слева линейно увеличивает параметр R_1 (на 60 % для лазерного реза нормированной глубины $a'/2a$ = 0,4) и слабо (не более чем на 15 %) уменьшает R_2 и R_3. Подрезка справа увеличивает все параметры, но в основном R_3 (на 40 % при нормированной глубине прорези $a'/2a$ = 0,4). Подрезка контакта 2 снизу не влияет на R_1, значительно увеличивает R_2 (на 40 % при нормированной глубине реза d'_2/d_2 = 0,4) и слабо – R_3. При малых глубинах прорезей подрезка контакта 3 слева оказывает влияние только на R_1, подрезка этого контакта справа – на R_3, подрезка контакта 2 – на R_2. Это и определяет последовательность подгонки, которая при необходимости в больших длинах резов проводится последовательно в несколько циклов из перечисленных трех резов.

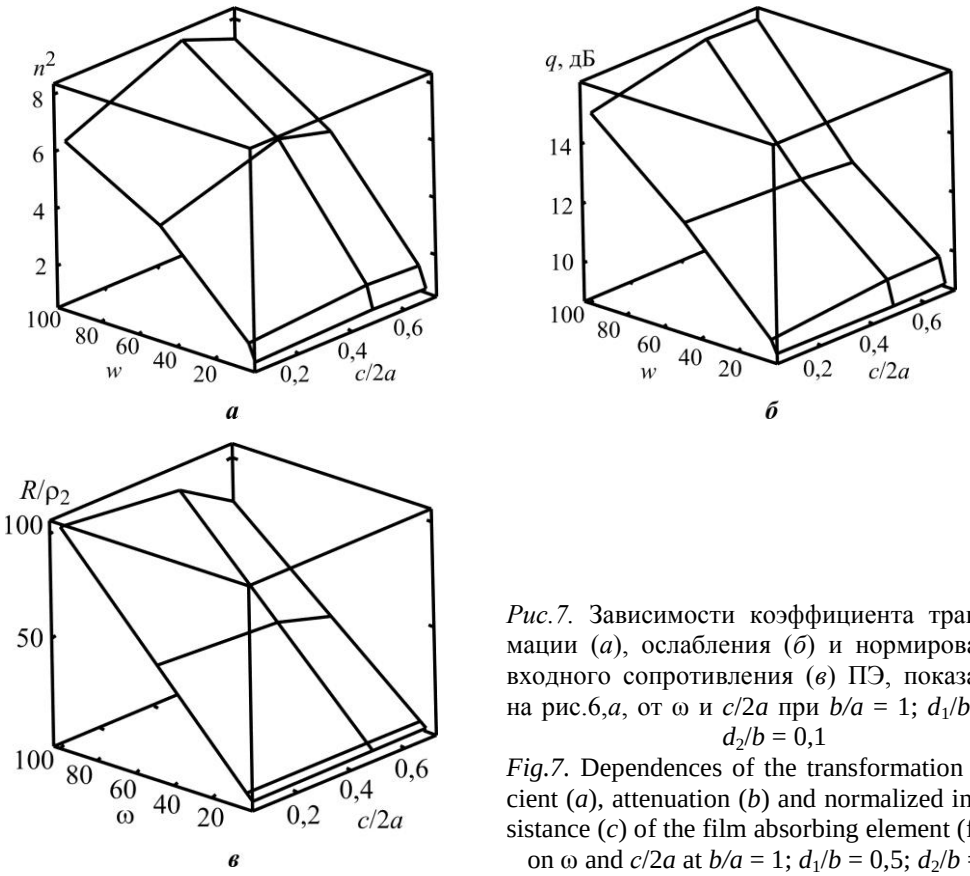
Рассмотрены и другие варианты построения ПЭ адаптоаттенюаторов на базе известных топологий ПЭ аттенюаторов с однородной [11] и кусочно-однородной резистивной [16] пленками за счет введения асимметрии в размеры входного и выходного контактов, расположения кусочно-однородных пленок, положения центральной диэлектрической или проводящей области [17].

Практически все варианты на базе однородных резистивных пленок не способны обеспечить значения коэффициентов трансформации более 3.Только на ПЭ с кусочно-однородной пленкой (рис.6) коэффициент трансформации может достигать 8–10 при $\omega = \rho_2/\rho_1 \approx 80$–$100$ (рис.7). В ПЭ, симметричных относительно линии *OO′*, значения удельных сопротивлений для получения прежних значений входного и выходного сопротивлений должны быть увеличены в два раза. Оптимизация профиля контактов позволяет в разы (рис.8) снизить максимальные значения градиента потенциала и плотности мощности вблизи входного / выходного контакта.



а *б*

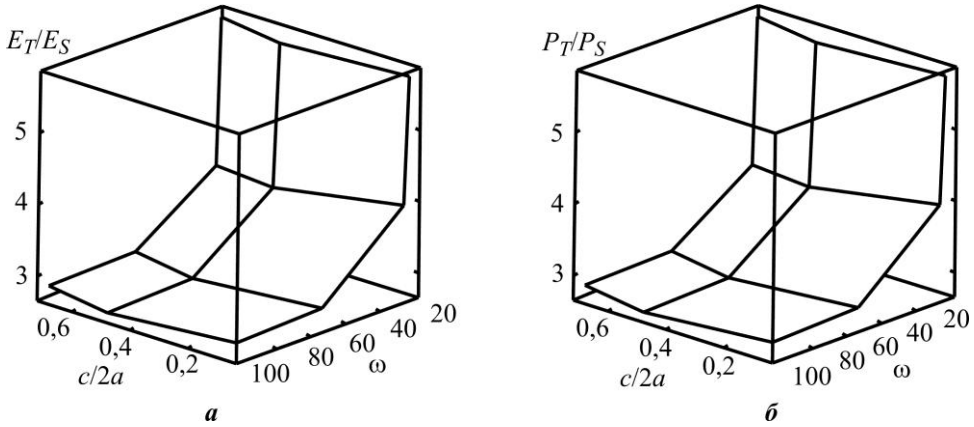
Рис.6. ПЭ с кусочно-однородной резистивной пленкой с прямыми (*а*) и скругленными (*б*) контактами
Fig.6. Film absorbing element with piecewise uniform resistive film with straight (*a*) and rounded (*b*) contacts



а *б* *в*

Рис.7. Зависимости коэффициента трансформации (*а*), ослабления (*б*) и нормированного входного сопротивления (*в*) ПЭ, показанного на рис.6,*а*, от ω и *c*/2*a* при *b*/*a* = 1; d_1/b = 0,5; d_2/b = 0,1

Fig.7. Dependences of the transformation coefficient (*a*), attenuation (*b*) and normalized input resistance (*c*) of the film absorbing element (fig.6,*a*) on ω and *c*/2*a* at *b*/*a* = 1; d_1/b = 0,5; d_2/b = 0,1



а *б*

Рис.8. Зависимости отношений максимальных значений градиентов потенциалов E_T/E_S (*а*) и плотностей мощности P_T/P_S (*б*) прямоугольного (см. рис.6,*а*) и скругленного (см. рис.6,*б*) ПЭ от ω и $c/2a$ при $b/a = 1$; $d_1/b = 0{,}5$; $d_2/b = 0{,}1$

Fig.8. Dependences of the relations of maximum values of the potential gradients E_T/E_S (*a*) and power densities P_T/P_S (*b*) of the rectangular (fig.6,*a*) and rounded (fig.6,*b*) film absorbing element on ω and $c/2a$ at $b/a = 1$; $d_1/b = 0{,}5$; $d_2/b = 0{,}1$

Заключение. Предложенные топологии и методика расчета ПЭ адаптоаттенюаторов на основе кусочно-однородных резистивных структур малых габаритов, в том числе с оптимизированным профилем входного и выходного контактов, для ГИС ВЧ- и СВЧ-диапазонов обеспечивают высокие значения коэффициентов трансформации (до 80–100), снижение более чем на порядок максимальных значений градиента потенциала и плотности мощности. Приведенные графики показывают взаимосвязь ослабления, коэффициента трансформации сопротивлений и выигрыш в величине градиента потенциала и плотности мощности в зависимости от соотношения размеров ПЭ и удельных сопротивлений используемых резистивных пленок.

Полученные результаты существенны для работы ПЭ адаптоаттенюаторов в импульсном режиме, в котором мгновенные значения выделяющейся мощности и градиента потенциала вблизи входного контакта на порядки превышают величины, соответствующие непрерывному режиму, а локальные перегревы не успевают выравниваться. Это может привести не только к снижению температурной стабильности и надежности, но и к выгоранию отдельных участков резистивной пленки.

Литература

1. ***Белов Л.*** Аттенюаторы СВЧ-сигналов // Электроника: наука, технология, бизнес. 2006. № 2 (68). С. 32–39.

2. ***Кочемасов В., Белов Л.*** Фиксированные аттенюаторы – производители и характеристики. Ч. 1 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2017. № 6 (166). С. 108–116. DOI: https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.166.6.108.116

3. ***Кочемасов В., Белов Л.*** Фиксированные аттенюаторы – производители и характеристики. Ч. 2 // Электроника: наука, технология, бизнес. 2017. № 7 (168). С. 90–94. DOI: https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.168.7.90.94

4. ***Чижиков С.В.*** Анализ тенденций развития чип-резистивных СВЧ-аттенюаторов // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 8. С. 31–35.

5. ***Садков В.Д.*** Тонкопленочные звенья затухания с трансформацией сопротивлений // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1978. Т. 21. № 7. С. 120–122.

6. ***Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.*** Методы теории функций комплексного переменного. 4-е изд., испр. М.: Наука, 1973. 736 с.

7. ***Ямпурин Н.П., Широков Л.В., Садков В.Д., Потехин В.А.*** Современные проблемы радиоэлектроники с позиций теории конформных отображений. Арзамас: Арзамасский филиал ННГУ, 2014. 209 с.

8. ***Мартюшов К.И., Зайцев Ю.В., Тихонов А.И.*** Методы расчета резисторов. М.: Энергия, 1971. 208 с.

9. ***Крылов В.И.*** Приближенное вычисление интегралов. М.: Наука, 1967. 500 с.

10. ***Татур Т.А.*** Основы теории электрических цепей: справочное пособие. М.: Высшая школа, 1980. 271 с.

11. ***Пилькевич А.В., Фомина К.С., Садков В.Д.*** Оптимизация топологии пленочных поглощающих элементов ВЧ и СВЧ аттенюаторов // Проектирование и технология электронных средств. 2020. № 1. С. 8–12.

12. ***Садков В.Д., Уткин В.Н.*** Оптимальный профиль входных контактов аттенюаторной пластины на основе распределенных резистивных структур // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2008. Т. 51. № 12. С. 65–68.

13. О компании ООО «Тор» // ELCUT: [Электронный ресурс]. URL: http://elcut.ru/tor/ (дата обращения: 18.05.2021).

14. ***Седаков А.Ю., Смолин В.К.*** Тонкопленочные элементы в микроэлектронике: основы проектирования и изготовления. М.: Радиотехника, 2011. 168 с.

15. ***Лугин А.Н.*** Конструкторско-технологические основы проектирования тонкопленочных прецизионных резисторов. Пенза: Информ.-изд. центр ПензГУ, 2008. 288 с.

16. ***Садков В.Д., Фомина К.С.*** Поглощающие элементы для реализации широкого диапазона ослаблений // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 4. С. 238–243. DOI: https://doi.org/10.17587/nmst19.238-243

17. ***Садков В.Д., Фомина К.С., Пилькевич А.В.*** Поглощающие элементы на основе однородной резистивной пленки для реализации широкого диапазона ослаблений мощности радиосигналов // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 5. С. 477–485. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-5-477-485

Поступила в редакцию 04.06.2021 г.; после доработки 04.06.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

Пилькевич Антон Владимирович – магистрант Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24), anton-pi@yandex.ru

Садков Виктор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий в проектировании и производстве Института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24), sadvd2016@mail.ru

References

1. Belov L. Microwave attenuators. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business,* 2006, no. 2 (68), pp. 32–39. (In Russian).

2. Kochemasov V., Belov L. Fixed attenuators: manufacturers and characteristics. Part 1. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business,* 2017, no. 6 (166), pp. 108–116. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.166.6.108.116

3. Kochemasov V., Belov L. Fixed attenuators: manufacturers and characteristics. Part 2. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business,* 2017, no. 7 (168), pp. 90–94. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.168.7.90.94

4. Chizhikov S.V. Analysis of tendencies in the development of chip-resistor, microwave attenuators. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics,* 2017, no. 8, pp. 31–35. (In Russian).

5. Sadkov V.D. Thin-film attenuation links with resistance transformation. *Izvestiya vuzov SSSR. Radioelektronika = Radioelectronics and Communications Systems,* 1978, vol. 21, no. 7, pp. 120–122. (In Russian).

6. Lavrent'yev M.A., Shabat B.V. *Methods of the complex variable theory.* 4th ed., rev. Moscow, Nauka Publ., 1973. 736 p. (In Russian).

7. Yampurin N.P., Shirokov L.V., Sadkov V.D., Potekhin V.A. *Modern problems of the radio electronics from the standpoint of the theory of conformal displays*. Arzamas, Arzamas branch of Lobachevsky University, 2014. 209 p. (In Russian).

8. Martyushov K.I., Zaytsev Yu.V., Tikhonov A.I. *Resistor calculation methods*. Moscow, Energiya Publ., 1971. 208 p. (In Russian).

9. Krylov V.I. *Integral approximations*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 500 p. (In Russian).

10. Tatur T.A. *Fundamentals of the theory of electrical circuits (reference book)*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 271 p. (In Russian).

11. Pilkevich A.V., Fomina K.S., Sadkov V.D. Optimization of topology of the film absorbing elements HF and very high frequency of attenuators. *Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and Technology of Electronic Means*, 2020, no. 1, pp. 8–12. (In Russian).

12. Sadkov V.D., Utkin V.N. Optimal profile of input contacts of the attenuator plate on the basis of distributed resistive structures. *Radioelectron. Commun. Syst.*, 2008, vol. 51, no. 12, pp. 675–677. DOI: https://doi.org/10.3103/S0735272708120078

13. About OOO Tor company. *ELCUT*. Available at: http://elcut.ru/tor/ (accessed: 18.05.2021). (In Russian).

14. Sedakov A.Yu., Smolin V.K. *Thin-film elements in microelectronics: fundamentals of design and manufacturing*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2011. 168 p. (In Russian).

15. Lugin A.N. *Design and technological bases of designing thin-film precision resistors*. Penza, Information and Publishing Center of Penza State University, 2008. 288 p. (In Russian).

16. Sadkov V.D., Fomina K.S. Absorptive elements for realization of wide attenuation range. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 238–243. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.17587/nmst19.238-243

17. Sadkov V.D., Fomina K.S., Pilkevich A.V. Absorbing elements on the basis of a uniform resistive film for realization of wide range of power attenuations of radio signals. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 5, pp. 477–485. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-5-477-485

Received 04.06.2021; Revised 04.06.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the authors:

Anton V. Pilkevich – Master's degree student of the Institute of Radio Engineering and Information Technologies, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.Y. Alekseev (Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Minin st., 24), anton-pi@yandex.ru

Viktor D. Sadkov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Computer Aided Design and Manufacturing Department, Institute of Radio Engineering and Information Technologies, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.Y. Alekseev (Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Minin st., 24), sadvd2016@mail.ru

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

Полные тексты статей журнала с 2007 по 2020 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

УДК 621.314.1:681.5 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-533-546

Модифицированная прогнозирующая система управления повышающего DC-DC-преобразователя

А.А. Чердинцев[1,2], А.В. Щагин[1], С.А. Лупин[1]

[1]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия*
[2]*АО «Производственно-конструкторская компания Миландр», г. Москва, Россия*

schagin4@rambler.ru

Системы управления прогнозирующего типа являются перспективными, так как позволяют значительно уменьшить затраты на настройку преобразователей. Однако сохраняется проблема управления DC-DC-преобразователями. В работе представлена модифицированная модель прогнозирующей системы управления (МПСУ) для повышающих DC-DC-преобразователей. Для ее реализации предложена нелинейная модель преобразователя с дискретным переключением времени, описывающая непрерывный режим работы. Синтез регулятора достигнут путем формулирования целевой функции, которая должна быть минимизирована с учетом динамической модели преобразователя. Предложенная модифицированная МПСУ, используемая в качестве системы управления напряжением, позволяет удерживать выходное напряжение на опорном уровне. Оптимизированный способ расчета целевой функции дает возможность заметно сократить требуемую вычислительную мощность и расширить горизонт прогнозирования. Приведенные результаты моделирования показывают преимущества модифицированной МПСУ – быстрый переходный отклик и высокую степень робастности.

Ключевые слова: повышающий DC-DC-преобразователь; гибридная система управления; модель прогнозирующей системы управления; оптимальное управление; управление по напряжению

Для цитирования: Чердинцев А. А., Щагин А.В., Лупин С.А. Модифицированная прогнозирующая система управления повышающего DC-DC преобразователя // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 533–546. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-533-546

© А.А. Чердинцев, А.В. Щагин, С.А. Лупин, 2021

Modified Predictive Control System of the DC-DC Boost Converter

***A.A. Cherdintsev*[1,2], *A.V. Shagin*[1], *S.A. Lupin*[1]**

[1]*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*
[2]*JSC «ICC Milandr», Moscow, Russia*

schagin4@rambler.ru

Abstract: Nowadays, predictive control systems are becoming more and more popular, which significantly reduce the cost of setting up converters. However, DC-DC converter control problem persists. In this work, a modified model of the predictive control system (MPCS) for step-up DC-DC converters is presented. For its implementation, a nonlinear model of a converter with discrete time switching was derived, which describe a continuous conduction mode of operation. The synthesis of the controller was achieved by formulating the objective function that should be minimized considering the dynamic model of the converter. The proposed predictive control strategy, used as a voltage control system, allows keeping the output voltage at the reference level. The modified system for calculating the objective function makes it possible to significantly reduce the required computing power and expand the prediction horizon. The results of modeling have been presented that demonstrate the advantages of the proposed control method: a fast transient response and a high degree of robustness.

Keywords: DC-DC boost converter; hybrid control system; model predictive control; MPC; optimal control; voltage control

For citation: Cherdintsev A.A., Shagin A.V., Lupin S.A. Modified predictive control system of the DC-DC boost converter. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 533–546. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-533-546

Введение. Приборы, преобразующие постоянное напряжение в другое постоянное, используются в разных приложениях, включая источники питания и приводы двигателей. Проблема управления DC-DC-преобразователями вследствие их коммутационного поведения, приводящая к созданию коммутируемой линейной или гибридной системы, остается актуальной. Существует множество систем управления. Например, используются линейные методы (пропорционально-интегральные регуляторы, основанные на моделях по среднему) [1], методы скользящего режима [2] и другие, которые доказали свою эффективность. Однако вопросы простоты проектирования, настройки устройства, а также устойчивости к изменениям параметров нагрузки требуют решения. Кроме того, имеющиеся на сегодняшний день вычислительные мощности и последние теоретические достижения в области управления гибридными системами дают возможность более широко использовать новые цифровые методы управления. Цель состоит не только в том, чтобы улучшить работу конкретного устройства, но и в том, чтобы стандартизировать процесс проектирования новых приборов, упростить учет изменяющихся внешних условий.

Модель прогнозирующей системы управления (МПСУ) является перспективной технологией, поскольку она позволяет учитывать особенности работы преобразователя

непосредственно на этапе проектирования [3]. МПСУ разработана в 1970-х гг. для управления технологическими процессами и недавно начала внедряться в область силовой электроники, включая трехфазные системы постоянного и переменного тока [4, 5], AC-DC- и DC-DC-преобразователи [6–9].

Описание прогнозирующей системы управления. В МПСУ управляющее воздействие вычисляется путем решения на каждом временном шаге оптимизационной задачи с заданной целевой функцией на конечном горизонте прогнозирования с учетом дискретно-временной модели системы. Оптимальной последовательностью управляющих входов является та, которая минимизирует целевую функцию. Для обеспечения обратной связи, позволяющей справиться с внешними возмущениями, к преобразователю применяется только первый элемент последовательности управляющих входов. На следующем временном шаге задача оптимизации повторяется с обновленными измерениями или оценками. Данная методика известна как политика отступающего горизонта [10].

В настоящей работе МПСУ применяется в качестве системы управления повышающего DC-DC-преобразователя. Основная задача управления – поддержание выходного напряжения на заданном значении, при этом исключается влияние колебаний входного напряжения и нагрузки. Дискретно-временная модель преобразователя, используемая устройством, построена таким образом, что она достаточно точно предсказывает поведение установки, как при работе в непрерывном режиме.

Использование МПСУ имеет ряд преимуществ. Достаточно быстрый отклик на внешние воздействия, достигаемый с помощью МПСУ, и присущие МПСУ свойства надежности являются одними из ее ключевых положительных характеристик. Кроме того, благодаря тому, что цели управления напрямую выражаются в целевой функции, упрощается процесс проектирования, устраняется необходимость в трудоемкой настройке. В случае изменения параметров элементов устройства достаточно поменять нужные параметры в блоке управления. Ряд параметров вычисляется системой управления динамически в процессе работы устройства. Вычислительная сложность МПСУ является наиболее заметным недостатком: требуемая вычислительная мощность возрастает экспоненциально по мере расширения горизонта прогнозирования. Для решения этой проблемы принят оптимизированный способ вычисления всех вариантов значения целевой функции, которая приводит к значительному сокращению требуемых вычислений, облегчает реализацию контроллера в реальном времени и позволяет работать с достаточно малым отклонением от заданной заранее частоты.

Модель повышающего преобразователя. ***Модель с непрерывным временем.*** Повышающий DC-DC-преобразователь постоянного тока (рис.1) увеличивает входное постоянное напряжение $V_s(t)$ до более высокого (контролируемого) выходного постоянного напряжения $V_0(t)$. Преобразователь состоит из двух силовых ключей S_1 и S_2 с сопротивлением в открытом режиме R_1 и R_2 соответственно. Катушка L с внутренним резистором R_L используется для хранения и передачи энергии в зависимости от режима работы преобразователя, а фильтрующий конденсатор C_0 подключен параллельно нагрузочному резистору R_{load} таким образом, чтобы обеспечить постоянное выходное напряжение при установившейся работе преобразователя.

С положениями переключателя связаны три различных линейных режима, из которых два являются основными. Когда переключатель S_1 включен, а переключатель S_2 выключен ($u = 1$), энергия накапливается в катушке L и ток катушки $i_L(t)$ увеличивается. Когда переключатель S_2 включен, а переключатель S_1 выключен ($u = 0$), катушка подключается к выходу и энергия через нее перетекает на нагрузку, что приводит к

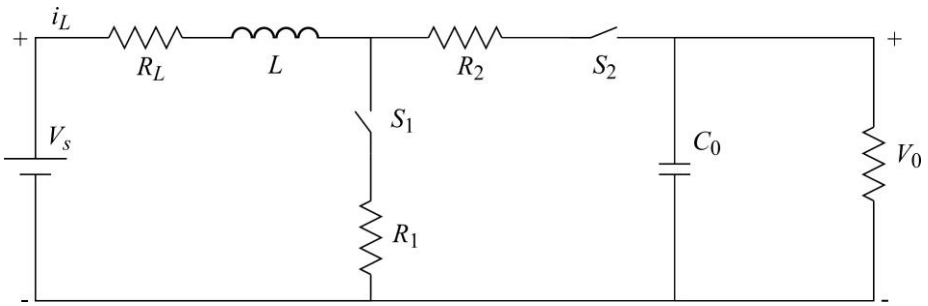


Рис.1. Схема повышающего DC-DC-преобразователя
Fig.1. Diagram of the DC-DC boost converter

уменьшению $i_L(t)$. В случае неосновного режима ток $i_L(t)$ больше, чем допустимый максимальный, оба переключателя отключены, а схема сводится к фильтру, образованному конденсатором C_0 и нагрузкой R_{load}. Представление пространства состояний преобразователя в области непрерывного времени задается следующими уравнениями:

$$u = 1 : \frac{\partial x(t)}{\partial t} = A_1 x(t) + B_1 V_s(t),$$

$$u = 0 : \frac{\partial x(t)}{\partial t} = A_2 x(t) + B_2 V_s(t),$$

где $x(t)$ – вектор состояния, охватывающий ток катушки и выходное напряжение на выходном конденсаторе:

$$x(t) = [i_L(t), V_0(t)]^T.$$

Выход $y = V_0(t)$ задается выходным напряжением. Системные матрицы таковы:

$$A_1 = \begin{pmatrix} -(R_L + R_1)/L & 0 \\ 0 & -1/(C_0 + R_{load}) \end{pmatrix},$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} -(R_L + R_2)/L & -1/L \\ 1/C_0 & -1/(C_0 + R_{load}) \end{pmatrix},$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Графическое представление повышающего DC-DC-преобразователя в виде автомата приведено на рис.2.

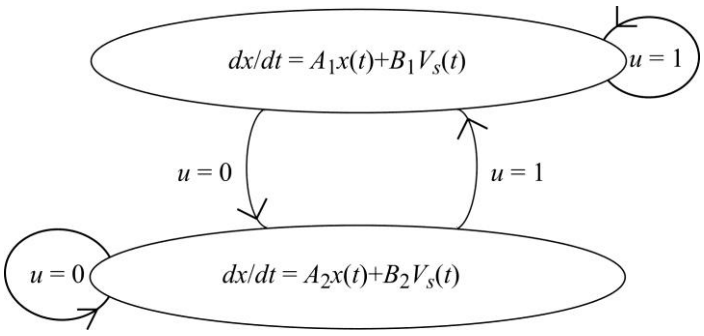


Рис.2. Модель DC-DC-преобразователя с непрерывным временем
Fig.2. Model of DC-DC converter with continuous time

Дискретно-временная модель. Построение подходящей МПСУ повышающего DC-DC-преобразователя для использования в прогнозирующей системе управления имеет принципиальное значение. Как видно из рис.3, после дискретизации модели во времени преобразователь может работать в двух основных различных режимах в зависимости от формы тока катушки. Таким образом,

$$x(i+1)=\begin{cases}(1+A_1T_s)x(i)+B_1T_sV_s(i), & u=1,\\ (1+A_2T_s)x(i)+B_2T_sV_s(i), & u=0,\end{cases}$$

где 1 – единичная матрица; T_s – интервал дискретизации.

Графическое представление повышающего DC-DC-преобразователя в виде автомата с дискретным временем приведено на рис.4.

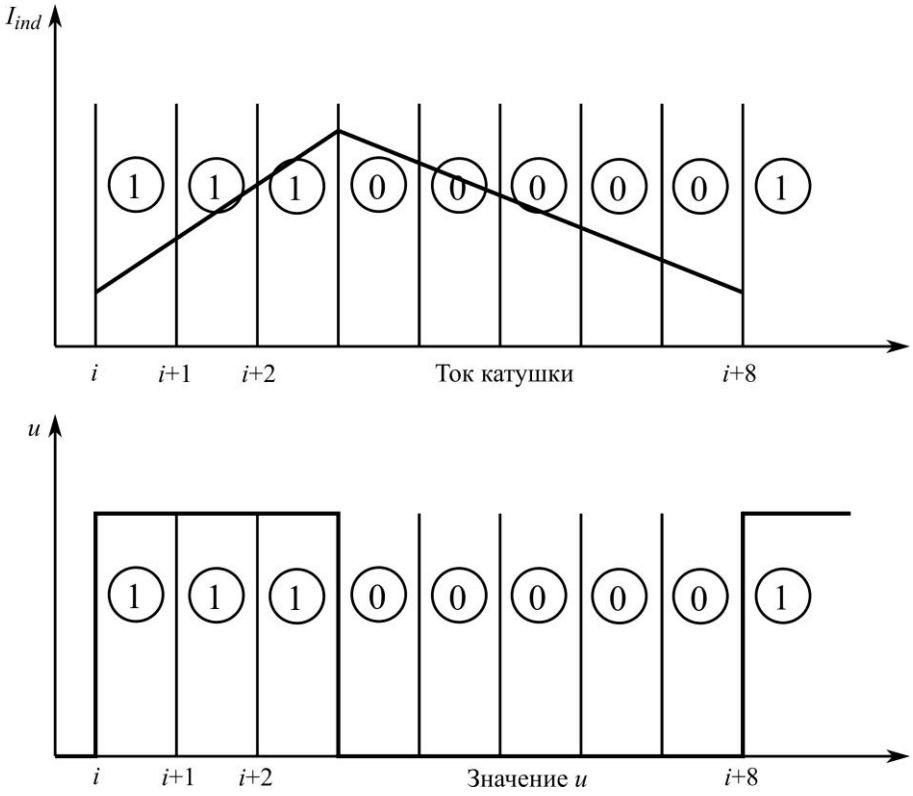


Рис.3. Режимы работы, использующиеся в математической модели
Fig.3. Operating modes used in the mathematical model

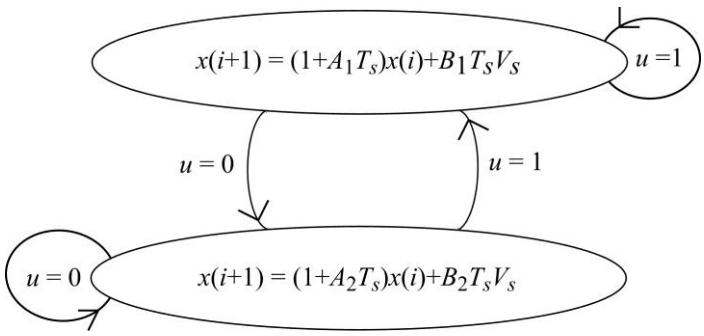


Рис.4. Дискретно-временная математическая модель DC-DC-преобразователя
Fig.4. Discrete-time mathematical model of a DC-DC converter

Кроме основных параметров тока катушки и выходного напряжения, блок вычисляет токовую нагрузку в данный момент времени I_{load}:

$$R_{load} = \frac{V_0}{I_{load}},$$

$$I_{load} = I_{ind} - \frac{C(V_0(i) - V_0(i-1))}{T_s},$$

$$I_{ind} = \sum_{i=1}^{5} I_L(i)\frac{V_s}{V_0}.$$

Модель прогнозирующей системы управления. Для DC-DC-преобразователя основная задача управления заключается в том, чтобы выходное напряжение точно отслеживало заданный эталон или, что эквивалентно, минимизировало ошибку выходного напряжения путем соответствующего манипулирования переключателем. Данное состояние должно поддерживаться, несмотря на изменения входного напряжения и нагрузки. Во время переходных процессов выходное напряжение должно возвращаться до его контрольного значения как можно быстрее и как можно с меньшим превышением.

МПСУ для повышающих DC-DC-преобразователей непосредственно управляет выходным напряжением путем манипулирования переключателем *S*. С помощью метода перечисления определяемая пользователем целевая функция минимизируется в зависимости от работы преобразователя.

Целевая функция. Целевая функция выбирается как

$$J(i) = \sum_{l=i}^{i+N-1}\left(\left|v_{0,err_V}(l+1|i)\right| + \lambda I_{0,err_I}(l+1|i)\right). \quad (1)$$

Она изменяет абсолютные значения выбивающихся из общего ряда переменных на конечном горизонте прогнозирования *N*. Первый член характеризует абсолютное значение ошибки выходного напряжения

$$v_{0,err}(i) = v_{0,ref} - V_0(i).$$

Второй член показывает абсолютное значение ошибки среднего тока через катушку:

$$I_{o,err}(i) = I_{0,ref} - I_{0_aver}(i),$$

$$I_{0,ref} = (1 + v_{0,ref} - V_0)\frac{I_{load}V_0}{V_s},$$

$$I_{0_aver}(i) = \frac{\sum_{l=i}^{i+N-1} I_0(l)}{N}.$$

Таким образом, второй член увеличивает ток зарядки (уменьшая время перехода при резком скачке опорного напряжения), улучшает стабильность работы при больших токах нагрузки.

Весовой коэффициент $\lambda > 0$ устанавливает компромисс между погрешностью выходного напряжения и необходимого тока. Он требуется в ситуациях при одновременном скачке опорного напряжения и нагрузки. В таких случаях возможен вариант, когда системе управления становится выгоднее медленно снижать выходное напряжение, а не увеличивать значение тока до нужного уровня. Следует отметить, что интервал

дискретизации T_s неявно накладывает верхнюю границу на частоту переключения, т.е. $f_{sw} < 1/(2T_s)$.

Задача оптимизации. Задача оптимизации, лежащая в основе МПСУ, сводится к минимизации целевой функции на временном шаге k (1) с учетом динамической модели преобразователя:

$$u(i) = \arg\min J(i).$$

Оптимизационная переменная – это последовательность переключающихся состояний за горизонтом, равная

$$U(k) = [u(k), u(k+1)...u(k+N-1)]^T.$$

Минимизация (1) дает оптимальную последовательность переключения $U(k)$. Из этой последовательности первый элемент $u^*(k)$ применяется к преобразователю. Процедура повторяется на следующем шаге $k + 1$, основываясь на новых измерениях, полученных в следующем экземпляре выборки.

Минимизация (1) является сложной задачей, так как это смешанная задача нелинейной оптимизации, которая в большинстве случаев решается путем прямого перебора всех возможных комбинаций состояний переключения ($u = 0$ или $u = 1$) на горизонте прогнозирования. Затем для каждой из 2^N последовательностей прогнозируется соответствующая траектория выходного напряжения и оценивается целевая функция. Оптимальная последовательность переключения получается путем выбора той, которая задает наименьшее значение целевой функции. Однако, зная примерную картину работы преобразователя и задавая заранее опорную частоту работы, можно существенно сократить количество вариантов для расчета. Перебирать можно не все возможные варианты последовательности U, а только возможное время, при котором преобразователь находится в одном из режимов. Таким образом исключается множество нереализуемых в реальности видов поведения устройства, что значительно понижает требуемую вычислительную мощность.

На рис.5 показан один из возможных способов реализации, при котором в горизонт прогнозирования укладываются три периода работы: $N = 3N_{per}$. При этом необязательно перебирать все N_1–N_7, так как существуют зависимости между ними:

$$\begin{aligned}
N_1 &\in (0; N_{per}),\\
N_2 &\in (0; N_{per} - N_1),\\
N_3 &\in (0; N_{per}),\\
N_4 &= N_{per} - N_3,\\
N_5 &\in (0; N_{per}),\\
N_6 &= N_{per} - N_5,\\
N_7 &= N - (N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6).
\end{aligned}$$

Следовательно, при прямом переборе количество вариантов $n = 2^{3N_{per}}$, а при модифицированном $n = \dfrac{N_{per}^3 (N_{per} - 1)}{2}$.

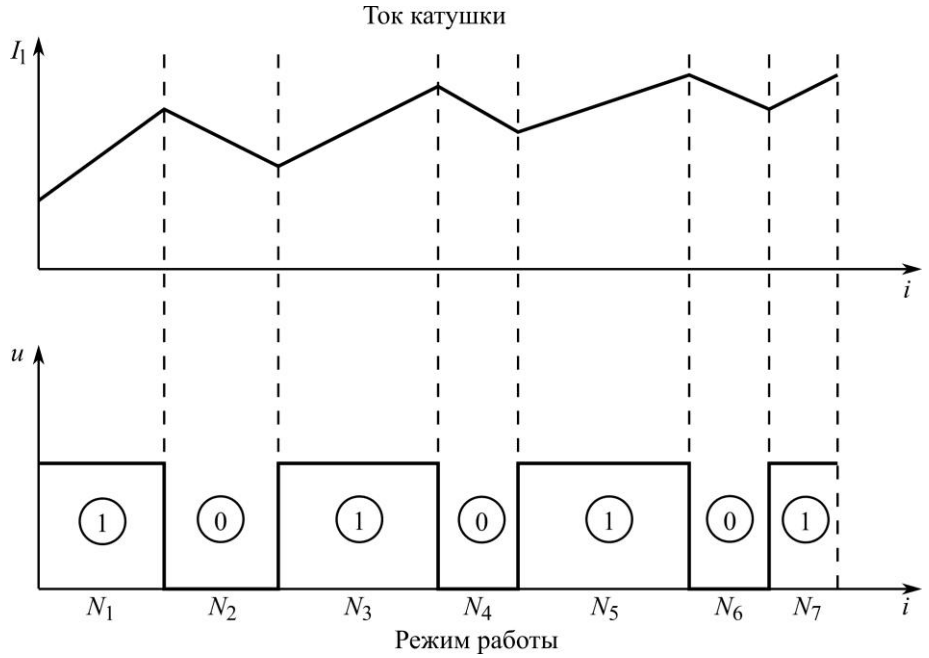


Рис.5. Ток катушки и режимы работы на горизонте прогнозирования
Fig.5. Inductor current and operating modes on the prediction horizon

Данный способ имеет потенциал к модификации. Используя метод блокировки переключения [11], можно добиться еще большего горизонта прогнозирования при уменьшении количества шагов дискретизации в одном периоде. Такой способ применим, так как высокая точность временных интервалов требуется только на первых шагах. Вследствие особенностей стратегии отступающего горизонта прогнозирования достаточно приблизительного решения. Грубый прогноз для второй части горизонта прогнозирования шаг за шагом смещается к началу и одновременно уточняется. Например, примем $N = 24$, $N_{per} = 8$. В случае прямого перебора необходимо рассчитать $n_0 = 16\,777\,216$ вариантов, а при использовании оптимизированного способа

$$n = \frac{8 \cdot 8 \cdot 8 \cdot (8-1)}{2} = 1792,$$

что в 9300 раз меньше.

Результаты симуляции. Схематичный алгоритм системы управления показан на рис.6, блок-схема устройства приведена на рис.7. Результаты моделирования демонстрируют работоспособность предлагаемой системы управления в нескольких рабочих условиях. Исследованы динамические характеристики системы при пуске преобразователя и проиллюстрированы отклики выходного напряжения на ступенчатые изменения опорного напряжения V_{ref}, входного напряжения V_s и нагрузки I_{load}.

Параметры схемы составляют: $L = 20$ мкГн; $R_L = 1$ мОм; $C_0 = 1200$ мкФ; $R_{key} = 22$ мОм. Ток нагрузки равен в среднем 2 А. Если не указано иное, входное напряжение $V_s = 6$ В, а выходное напряжение $V_0 = 8$ В.

Весовой коэффициент в целевой функции $\lambda = 0{,}1$, горизонт прогнозирования $N = 30$, интервал дискретизации $T_s = 2$ мкс.

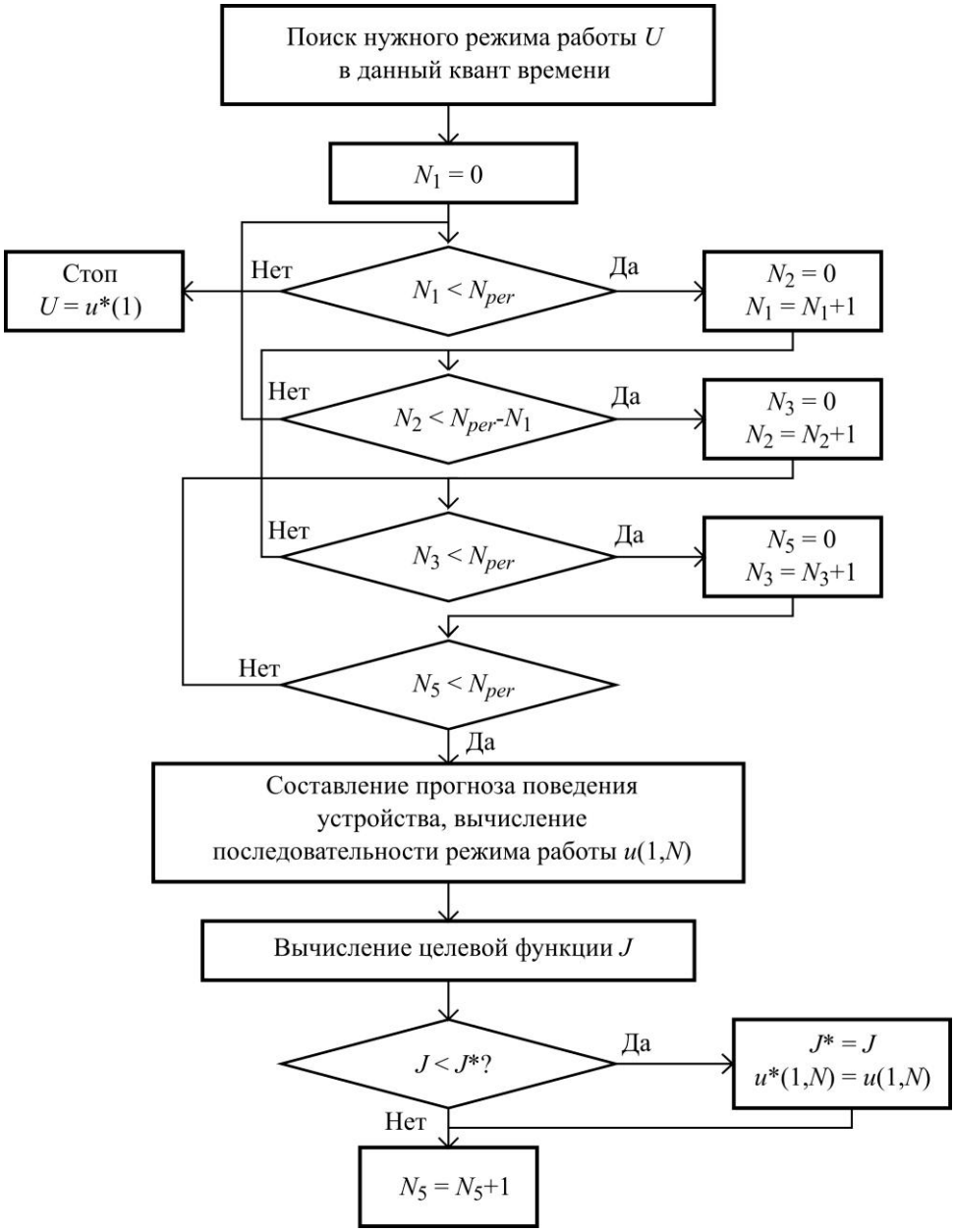


Рис.6. Алгоритм работы модифицированной МПСУ
Fig.6. Operation algorithm of the modified model predictive control

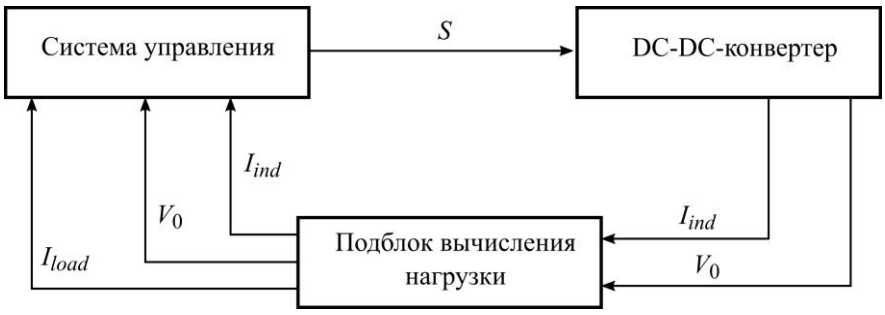
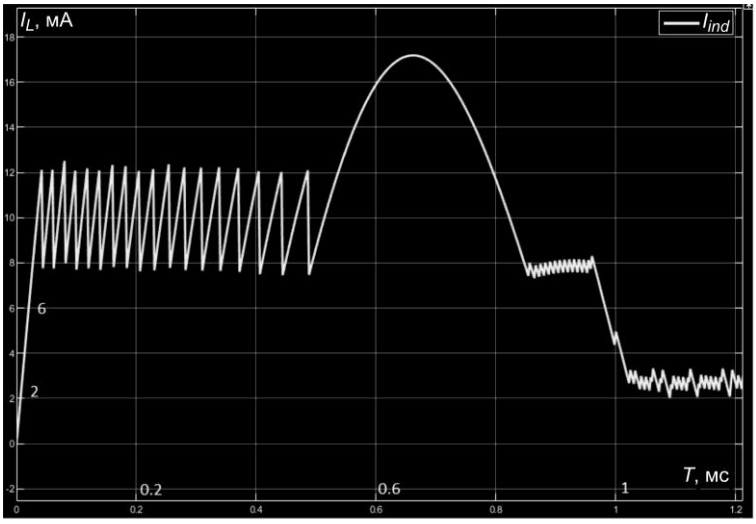
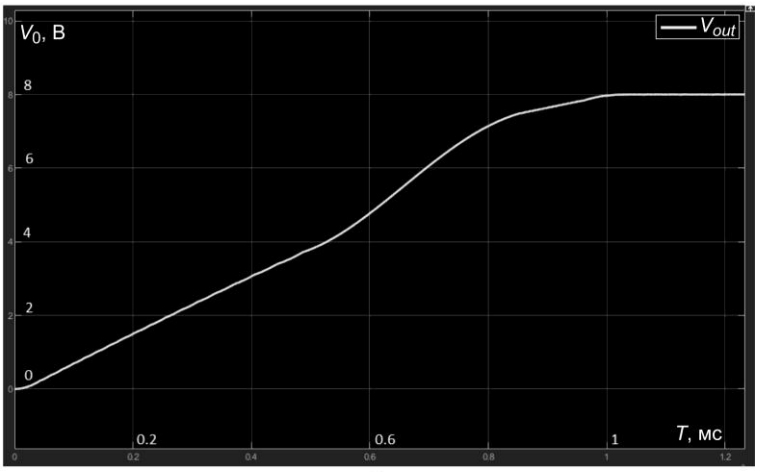


Рис.7. Блок-схема устройства
Fig.7. Block diagram of the device

Рассмотрим процесс запуска устройства. На рис.8 показан процесс выхода напряжения до необходимого значения, равного 8 В. Как видно из рис.8,*а*, до момента зарядки выходного конденсатора ток катушки заметно больше равновесного. Затем он падает до необходимого уровня. Работа устройства происходит на заданной заранее частоте, при этом видна неизбежная ошибка дискретизации, которая уменьшается при увеличении N_{per}. Заметно, что V_0 достигает нужного уровня за 1 мс без видимого превышения (рис.8,*б*).



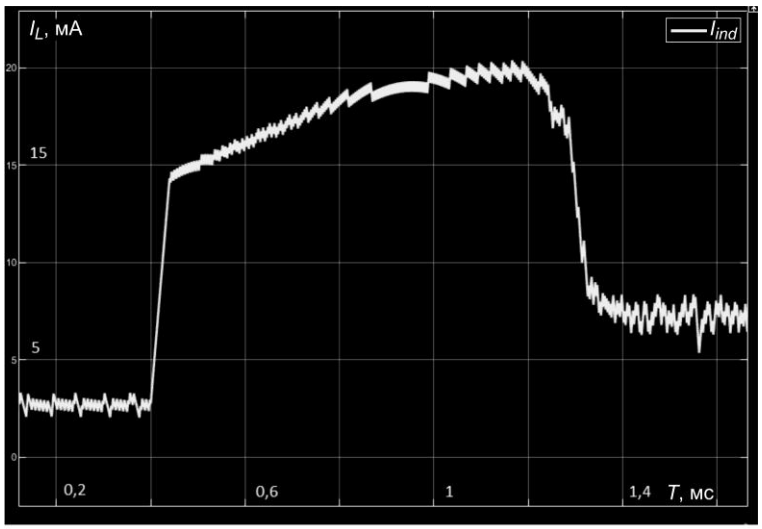
а



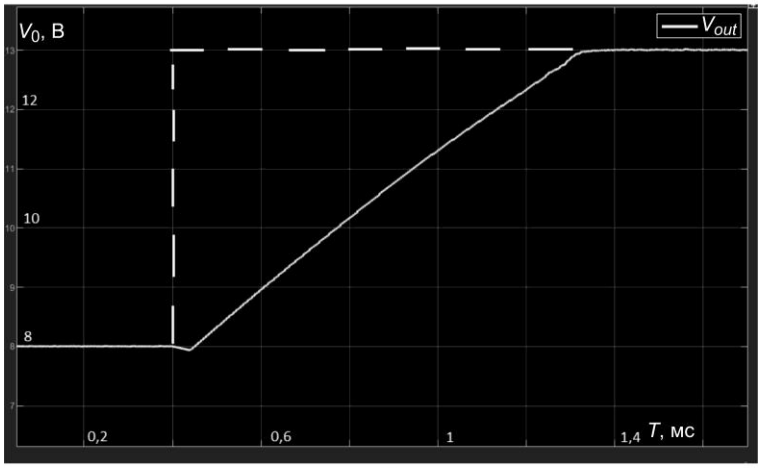
б

Рис.8. Результаты моделирования старта: *а* – ток катушки; *б* – выходное напряжение
Fig.8. Results of the launch simulation: *a* – inductor current; *b* – output voltage

Исследуем реакцию системы на резкое повышение необходимого уровня выходного напряжения. На рис.9 показан процесс выхода напряжения от начального уровня 8 В до необходимого значения 13 В. Как видно из рис.9,*а*, до момента зарядки выходного конденсатора ток катушки колеблется на уровне, близком к максимально допустимому



а

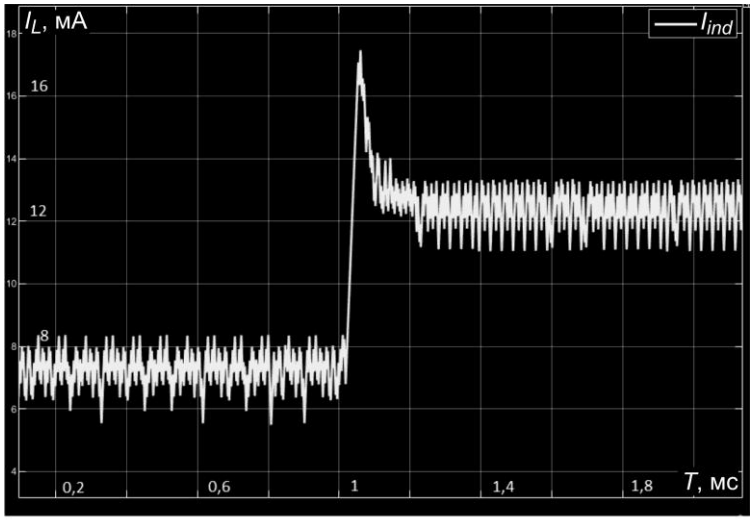


б

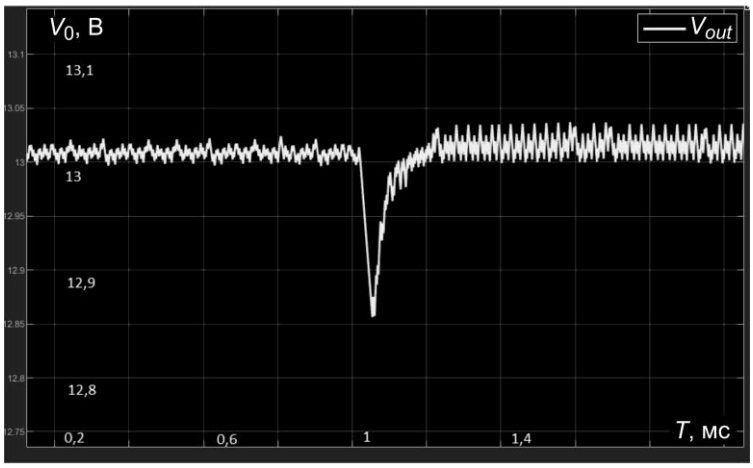
Рис.9. Результаты моделирования резкого повышения уровня опорного напряжения:
а – ток катушки; *б* – выходное напряжение
Fig.9. Simulation results of a sharp increase in the reference voltage level:
a – inductor current; *b* – output voltage

для данной катушки, а при приближении напряжения к нужному уровню падает. Работа устройства также происходит на заданной заранее частоте, при этом видна неизбежная ошибка дискретизации. Кроме того, выходное напряжение V_0 достигает нужного уровня за 1 мс без видимого превышения (рис.9,*б*). Небольшой провал вначале обусловлен тем, что системе необходимо резко увеличить ток через катушку.

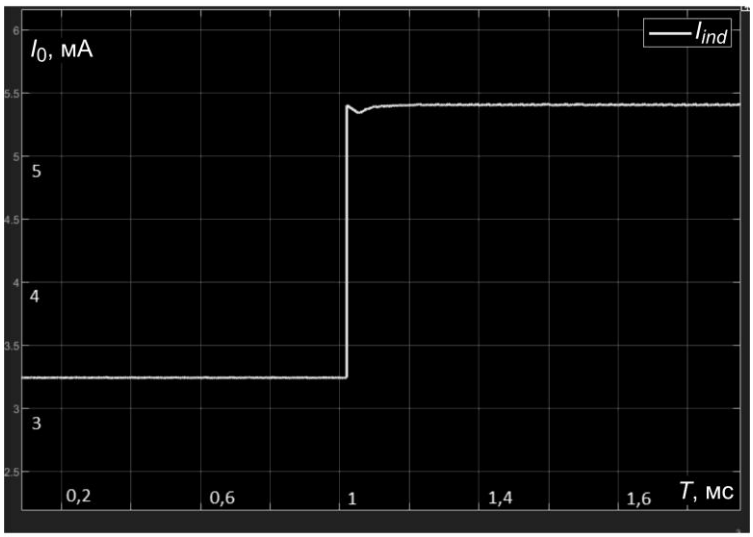
Рассмотрим случай резкого повышения уровня токовой нагрузки. На рис.10 показан процесс реакции напряжения на увеличение токовой нагрузки с 3,2 до 5,5 мА. Видно, что система достаточно быстро выходит на новый режим работы без серьезных отклонений.



а



б



в

Рис.10. Результаты моделирования резкого повышения уровня выходного тока:
а – ток катушки; *б* – выходное напряжение; *в* – выходной ток
Fig.10. Results of modeling a sharp increase in the output current level:
a – inductor current; *b* – output voltage; *c* – output current

Заключение. Реализованная модифицированная МПСУ повышающего DC-DC-преобразователя характеризуется относительной простотой настройки обратной связи для конкретных условий, быстрым откликом на изменяющиеся условия, высокой степенью робастности. Предложенный способ вычисления целевой функции заметно сокращает требуемую вычислительную мощность, расширяет горизонт планирования и тем самым значительно нивелирует основной недостаток, присущий прогнозирующим системам. Кроме того, реализованная модель модифицированной МПСУ работает на частотах, близких к постоянной заранее заданной частоте. Схема учета динамически изменяющейся нагрузки, используемая при расчете целевой функции, позволяет более точно реагировать на изменения внешних условий.

Результаты моделирования демонстрируют потенциальные преимущества предложенной модели модифицированной МПСУ, однако возможна дальнейшая доработка для большего сокращения требуемой вычислительной мощности и оптимизации работы устройства.

Литература

1. A stable design of PI control for DC-DC converters with an RHS zero / ***J. Alvarez-Ramirez, I. Cervantes, G. Espinosa-Perez et al.*** // IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundamental Theory and Applications. 2001. Vol. 48. Iss. 1. P. 103–106. DOI: https://doi.org/10.1109/81.903192

2. ***Sachin C.S., Nayak S.G.*** Design and simulation for sliding mode control in DC-DC boost converter // 2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). Coimbatore: IEEE, 2017. P. 440–445. DOI: https://doi.org/10.1109/CESYS.2017.8321317

3. ***Mayne D.Q., Rawlings J.B., Rao C.V., Scokaert P.O.M.*** Constrained model predictive control: Stability and optimality // Automatica. 2000. Vol. 36. Iss. 6. P. 789–814. DOI: https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00214-9

4. ***Gil-González W., Escobar-Mejía A., Montoya-Giraldo O.D.*** Model predictive direct power control applied to grid-connected voltage source inverters // 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Dubrovnik: IEEE, 2020. P. 610–614. DOI: https://doi.org/10.1109/PEDG48541.2020.9244406

5. ***Shi H., Zong J., Ren L.*** Modified model predictive control of voltage source inverter // 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chengdu: IEEE, 2019. P. 754–759. DOI: https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997737

6. ***Sun X., Zhou Y., Chen G., Ren B.*** Model predictive control of a phase-shifted full-bridge DC-DC converter // 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). Nanjing: IEEE, 2020. P. 2710–2714. DOI: https://doi.org/10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367652

7. ***Nguyen T.-L., Vu H.-C., Tran Q.-H., Lee H.-H.*** Voltage sensorless model predictive control of AC/DC matrix converters // 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). Nanjing: IEEE, 2020. P. 214–218. DOI: https://doi.org/10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9368177

8. Research on model predictive control method for multi-paralleled DC-DC converters / ***Z. Chen, B. Duan, G. Zhang et al.*** // 2019 3rd Conference on Vehicle Control and Intelligence (CVCI). Hefei: IEEE, 2019. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/CVCI47823.2019.8951733

9. Enumeration-based predictive control for buck DC-DC converter / ***Q. Huang, X. Yan, R. Ling et al.*** // 2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Chongqing: IEEE, 2017. P. 6700–6704. DOI: https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978383

10. ***Rawlings J.B., Mayne D.Q.*** Model predictive control theory and design. Madison, WI: Nob Hill, 2009. 533 p.

11. ***Karamanakos P., Geyer T., Manias S.*** Direct voltage control of DC-DC boost converters using enumeration-based model predictive control // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29. Iss. 2. P. 968–978. DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2256370

Поступила в редакцию 23.06.2021 г.; после доработки 22.07.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

Чердинцев Антон Александрович – инженер АО «Производственно-конструкторская компания Миландр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5), аспирант Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), antoncherdintsev@yandex.ru

Щагин Анатолий Васильевич – доктор технических наук, профессор Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), schagin4@rambler.ru

Лупин Сергей Андреевич – кандидат технических наук, профессор Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ird@miee.ru

References

1. Alvarez-Ramirez J., Cervantes I., Espinosa-Perez G., Maya P., Morales A. A stable design of PI control for DC-DC converters with an RHS zero. *IEEE Trans. Circuits Syst. I: Fundamental Theory and Applications*, 2001, vol. 48, iss. 1, pp. 103–106. DOI: https://doi.org/10.1109/81.903192

2. Sachin C.S., Nayak S.G. Design and simulation for sliding mode control in DC-DC boost converter. *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES).* Coimbatore, IEEE, 2017, pp. 440–445. DOI: https://doi.org/10.1109/CESYS.2017.8321317

3. Mayne D.Q., Rawlings J.B., Rao C.V., Scokaert P.O.M. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 2000, vol. 36, iss. 6, pp. 789–814. DOI: https://doi.org/10.1016/S0005-1098(99)00214-9

4. Gil-González W., Escobar-Mejía A., Montoya-Giraldo O.D. Model predictive direct power control applied to grid-connected voltage source inverters. *2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG).* Dubrovnik, IEEE, 2020, pp. 610–614. DOI: https://doi.org/10.1109/PEDG48541.2020.9244406

5. Shi H., Zong J., Ren L. Modified model predictive control of voltage source inverter. *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC).* Chengdu, IEEE, 2019, pp. 754–759. DOI: https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997737

6. Sun X., Zhou Y., Chen G., Ren B. Model predictive control of a phase-shifted full-bridge DC-DC converter. *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia).* Nanjing, IEEE, 2020, pp. 2710–2714. DOI: https://doi.org/10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367652

7. Nguyen T.-L., Vu H.-C., Tran Q.-H., Lee H.-H. Voltage sensorless model predictive control of AC/DC matrix converters. *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia).* Nanjing, IEEE, 2020, pp. 214–218. DOI: https://doi.org/10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9368177

8. Chen Z., Duan B., Zhang G., Wang T., Zhang C. Research on model predictive control method for multi-paralleled DC-DC converters. *2019 3rd Conference on Vehicle Control and Intelligence (CVCI).* Hefei, IEEE, 2019, pp. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/CVCI47823.2019.8951733

9. Huang Q., Yan X., Ling R., Hu Q., Yu D., Liu H. Enumeration-based predictive control for buck DC-DC converter. *2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC).* Chongqing, IEEE, 2017, pp. 6700–6704. DOI: https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978383

10. Rawlings J.B., Mayne D.Q. *Model predictive control theory and design.* Madison, WI, Nob Hill, 2009. 533 p.

11. Karamanakos P., Geyer T., Manias S. Direct voltage control of DC-DC boost converters using enumeration-based model predictive control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, vol. 29, iss. 2, pp. 968–978. DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2256370

Received 23.06.2021; Revised 22.07.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the authors:

Anton A. Cherdintsev – Engineer of the JSC «ICC Milandr» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5), PhD student, Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), antoncherdintsev@yandex.ru

Anatoly V. Shchagin – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), schagin4@rambler.ru

Sergey A. Lupin – Cand. Sci. (Eng.), Prof. of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), ird@miee.ru

УДК 621.38.049.77:004.94 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-547-553

Простой способ уточнения параметров SPICE-моделей ИС транзисторного уровня в температурном диапазоне

С.В. Шумарин, А.М. Богачев

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

bogachev-al2012@yandex.ru

На сегодняшний день разработчикам электроники доступны как макромодели, так и модели транзисторного уровня полупроводниковых ИС. Однако модели, учитывающие влияние дестабилизирующих воздействий, отсутствуют в открытом доступе, поэтому задачи разработки и уточнения моделей остаются актуальными. В работе рассмотрено существование корреляционной взаимосвязи между всеми параметрами моделей ИС транзисторного уровня и предложен способ уточнения этих параметров. Проведен опыт уточнения параметров модели ИС 1564ЛЕ1 ЭП. Для упрощения задачи уточнения все параметры изменены на одинаковое относительное отклонение. Для проверки внесенного предположения проведен натурный эксперимент: измерена частота сигнала кольцевого генератора на основе 1564ЛЕ1 ЭП в температурном диапазоне. Выполнено моделирование кольцевого генератора, проведено сравнение зависимостей частоты автоколебаний от температуры, полученных в результате моделирования и эксперимента до и после уточнения параметров модели. Сопоставлены формы сигнала кольцевого генератора для исходной и уточненной моделей. Проанализированы результаты полученных зависимостей частоты автогенерации, формы сигнала до и после уточнения модели. Результаты исследования свидетельствуют о возможности использования внесенного предположения для уточнения параметров модели ИС транзисторного уровня.

Ключевые слова: SPICE-модель; моделирование; ИС; кольцевой генератор

Для цитирования: Шумарин С.В., Богачев А.М. Простой способ уточнения параметров SPICE-моделей ИС транзисторного уровня в температурном диапазоне // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 547–553. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-547-553

© С.В. Шумарин, А.М. Богачев, 2021

A Simple Method of Transistor-Level SPICE-Models Parameters Fitting of Integrated Circuits in a Temperature Range

S.V. Shumarin, A.M. Bogachev

Vladimir State University, Vladimir, Russia

bogachev-al2012@yandex.ru

Abstract: Today, both macromodels and transistor-level models of semiconductor integrated circuits are available. However, most models don't take into account the influence of destabilizing effects. Thus, the tasks of developing new models and fitting the parameters of existing ones are very relevant. In this work, the authors introduced an assumption about the existence of a correlation relationship between all the parameters of integrated circuits' transistor-level models and offered a way to fit these parameters. The experience of fitting the model's parameters of the integrated circuit 1564LE1 EP was presented. To simplify this task, all parameters were altered by the same relative deviation. To check the assumption made, the authors carried out full-scale experiment, in which the frequency of the self-oscillation of the ring oscillator based on the 1564LE1 EP was measured in the temperature range. The simulation of the ring oscillator has been made using a SPICE-simulator. The dependences of the self-oscillation frequency on temperature, obtained as a result of simulation and as a result of experiment, were compared before and after fitting the parameters of the integrated circuit model. Also, the waveforms of the ring oscillator based on the original and fitted model were compared. The analysis of the obtained dependences of the frequency of oscillations, the signal shape before and after the model fitting, the link to the text of the fitted model has been provided. The results obtained show the possibility of using the introduced assumption to fit the parameters of the transistor-level integrated circuit model.

Keywords: SPICE-model; simulation; integrated circuit; ring oscillator

For citation: Shumarin S.V., Bogachev A.M. A simple method of transistor-level SPICE-models parameters fitting of integrated circuits in a temperature range. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 547–553. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-547-553

Введение. Разработка современных электронных схем с использованием SPICE-моделирования позволяет значительно экономить временные и материальные ресурсы по сравнению с традиционными методами. Многие зарубежные производители полупроводников предоставляют SPICE-модели своих изделий с целью увеличения спроса на них. Отечественные производители в этом вопросе несколько отстают от западных.

Следует отметить, что идентифицированные модели, учитывающие влияние дестабилизирующих воздействий (температурных, радиационных и механических), отсутствуют в открытом доступе. Однако потребность в таких моделях постоянно растет вследствие необходимости обеспечения конкурентоспособности при разработке электронной аппаратуры специальной техники. В России в условиях импортозамещения

этот процесс значительно ускорился. Соответственно, актуальна разработка новых или уточнение существующих SPICE-моделей ИС, особенно российского производства, с учетом дестабилизирующих воздействий. При этом подгонку модели можно проводить как по некоторой партии изделий, так и при необходимости для отдельного образца. Во втором случае точность моделирования выше, но и больше приведенные затраты на разработку, поэтому достаточно уточнить модель по выборочному среднему [1, 2].

Исследование взаимосвязи между параметрами модели. Создание SPICE-моделей ИС требует от производителей полупроводников существенного вложения средств. Одним из способов удешевления и упрощения этого процесса является экспорт моделей транзисторного уровня напрямую из САПР ИС [1, 2]. Преимущество моделей, использующих SPICE-модели MOSFET Level 3, заключается в их полноте и точности: моделирование схем подробно описывает форму сигналов по сравнению с обобщенными макромоделями [3]. Подобную продукцию можно встретить на российском рынке полупроводников.

Рассматриваемые SPICE-модели ИС состоят из множества соединенных транзисторов, каждый из которых описывается определенными параметрами. Некоторые из этих параметров содержат информацию о технологическом процессе производства и не могут быть получены без статистического анализа производственного процесса. Также имеется статистический разброс параметров каждого транзистора в пределах кристалла, который может быть обусловлен особенностями топологии и топографии, например разбросом ширины металлических проводников или эффективной длины каналов транзисторов [4]. Все эти факторы делают затруднительной и нецелесообразной подгонку параметров каждого отдельного транзистора для уточнения параметров модели ИС [5].

Все транзисторы кристалла произведены в едином технологическом процессе. Следовательно, можно предположить, что среди множества их параметров есть группа коррелированных, оказывающих наибольшее влияние на итоговые характеристики модели ИС, а влияние остальных параметров несущественно [6, 7]. Поэтому гипотетически для уточнения параметров SPICE-модели ИС транзисторного уровня допустимо изменять все ее параметры одновременно на одинаковое относительное отклонение.

Численные ограничения. Для практического использования введенного предположения необходимо ввести численные ограничения для варьирования параметров SPICE-моделей. Исходя из физического смысла описания системы уровней SPICE [3], единого максимального отклонения, на которое можно изменять все параметры SPICE-моделей MOSFET Level 3, не существует и не может существовать. Определение возможных диапазонов для каждого отдельного параметра – задача, требующая глубокого статистического анализа производства конкретных ИС. Но априори при варьировании всех параметров SPICE-моделей ИС в пределах 30 % от своего номинального значения нельзя превышать статистический разброс полупроводникового производства [4, 6]. Поэтому в рамках простого способа подгонки SPICE-моделей ИС транзисторного уровня предлагается ввести единое максимальное отклонение всех параметров ±30 % от своего номинального значения.

Уточнение параметров модели и анализ результатов. Для проверки внесенного предположения проведено уточнение SPICE-модели цифровой ИС по быстродействию ее логических элементов для учета температурных воздействий. Цифровая ИС 1564ЛЕ1 ЭП (производится на заводе «Экситон», г. Павловский Посад) представляет собой четыре логических элемента 2ИЛИ-НЕ [8]. Ее SPICE-модель, размещенная на официальном сайте производителя, содержит 301 строку с 1541 параметром. Данная модель – транзис-

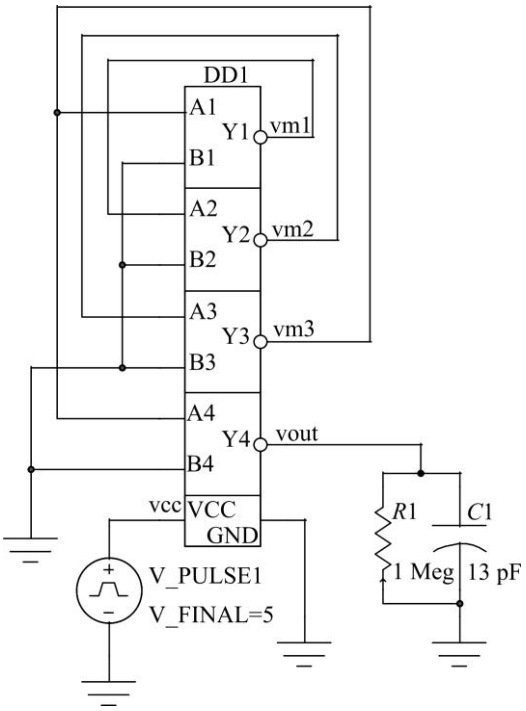


Рис.1. Принципиальная схема кольцевого генератора с буфером на базе ИС 1564ЛЕ1 ЭП
Fig.1. Circuit diagram of the ring oscillator with a buffer based on IC 1564LE1 EP

торного уровня, макромодель отсутствует [5, 9]. Для подгонки параметров модели этой ИС для учета температурных воздействий собран кольцевой генератор [10], электрическая схема которого приведена на рис.1. В нем используются три логических элемента 2ИЛИ-НЕ в качестве «кольца», четвертый элемент применяется в качестве буфера вывода для подключения нагрузки – осциллографа. Параметры SPICE-модели уточняли на основе сравнения результатов компьютерного моделирования с результатами физического эксперимента. Частоту автоколебаний измеряли на выходе схемы.

Эксперимент проведен в диапазоне температур от –40 до +60 °С с использованием макета с ИС 1564ЛЕ1 ЭП, термокамеры Termotron S-1.2B-3200, источника питания «Акип-1119 18В/5А» и осциллографа «Акип-4115/7А». Объем испытуемой партии 3 шт. Схема эксперимента показана на рис.2. Результаты физического эксперимента и компьютерного моделирования показаны на рис.3.

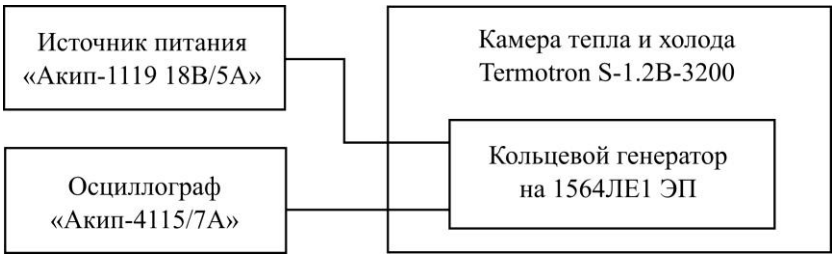


Рис.2. Схема эксперимента определения частоты автоколебаний кольцевого генератора на базе ИС 1564ЛЕ1 ЭП в температурном диапазоне
Fig.2. Scheme of the experiment for determining the frequency of self-oscillations of the ring oscillator based on the IC 1564LE1 EP in the temperature range

Как видно из рис.3, расхождение с экспериментом результатов SPICE-симулятора с моделью производителя составляет 8–23 % в зависимости от температуры эксплуатации. Уменьшение значений параметров модели на 14 % способом уточнения позволило снизить расхождение: не более 10 % в диапазоне от –40 до +60 °С и не более 5 % в диапазоне от –25 до +40 °С. Способ уточнения основан на обработке текстового описания модели собственным парсером и оптимизации ее параметров методом градиентного спуска. В качестве критерия оптимизации выбран минимум относительного отклонения частоты автоколебаний от результатов эксперимента во всем диапазоне температур.

Алгоритм уточнения модели. Уточнение параметров модели выполняли по следующему алгоритму:

1. Анализ файла модели, выявление в нем параметров и изменение их на заданную величину (не более 30 % без учета знака) с использованием парсера.

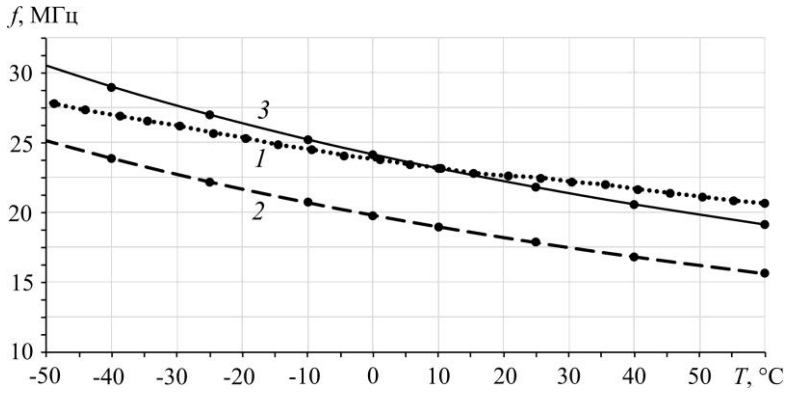


Рис.3. Частота автоколебаний кольцевого генератора в зависимости от температуры эксплуатации: *1* – натурный эксперимент; *2* – моделирование исходной SPICE-модели; *3* – моделирование уточненной SPICE-модели
Fig.3. The frequency of self-oscillations of the ring oscillator depending on the operating temperature: *1* – experimental data; *2* – modeling of the original SPICE-model; *3* – modeling of the fitted SPICE-model

2. Моделирование в SPICE-симуляторе.

3. Вычисление относительных отклонений значения частоты в диапазоне температур.

4. Выбор нового значения относительного изменения параметров в соответствии с методом градиентного спуска.

5. Повтор итераций до тех пор, пока не будут достигнуты удовлетворительные значения максимального и минимального относительного отклонений значений частоты кольцевого генератора, полученных в результате моделирования [11].

После уточнения параметров модели проведена оценка искажения выходного сигнала. Результаты моделирования рассматриваемой схемы с исходной и уточненной моделями приведены на рис.4.

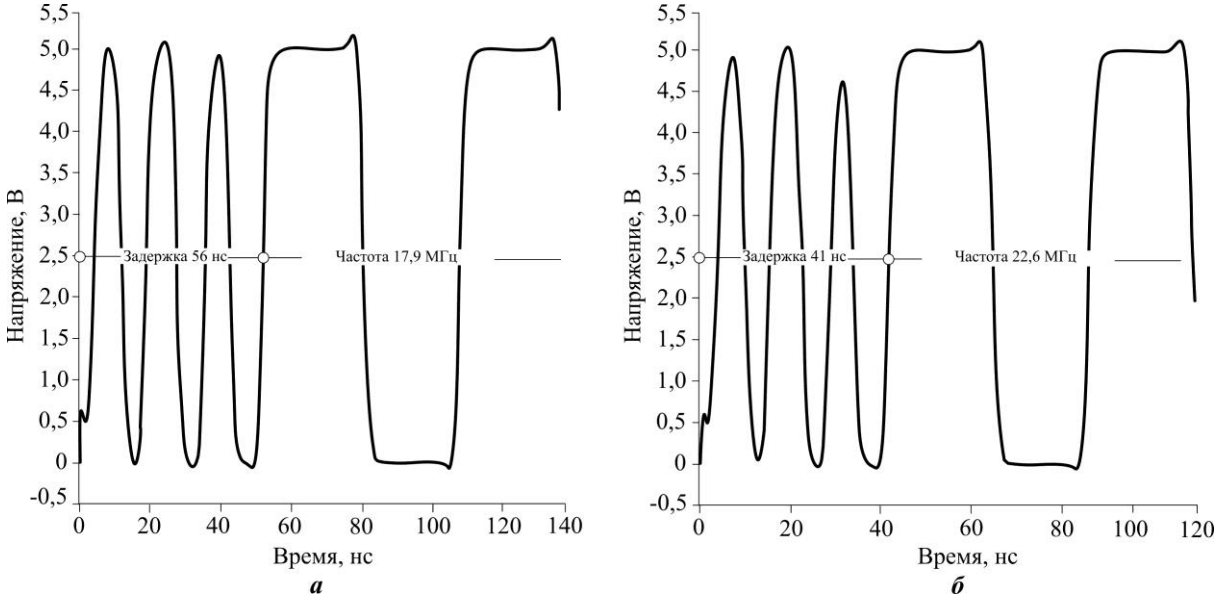


Рис.4. Осциллограммы выходного сигнала кольцевого генератора при температуре 25 °С: *а* – исходная модель; *б* – уточненная модель
Fig.4. Waveform of the output signal of the ring oscillator at temperature 25 °C: *a* – original model; *b* – fitted model

Как видно из рис.3 и 4, предлагаемый способ подгонки параметров SPICE-модели повысил ее адекватность во всем температурном диапазоне, в частности позволил скорректировать быстродействие логических элементов цифровой ИС без искажения формы выходного сигнала. Уточненная модель ИС 1564ЛЕ1 ЭП доступна по следующей ссылке: https://disk.yandex.ru/d/j5ge66WqlB5zow?w=1. Она отличается от исходной уменьшением значений всех (1541) параметров на 14 %.

Заключение. Полученные результаты согласуются с предположением о существовании корреляционной связи между всеми параметрами модели. Рассмотренный способ одновременного изменения параметров можно рекомендовать в качестве простого и быстрого средства уточнения SPICE-моделей ИС транзисторного уровня для учета дестабилизирующих воздействий и компенсации технологического разброса при производстве.

Литература

1. ***Kumar A., Indragandhi V., Maheswari U.Y.*** Software tools for the simulation of electrical systems: Theory and practice. 1st ed. Cambridge, MA: Academic Press, 2020. 422 p.

2. ***McConaghy T., Breen K., Dyck J., Gupta A.*** Variation-aware design of custom integrated circuits: A hands-on field guide. New York, NY: Springer New York, 2013. XVI, 188 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2269-3

3. ***Patel T.*** Comparison of Level 1, 2 and 3 MOSFET's // ResearchGate. 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1616.3442

4. ***Денисенко В.*** Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС. Ч. 1 // Компоненты и технологии. 2003. № 8 (34). С. 40–45.

5. ***Fitzpatrick D.*** Analog design and simulation using OrCAD capture and PSpice. 2nd ed. London: Newnes, 2018. 452 p. DOI: https://doi.org/10.1016/C2017-0-01791-3

6. ***Денисенко В.*** Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС. Ч. 2 // Компоненты и технологии. 2003. № 9 (35). С. 32–39.

7. FinFET modeling for IC simulation and design / eds. ***Y.S. Chauhan, D.D. Lu, S. Vanugopalan et al.*** 1st ed. Cambridge, MA: Academic Press, 2015. 304 p. DOI: https://doi.org/10.1016/C2013-0-06812-0

8. Технические характеристики интегральной схемы 1564ЛЕ1 // ОАО «ОКБ «Экситон»: [Электронный ресурс]. Изм.: 11.04.2016. URL: https://okbexiton.ru/pdf/mc1564le1.pdf (дата обращения: 28.04.2021)

9. ***Squire J., Brown J.*** Programming for electrical engineers. 1st ed. Cambridge, MA: Academic Press, 2020. 288 p.

10. А.с. № 149396. Способ определения устойчивости интегральных схем к воздействию импульса ионизирующего излучения / ***В.Н. Устюжанинов, И.М. Чуриков, В.М. Кулаков и др.***; приоритет 31.01.1980.

11. ***Arora R.K.*** Optimization: Algorithms and applications. London: Chapman and Hall/CRC, 2015. 466 p.

Поступила в редакцию 26.07.2021 г.; после доработки 26.07.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

Шумарин Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, 600014, г. Владимир, пр. Строителей, 3/7), sergey.shumarin@gmail.com

Богачев Алексей Михайлович – аспирант кафедры биомедицинских и электронных средств и технологий Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (Россия, 600014, г. Владимир, пр. Строителей, 3/7), bogachev-al2012@yandex.ru

References

1. Kumar A., Indragandhi V., Maheswari U.Y. *Software tools for the simulation of electrical systems: Theory and practice.* 1st ed. Cambridge, MA, Academic Press, 2020. 422 p.

2. McConaghy T., Breen K., Dyck J., Gupta A. *Variation-aware design of custom integrated circuits: A hands-on field guide.* New York, NY, Springer New York, 2013. xvi, 188 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2269-3

3. Patel T. Comparison of Level 1, 2 and 3 MOSFET's. *ResearchGate.* 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1616.3442

4. Denisenko V. Simulation of transistor parameters scatter in CMOS VLSI. Part 1. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies,* 2003, no. 8 (34), pp. 40–45. (In Russian).

5. Fitzpatrick D. *Analog design and simulation using OrCAD capture and PSpice.* 2nd ed. London, Newnes, 2018. 452 p. DOI: https://doi.org/10.1016/C2017-0-01791-3

6. Denisenko V. Simulation of transistor parameters scatter in CMOS VLSI. Part 2. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies,* 2003, no. 9 (35), pp. 32–39. (In Russian).

7. Chauhan Y.S., Lu D.D., Vanugopalan S., Khandelwal S., Duarte J.P., Paydavosi N., Niknejad A., Hu Ch., eds. *FinFET modeling for IC simulation and design.* 1st ed. Cambridge, MA, Academic Press, 2015. 304 p. DOI: https://doi.org/10.1016/C2013-0-06812-0

8. Technical characteristics of the integrated circuit 1564LE1. *JSC "OKB "Exiton".* Available at: https://okbexiton.ru/pdf/mc1564le1.pdf (accessed: 28.04.2021). (In Russian).

9. Squire J., Brown J. *Programming for electrical engineers.* 1st ed. Cambridge, MA, Academic Press, 2020. 288 p.

10. Ustyuzhaninov V.N., Churikov I.M., Kulakov V.M., Malinin V.G., Rusakov V.A. *Method of determining the integrated circuits stability to the effects of an ionizing radiation pulse,* USSR inventor's certificate No. 149396. Priority date 31.01.1980. (In Russian).

11. Arora R.K. *Optimization: Algorithms and applications.* London, Chapman and Hall/CRC, 2015. 466 p.

Received 26.07.2021; Revised 26.07.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the authors:

Sergei V. Shumarin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Biomedical and Electronic Systems and Technologies Department, Vladimir State University (Russia, 600014, Vladimir, Stroiteley ave., 3/7), sergey.shumarin@gmail.com

Aleksei M. Bogachev – PhD student of the Biomedical and Electronic Systems and Technologies Department, Vladimir State University (Russia, 600014, Vladimir, Stroiteley ave., 3/7), bogachev-al2012@yandex.ru

Уважаемые авторы!

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

УДК 621.396.967:621.396.621.51:623.746-519 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-554-564

Следящая фильтрация показаний радиолокационной станции при обнаружении БПЛА

Е.И. Минаков[1], Г.А. Валихин[1], А.В. Овчинников[1], С.С. Матвеева[2]

[1]Тульский государственный университет, г. Тула, Россия
[2]Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Россия

eminakov@bk.ru

Первичное обнаружение несанкционированного проникновения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на территорию охраняемого объекта осуществляется специализированными радиолокационными станциями (РЛС). Результаты работы РЛС используются для наведения систем распознавания и подавления БПЛА. В работе рассмотрены проблемы обнаружения и сопровождения БПЛА радиолокационной станцией. Проанализированы известные системы следящей фильтрации показаний РЛС и построена специализированная матричная система следящей фильтрации, учитывающая динамически изменяющийся энергетический потенциал РЛС. Для оценки эффективности разработанной матричной системы следящей фильтрации использованы методы математического моделирования, матричного исчисления, теории вероятности. Установлено, что разработанная система следящей фильтрации позволяет с наибольшей эффективностью инициировать траектории БПЛА, уточнять координаты их нахождения, устанавливать границы перемещения, учитывать характеристики РЛС, а также компенсировать пропуски цели, связанные с флуктуацией ее эффективной площади рассеяния. Повышение эффективности системы достигнуто за счет уменьшения ошибки определения прямоугольных координат целей разработанной системой следящей фильтрации в 2 раза по сравнению с известными алгоритмами следящей фильтрации. Полученные результаты позволяют легко масштабировать разработанную матричную систему следящей фильтрации положения цели для применения в составе любой РЛС.

Ключевые слова: обнаружение БПЛА; радиолокационная станция; следящий фильтр; фильтр Калмана; флуктуации ЭПР

Для цитирования: Минаков Е.И., Валихин Г.А., Овчинников А.В., Матвеева С.С. Следящая фильтрация показаний радиолокационной станции при обнаружении БПЛА // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 554–564. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-6-554-564

© Е.И. Минаков, Г.А. Валихин, А.В. Овчинников, С.С. Матвеева, 2021

Tracking Filter for Radio Surveillance upon UAV Detection

E.I. Minakov[1], G.A. Valikhin[1], A.V. Ovchinnikov[1], S.S. Matveeva[2]

[1]Tula State University, Tula, Russia
[2]Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia

eminakov@bk.ru

Abstract: Unsanctioned intrusion of unmanned aerial vehicle (UAV) on the territory of the guarded object is primarily detected by specialized radio surveillance systems. The results obtained by radio surveillance systems are used for aiming of UAV visual identification and radio jamming systems. In this work, the problems of UAV detection and tracking of the target trajectory are considered. The known tracking filter systems for radio surveillance application were analyzed and a specialized matrix tracking filter system was proposed, which uses in its algorithm a dynamically changing energy potential of the radio surveillance system. The developed tracking filter system efficiency is evaluated using methods of matrix calculation, mathematical modeling, and probability theory. It has been established that the developed tracking filter system lets the radio surveillance equipment most effectively initiate trajectories of UAV, set its movement window, consider radio surveillance equipment characteristics, and approximate the trajectory of UAV at times of missed detections connected to radar cross-section fluctuations of moving targets. A high efficiency of the developed system has been achieved by decreasing the inaccuracy of the target position prediction two times in comparison with the known tracking filter systems. The obtained results allow easy scaling of the developed tracking filter system for its application as a part of any radio surveillance system.

Keywords: UAV detection; radar; tracking filter; Kalman filter; RCS fluctuations

For citation: Minakov E.I., Valikhin G.A., Ovchinnikov A.V., Matveeva S.S. Tracking filter for radio surveillance UAV detection. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 554–564. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-554-564

Введение. Защита охраняемых объектов (аэропортов, атомных электростанций, нефтебаз) от проникновения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – важная задача, поскольку несанкционированное нахождение на объекте БПЛА может нести существенные риски безопасности персонала и информационной защите объекта [1]. Результаты видеофиксации территории режимного объекта могут быть использованы для подготовки различного рода диверсионных операций, а несанкционированное нахождение БПЛА на территории аэропорта приводит к приостановлению его деятельности и, как следствие, существенным экономическим потерям. В качестве БПЛА, проникающих на охраняемые объекты, как правило, используются БПЛА вертолетного типа: DJI Mavic 2 Pro, DJI Phantom 4 Pro. Розничная цена данного типа БПЛА составляет порядка 100 тыс. руб., а управление им не требует специальной подготовки оператора [2].

Первичное обнаружение и определение координат полета БПЛА на территории охраняемого объекта осуществляются с помощью специализированных радиолокационных станций (РЛС) разведки движущихся целей. Для исключения потерь при обнару-

жении целей данные РЛС за счет широкой диаграммы направленности антенны (ДНА) в угломестной плоскости (от 30°) перекрывают весь диапазон высот полета БПЛА. Подобное расширение ДНА приводит к увеличению ошибки определения координат цели, так как она пропорциональна ширине ДНА. Обнаруженные РЛС координаты цели передаются на средство оптического обнаружения для распознавания типа цели (птица, БПЛА, наземная движущаяся цель, помеха). Поле зрения средств оптического обнаружения, как правило, не превышает 3°, что предъявляет высокие требования к точности определения координат БПЛА радиолокационной станцией.

Повышение уровня точности определения координат БПЛА радиолокационной станцией можно достичь, увеличивая энергетический потенциал, но это негативно повлияет на энергопотребление комплекса, его эксплуатационную надежность, массогабаритные характеристики и уменьшит скрытность перед системами радиопеленгации. Альтернативный путь повышения уровня точности определения координат цели – улучшение характеристик и алгоритма работы системы следящей фильтрации положения цели [3]. Система следящей фильтрации отвечает за выделение и последующую аппроксимацию траектории движения БПЛА на основе его отдельных обнаружений.

Применение известных алгоритмов работы модуля обнаружения траектории движения цели не позволяет учитывать в весовых коэффициентах аппроксиматора уникальные динамически изменяющиеся параметры комплекса наземной разведки (форму диаграммы направленности, чувствительность, излучаемую мощность, тип сигнала). Также не учитывается отклонение траектории движения цели от выбранного типа полиномиальной функции, используемой для ее аппроксимации, что влечет за собой существенное увеличение ошибки определения прямоугольных координат целей [4]. Таким образом, с учетом необходимости повышения уровня точности определения координат БПЛА радиолокационной станцией совершенствование алгоритма работы системы следящей фильтрации, используемой для аппроксимации траектории движения БПЛА, является актуальной задачей.

Методика расчета. На сегодняшний день задача аппроксимации траектории движения БПЛА решается путем применения метода наименьших квадратов и фильтра Бенедикта – Борднера. Традиционные методы аппроксимации траектории имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение в области сопровождения маневрирующих БПЛА с флуктуирующей эффективной площадью рассеяния (ЭПР) и снижающих уровень точности определения координат цели [5]:

– коэффициенты усиления фильтров статичны и не могут быть адаптированы к разным значениям параметров движения цели, что увеличивает систематическую ошибку аппроксимации траектории движения цели;

– отсутствуют механизмы компенсации ложной корреляции динамических параметров цели, что снижает уровень точности определения координат цели;

– пропуски в обнаружении цели за счет флуктуации ее ЭПР приводят к уменьшению стабильности фильтра [1];

– фильтры не учитывают динамически изменяющиеся энергетические параметры РЛС, а также параметры усилительных устройств из ее состава.

Указанные недостатки можно устранить путем фильтрации показаний радиолокатора системой фильтров Калмана, адаптированной к характеристикам РЛС [6]. Фильтр Калмана является линейной оценочной функцией параметров цели, минимизирующей дисперсию ошибки определения параметров цели при условии точного моделирования ее динамических параметров и характеристик радиолокационного устройства. Система

фильтров Калмана учитывает в своей работе характеристики РЛС разведки БПЛА, что позволяет существенно уменьшить ошибки определения координат целей.

Для аппроксимации траектории полета БПЛА на основе отдельных обнаружений РЛС необходимо применить трехкоординатную систему следящей фильтрации. Реализовать данную систему фильтров возможно с применением матричных вычислений.

Согласно [7] известный алгоритм работы фильтра Калмана описывается следующей последовательностью выражений.

1. При обнаружении цели в секторе сканирования радиолокатор передает ее координаты в систему вторичной обработки, которая делает предсказание о положении цели при следующем сканировании по выражению

$$X^*_{n+1,n} = \Phi X^*_{n,n}, \tag{1}$$

где X^* – предсказанное положение цели; Φ – матрица изменения состояния цели.

2. При повторном обнаружении цели происходит фильтрация показаний РЛС по уравнению

$$X^*_{n,n} = X^*_{n,n-1} + H_n(Y_n - MX^*_{n,n-1}),$$

где H_n – матрица весовых коэффициентов; Y_n – матрица обнаруженных координат цели; M – матрица соответствия обнаружений РЛС с производными состояния цели.

3. Обновление весовых коэффициентов фильтра осуществляется по формуле [8]

$$H_n = S^*_{n,n-1}M^T(R_n + MS^*_{n.n-1}M^T)^{-1}, \tag{2}$$

где $S^*_{n,n-1}$ – матрица ошибок следящего фильтра;

$$S_{1,1} = \begin{bmatrix} \sigma_x{}^2(R) & \sigma_x\sigma_{\dot{x}} & \sigma_x\sigma_y & \sigma_x\sigma_{\dot{y}} & \sigma_x\sigma_z & \sigma_x\sigma_{\dot{z}} & \sigma_x\sigma_{\ddot{z}} \\ \sigma_x\sigma_{\dot{x}} & \sigma_{\dot{x}}{}^2(R) & \sigma_{\dot{x}}\sigma_y & \sigma_{\dot{x}}\sigma_{\dot{y}} & \sigma_{\dot{x}}\sigma_z & \sigma_{\dot{x}}\sigma_{\dot{z}} & \sigma_{\dot{x}}\sigma_{\ddot{z}} \\ \sigma_y\sigma_x & \sigma_y\sigma_{\dot{x}} & \sigma_y{}^2(R) & \sigma_y\sigma_{\dot{y}} & \sigma_y\sigma_z & \sigma_y\sigma_{\dot{z}} & \sigma_y\sigma_{\ddot{z}} \\ \sigma_{\dot{y}}\sigma_x & \sigma_{\dot{x}}\sigma_{\dot{y}} & \sigma_y\sigma_{\dot{y}} & \sigma_{\dot{y}}{}^2(R) & \sigma_{\dot{y}}\sigma_z & \sigma_{\dot{y}}\sigma_{\dot{z}} & \sigma_{\dot{y}}\sigma_{\ddot{z}} \\ \sigma_z\sigma_x & \sigma_z\sigma_{\dot{x}} & \sigma_z\sigma_y & \sigma_z\sigma_{\dot{y}} & \sigma_z{}^2(R) & \sigma_z\sigma_{\dot{z}} & \sigma_z\sigma_{\ddot{z}} \\ \sigma_{\dot{z}}\sigma_x & \sigma_{\dot{z}}\sigma_{\dot{x}} & \sigma_{\dot{z}}\sigma_y & \sigma_{\dot{z}}\sigma_{\dot{y}} & \sigma_z\sigma_{\dot{z}} & \sigma_{\dot{z}}{}^2(R) & \sigma_{\dot{z}}\sigma_{\ddot{z}} \\ \sigma_{\ddot{z}}\sigma_x & \sigma_{\ddot{z}}\sigma_{\dot{x}} & \sigma_{\ddot{z}}\sigma_y & \sigma_{\ddot{z}}\sigma_{\dot{y}} & \sigma_z\sigma_{\ddot{z}} & \sigma_{\dot{z}}\sigma_{\ddot{z}} & \sigma_{\ddot{z}}{}^2(R) \end{bmatrix}.$$

Здесь значения типа $\sigma\,\sigma$ – ковариации между двумя величинами, связанными в случае обнаружения их РЛС в сферической системе координат.

Матрица ошибок РЛС R_n, входящая в состав формулы (2), определяется выражением

$$R_n = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 \\ \sigma_y^2 \\ \sigma_z^2 \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где $\sigma_x{}^2$, $\sigma_y{}^2$, $\sigma_z{}^2$ – дисперсия определения трехмерных координат цели.

4. Обновление матрицы ошибок следящего фильтра осуществляется по формуле

$$S^{*}_{n-1,n-1} = (I - H_{n-1}M)S^{*}_{n-1,n-2}, \tag{4}$$

где I – единичная матрица; H – матрица весовых коэффициентов следящего фильтра;

$$H_n = \begin{bmatrix} g_{xn} & 0 & 0 \\ \frac{h_{xn}}{T} & 0 & 0 \\ 0 & g_{yn} & 0 \\ 0 & \frac{h_{yn}}{T} & 0 \\ 0 & 0 & g_{zn} \\ 0 & 0 & \frac{h_{zn}}{T} \\ 0 & 0 & \frac{2k_{zn}}{T^2} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

5. Прогнозируется матрица ошибок следящего фильтра:

$$S^{*}_{n,n-1} = \Phi S^{*}_{n-1,n-1}\Phi^{T} + Q_n,$$

где Q_n – ковариация вектора шума динамической модели движения цели.

6. Если цель не обнаружена, при сканировании происходит предсказание будущего положения цели по формуле (1), значения весовых коэффициентов и матрицы ошибок следящего фильтра остаются неизменными.

В известной системе следящей фильтрации Калмана уравнения (3) и (4) заполнялись путем вычисления общего статичного значения ошибок определения координат цели радиолокационной станцией. Однако это не позволяет учитывать динамически изменяющийся энергетический потенциал РЛС и систематические ошибки измерения координат. Введем в заполнение матрицы ошибок следящего фильтра РЛС значение динамически изменяющегося энергетического потенциала за счет вычисления при каждом обнаружении цели ошибок определения координат цели в соответствии с (6). Оценим результаты работы полученной матричной системы следящей фильтрации по сравнению с фильтрами наименьших квадратов с растущей памятью и Бенедикта – Борднера:

$$\begin{gathered} \sigma_{\theta}(R) = \frac{0,5\theta_{0,5}}{\sqrt{\frac{S}{N}(R)}}, \\ \sigma_{\phi}(R) = \frac{0,5\varphi_{0,5}}{\sqrt{\frac{S}{N}(R)}}, \\ \sigma_{xc} = R_n \cos\sigma_{\varphi}(R)\cos\sigma_{\theta}(R), \\ \sigma_{yc} = R_n \cos\sigma_{\varphi}(R)\sin\sigma_{\theta}(R), \\ \sigma_{zc} = R_n \sin\sigma_{\varphi}(R), \end{gathered} \tag{6}$$

$$\sigma_{xp} = \sqrt{\sigma_{xc}^{\ 2} + \sigma_{xsys}^{\ 2}},$$
$$\sigma_{yp} = \sqrt{\sigma_{yc}^{\ 2} + \sigma_{ysys}^{\ 2}},$$
$$\sigma_{zp} = \sqrt{\sigma_{zc}^{\ 2} + \sigma_{zsys}^{\ 2}},$$

где $\varphi_{0,5}$, $\theta_{0,5}$ – ширина ДНА по углу места и азимуту соответственно; σ_{xc}, σ_{yc} σ_{zc} – динамически изменяющиеся значения ошибок определения положения цели РЛС; σ_{xp}, σ_{yp}, σ_{zp} – общие ошибки определения положения цели, учитывающие систематические ошибки топопривязки позиции РЛС (σ_{sys}); $\frac{S}{N}(R)$ – отношение сигнал/шум РЛС, полученное методом анализа результатов работы системы первичной обработки информации.

Результаты и их обсуждение. В качестве обнаруживаемого БПЛА используется DJI Mavic 2 Pro со следующими основными параметрами: максимальная скорость полета 20 м/с; максимальная скорость набора высоты 5 м/с; максимальная скорость снижения 3 м/с; максимальная высота полета над уровнем моря 6000 м; ЭПР 0,01 м^2.

БПЛА осуществлял облет территории охраняемого объекта по эллиптической траектории движения (полуоси траектории *a* и *b* равны 800 и 1200 м соответственно) с начальной высотой движения 250 м и периодическими изменениями высоты полета не более 50 м. Реальная траектория движения БПЛА приведена на рис.1.

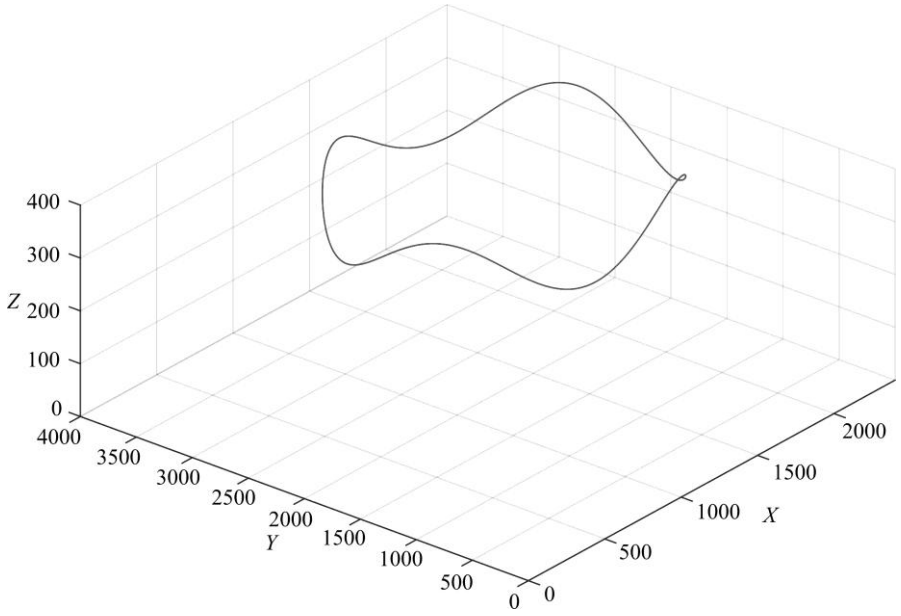


Рис.1. Реальная траектория движения цели
Fig.1. Real trajectory of UAV

РЛС охраны объектов в момент облета БПЛА охраняемой территории обнаруживала его. Необработанные результаты обнаружения приведены на рис.2. Из рисунка видно, что устойчивое сопровождение БПЛА радиолокационной станцией с заданными ошибками определения прямоугольных координат и наведение на БПЛА оптического средства распознавания типа цели без использования следящего сглаживающего

фильтра не представляются возможными. Проведем фильтрацию заданных на рис.2 данных фильтром Калмана, метод работы которого приведен в пп. 1–6 настоящей статьи. Результаты работы фильтра показаны на рис.3.

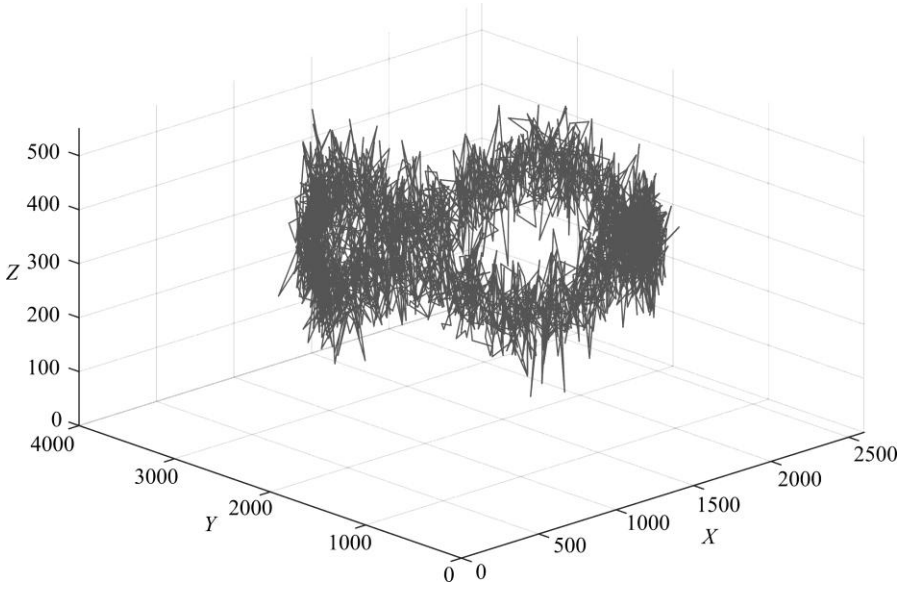


Рис.2. Необработанные результаты обнаружения БПЛА радиолокационной станцией охраны объекта
Fig.2. Unprocessed results of UAV detection with radio surveillance system

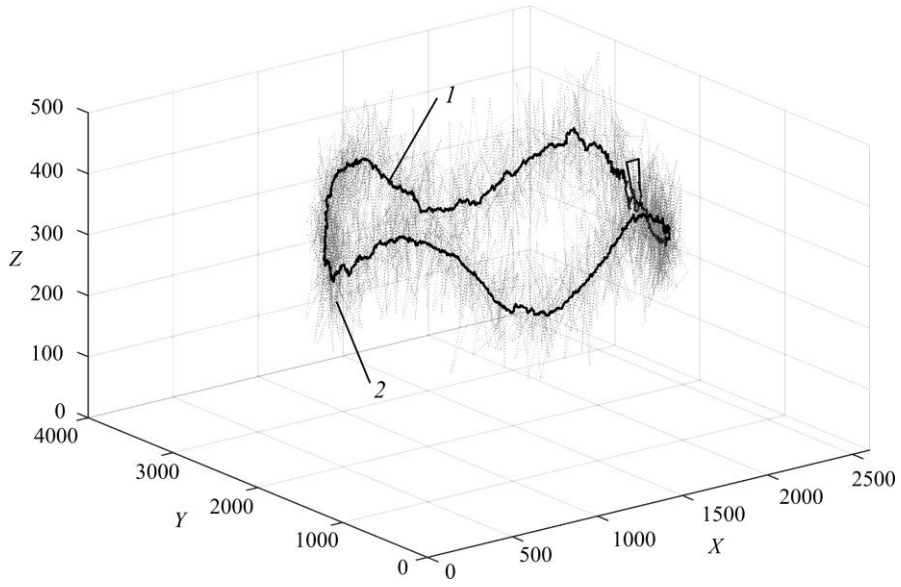


Рис.3. Результаты работы следящего фильтра с адаптацией весовых коэффициентов к энергетическим характеристикам РЛС (*1*) на фоне необработанных результатов обнаружения БПЛА (*2*)
Fig.3. Results obtained by procession with the developed tracking filter (*1*) and unprocessed radio surveillance detections on the background (*2*)

Резкие изменения положения цели на начальном участке полета после ее прохождения через следящий фильтр объясняются высокими ошибками фильтрации при начале завязки фильтром траектории движения.

Для определения эффективности разработанного алгоритма сравним результаты его работы с результатами, полученными при обработке значений, приведенных на рис.2, известными и широко распространенными методами следящей фильтрации: фильтром наименьших квадратов с растущей памятью, фильтром Бенедикта – Борднера. Результаты работы следящего фильтра с растущей памятью при сопровождении БПЛА представлены на рис.4.

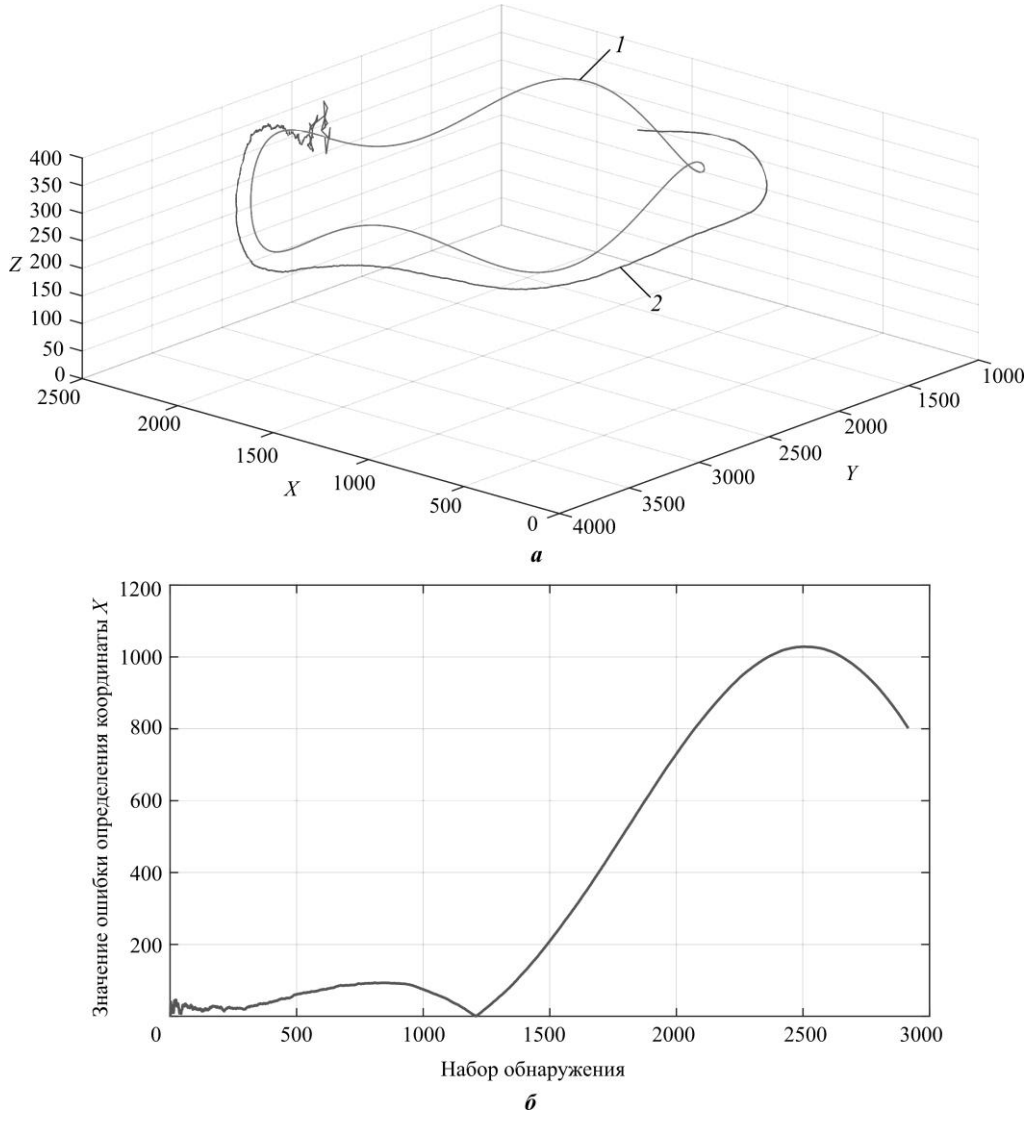


Рис.4. Результаты работы следящего фильтра с растущей памятью при сопровождении БПЛА: *1* – реальная траектория цели; *2* – обработка фильтром наименьших квадратов (*а*); значение ошибки определения координаты *X* цели РЛС (*б*)

Fig.4. Results of the procession of radio surveillance detections of the UAV by the growing memory tracking filter: *1* – real trajectory of the target; *2* – the filter processing using least square technique (*a*); the error of determination of UAV *X* coordinate positioning (*b*)

Как следует из рис.4, высокое значение ошибки определения координат цели при применении следящей фильтрации методом наименьших квадратов с растущей памятью обусловлено постепенным увеличением систематической ошибки определения координат цели. Также согласно рисунку высокое значение ошибки определения положения цели вызвано малыми значениями весовых коэффициентов следящего фильтра. Ошибка задержки реакции фильтра с растущей памятью периодична и увеличивается со временем. Малое значение ошибки задержки фильтра по оси *Z* связано с небольшой амплитудой перемещения цели по данной оси.

Уменьшение значения систематической ошибки задержки за счет увеличения случайной составляющей ошибки определения положения цели возможно при применении *g–h*-фильтра со статичными коэффициентами Бенедикта – Борднера. Результаты работы фильтра Бенедикта – Борднера представлены на рис.5. Значения срединных ошибок определения траектории движения БПЛА при работе следящих фильтров приведены в таблице.

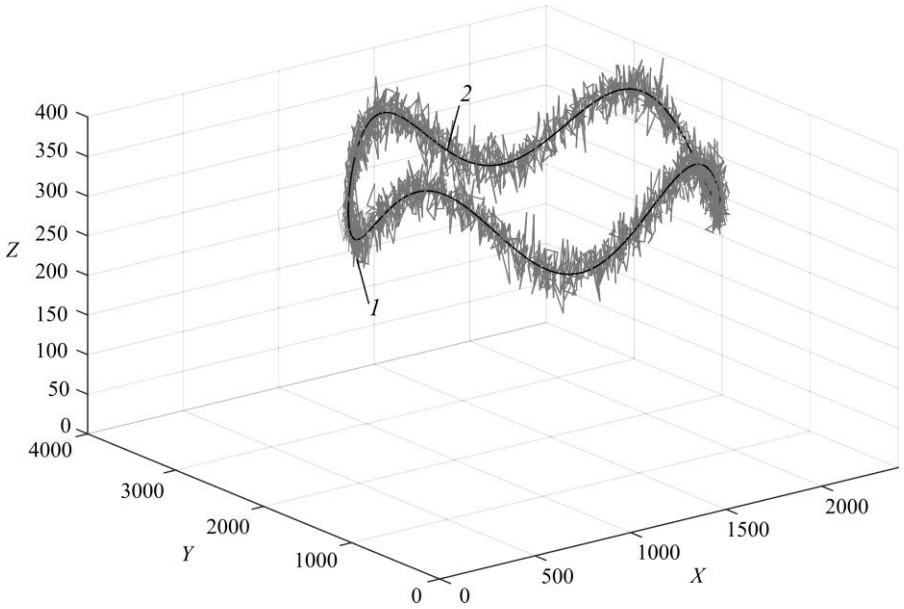


Рис.5. Результаты работы фильтра Бенедикта – Борднера (*1*) и траектория цели (*2*)
Fig.5. Results obtained by procession with the Benedict – Bordner tracking filter (*1*) and trajectory of the target (*2*)

Значения срединных ошибок определения траектории движения БПЛА
The values of median errors of the UAV position determination

Параметр	Метод фильтрации		
	Фильтр Калмана с адаптацией коэффициентов	Фильтр Бенедикта – Борднера	Фильтр с растущей памятью
Ошибка по оси *X*, м	8,02	17,78	400
Ошибка по оси *Y*, м	8,75	17,10	405
Ошибка по оси *Z*, м	8,19	17,09	32

Сравнение результатов, представленных на рис.3–5 и в таблице, показало, что использование матричной системы следящих фильтров Калмана с адаптацией весовых коэффициентов к динамически изменяющемуся энергетическому потенциалу РЛС позволяет существенно уменьшить значение срединной ошибки определения прямоугольных координат цели типа БПЛА. Применение описанного алгоритма следящей фильтрации позволяет уменьшить значение срединной ошибки определения координат цели в 2 раза по сравнению с фильтром Бенедикта – Борднера и в 50 раз по сравнению с фильтром наименьших квадратов с растущей памятью.

Применение матричной системы следящих фильтров Калмана с адаптацией весовых коэффициентов к динамически изменяющимся энергетическим параметрам РЛС при сопровождении БПЛА позволяет достичь оптимального соотношения систематической и случайных составляющих ошибки определения координат цели.

Заключение. Использование для обнаружения БПЛА матричной системы фильтров Калмана позволяет предсказывать положение цели при следующем обзоре РЛС и через заданное время после срыва сопровождения; уменьшать потенциальную ошибку обнаружения цели; уменьшать порог обнаружения цели и увеличивать вероятность ее обнаружения за счет исключения возможности завязки траектории шумовой составляющей; учитывать динамически изменяющийся энергетический потенциал РЛС.

При проектировании следящего фильтра особое внимание следует уделять ковариации вектора шума динамической модели движения цели и характеристикам РЛС. Правильный выбор значения ковариации позволяет компенсировать влияние на траекторию движения цели факторов, не учтенных при составлении уравнения фильтрации позиции цели, но влияющих на ее положение, – сопротивления воздуха, скорости ветра.

Использование в РЛС предложенного алгоритма следящей фильтрации позволяет уменьшить значение срединной ошибки определения координат БПЛА более чем в 2 раза по сравнению с известными методами следящей фильтрации.

Литература

1. ***Минаков Е.И., Валихин Г.А.*** Вероятность радиолокационного обнаружения флуктуирующих целей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 12-2. С. 159–164.

2. ***Валихин Г.А.*** РЛС охраны объектов // Сб. докл. по результатам проведения дня передовых технологий правоохранительных органов Российской Федерации. Балашиха: Учебный центр ОДОН Росгвардии, 2018. С. 76–78.

3. ***Куликова М.Е., Куликов Г.Ю.*** Численные методы нелинейной фильтрации для обработки сигналов и измерений // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 4. С. 64–98.

4. ***Деменков Н.П., Чан Д.М.*** Применение нечеткой модели к задаче фильтрации в нелинейных динамических системах // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2020. № 1 (130). С. 85–100. DOI: https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-85-100

5. ***Xu L., Ma K., Fan H.*** Unscented Kalman filtering for nonlinear state estimation with correlated noises and missing measurements // Int. J. Control Autom. Syst. 2018. Vol. 16. Iss. 3. P. 1011–1020. DOI: https://doi.org/10.1007/s12555-017-0495-2

6. ***Минаков Е.И., Валихин Г.А.*** Определение потерь распространения радиолокационной волны вблизи земной поверхности // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 24. № 1. С. 64–71. DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-64-71

7. ***Sudheesh P., Jayakumar M.*** Non linear tracking using unscented Kalman filter // Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems (SIRS-2017). Manipal: Springer International, 2018. P. 38–46. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67934-1_4

8. ***Han P., Ting C., Xi L.*** De-correlated unbiased sequential filtering based on best unbiased linear estimation for target tracking in Doppler radar // Journal of Systems Engineering and Electronics. 2020. Vol. 31. No. 6. P. 1167–1177. DOI: https://doi.org/10.23919/JSEE.2020.000089

Поступила в редакцию 28.07.2021 г.; после доработки 28.07.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

Минаков Евгений Иванович – доктор технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Тульского государственного университета (Россия, 300600, г. Тула, пр-т Ленина, 92), eminakov@bk.ru

Валихин Глеб Алексеевич – аспирант кафедры радиоэлектроники Тульского государственного университета (Россия, 300600, г. Тула, пр-т Ленина, 92), glebvalihin@yandex.ru

Овчинников Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники Тульского государственного университета (Россия, 300600, г. Тула, пр-т Ленина, 92), admin_telex@mail.ru

Матвеева Светлана Сергеевна – старший преподаватель департамента анализа данных и машинного обучения Финансового университета при Правительстве Российской Федерации (Россия, 125993, г. Москва, Ленинградский пр-т, 49), s.s.matveeva@gmail.com

References

1. Minakov E.I., Valikhin G.A. Probability of radio surveillance detection for fluctuating targets. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2016, no. 12-2, pp. 159–164. (In Russian).

2. Valikhin G.A. Radio surveillance system for objects protection. *Sbornik dokladov po rezul'tatam provedeniya dnya peredovykh tekhnologiy pravookhranitel'nykh organov Rossiyskoy Federatsii = Collection of the reports presented at the day of advanced technologies for Russian Federation security forces.* Balashikha, Uchebnyy tsentr ODON Rosgvardii Publ., 2018, pp. 76–78. (In Russian).

3. Kulikova M.V., Kulikov G.Yu. Numerical methods for nonlinear filtering of signals and measurements. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*, 2016, vol. 21, no. 4, pp. 64–98. (In Russian).

4. Demenkov N.P., Tran D.M. Application of a fuzzy model to the task of filtering in nonlinear dynamic systems. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroyeniye = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Instrument Engineering*, 2020, no. 1 (130), pp. 85–100. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-85-100

5. Xu L., Ma K., Fan H. Unscented Kalman filtering for nonlinear state estimation with correlated noises and missing measurements. *Int. J. Control Autom. Syst.*, 2018, vol. 16, iss. 3, pp. 1011–1020. DOI: https://doi.org/10.1007/s12555-017-0495-2

6. Minakov E.I., Valikhin G.A. Determination of propagation factor of a radar wave near Earth surface. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 64–71. (In Russian). DOI: 10.24151/1561-5405-2019-24-1-64-71

7. Sudheesh P., Jayakumar M. Non linear tracking using unscented Kalman filter. *Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems (SIRS-2017).* Manipal, Springer International, 2018, pp. 38–46. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67934-1_4

8. Han P., Ting C., Xi L. De-correlated unbiased sequential filtering based on best unbiased linear estimation for target tracking in Doppler radar. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2020, vol. 31, no. 6, pp. 1167–1177. DOI: https://doi.org/10.23919/JSEE.2020.000089

Received 28.07.2021; Revised 28.07.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the authors:

Evgeny I. Minakov – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Radioelectronics Department, Tula State University (Russia, 300600, Tula, Lenin ave., 92), eminakov@bk.ru

Gleb A. Valikhin – PhD student of the Radioelectronics Department, Tula State University (Russia, 300600, Tula, Lenin ave., 92), glebvalihin@yandex.ru

Aleksander V. Ovchinnikov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Radioelectronics Department, Tula State University (Russia, 300600, Tula, Lenin ave., 92), admin_telex@mail.ru

Svetlana S. Matveeva – Senior Lecturer of the Department of Data Analysis and Machine Learning, Financial University under the Government of the Russian Federation (Russia, 125993, Moscow, Leningradsky ave., 49), s.s.matveeva@gmail.com

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 004.75:324 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-565-579**

Разработка методики и комплекса программных средств для дистанционного электронного голосования на основе блокчейн-платформы Ethereum

В. Паскарь, Л.Г. Гагарина, В.В. Слюсарь

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

gagar@bk.ru

Перспективным способом процедуры дистанционного электронного голосования является использование блокчейн-платформы Ethereum. Однако при применении данной технологии возникает ряд проблем: обеспечение тайны голосования и открытости процедуры для общества, давление на избирателя и гарантия надежности системы в целом. В работе предложена методика построения дистанционного электронного голосования, решающая эти проблемы. По структуре она аналогична традиционному способу голосования: используется тот же принцип и процессы. Подробно описан процесс дистанционного электронного голосования на основе блокчейн-платформы Ethereum. Показано, что полученные голоса надежно хранятся в блокчейн-сети Ethereum, а правильность адресации голоса выбранному кандидату всегда можно проверить в режиме реального времени. Описан алгоритм смарт-контракта, который отправляет данные в блокчейн-сеть Ethereum, реализует передачу голоса от избирателя к кандидату с помощью транзакций и определяет победителя, набравшего наибольшее количество голосов. Показано, что в результате использования алгоритма хеширования keccak256 и подписи на основе эллиптической кривой secp256k1 транзакции максимально защищены, надежны и не подлежат отмене. Разработанная методика дистанционного электронного голосования на основе блокчейн-платформы Ethereum повышает эффективность безопасности и конфиденциальности данных, обеспечивает прозрачность и анонимность процедуры голосования, решает проблему принуждения участия в голосовании. Результаты работы реализованы программно и могут быть использованы не только в избирательной системе, но и в случаях, когда требуется дистанционное голосование.

Ключевые слова: дистанционное электронное голосование; безопасность; конфиденциальность; анонимность; смарт-контракт; мобильное приложение; веб-приложение; блокчейн; Ethereum

© В. Паскарь, Л.Г. Гагарина, В.В. Слюсарь, 2021

Для цитирования: Паскарь В., Гагарина Л.Г., Слюсарь В.В. Разработка методики и комплекса программных средств для дистанционного электронного голосования на основе технологии блокчейн-платформы Ethereum // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 565–579. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-565-579

Methods and Software Complex Development for Remote Electronic Voting Based on Ethereum Blockchain Platform

V. Pascari, L.G. Gagarina, V.V. Sliusar

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

gagar@bk.ru

Abstract: The most promising way to increase voters' confidence in the remote electronic voting (REV) procedure is a voting method based on Ethereum blockchain platform. However, the existing solutions using this method faced a range of problems: ensuring the secrecy of the vote and openness of the procedure for society, pressure on the voter and a guarantee of the reliability of the whole system. In this work, a method for constructing a REV is proposed that solves these problems. It is similar in structure to the traditional voting method, using the same principle and processes. The Ethereum blockchain based REV process is described in detail. It was shown that received votes are securely stored in the Ethereum blockchain network, and the correctness of the vote addressing to the selected candidate can always be checked in real time. The description of smart contract algorithm that implements the transfer of vote from voter to candidate using transactions and determines the winner who received the highest number of votes was provided. It was demonstrated that keccak256 hashing algorithm and secp256k1 elliptic curve signatures ensure transactions' maximum protection, reliability, and non-rollability. The developed REV technique based on Ethereum blockchain platform increases the efficiency of data security and confidentiality, transparency and anonymity of the voting procedure, and solves the problem of coercion. The results of the work have been implemented programmatically and can be used not only in the electoral system, but also wherever there is need of remote voting.

Keywords: remote electronic voting; security; privacy; anonymity; transparency; smart contract; mobile application; web application; blockchain; Ethereum

For citation: Pascari V., Gagarina L.G., Sliusar V.V. Methods and software complex development for remote electronic voting based on Ethereum blockchain platform. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 565–579. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-565-579

Введение. Актуальность дистанционного электронного голосования (ДЭГ) определяется потребностями современного общества. В настоящее время особой популярностью пользуются различные платформы и приложения, позволяющие эффективно реализовывать процессы управления удаленно в режиме реального времени с помощью Интернета. Поэтому ДЭГ становится особенно актуальным в жизнедеятельности региона / города / района, так как позволяет узнавать мнения граждан при принятии важных решений.

Однако при ДЭГ возникает проблема недоверия в связи с невозможностью гарантировать полную безопасность данных и защиту от взломов, обеспечивать тайну голосования и открытость процедуры для общества, а также надежность системы в целом. Наиболее перспективный способ решения этих проблем – голосование с использованием блокчейн-платформы Ethereum [1].

Структура блокчейна. Блокчейн состоит из блоков, соединенных в цепочку. По структуре каждый блок содержит в себе набор транзакций в виде некоторых данных (data), хеша блока (hash) и хеша предыдущего блока (hash of previous block). Данные хранятся внутри блока и зависят от назначения блокчейна. Хеш блока идентифицирует блок и его содержимое. Когда создается блок, вычисляется его хеш. Любое изменение внутри блока вызывает изменение хеша. Хеш предыдущего блока эффективно связывает блоки в цепочку, что способствует безопасности блокчейн-технологии (рис.1). Первый блок (Genesis block), называемый порождающим, не может указывать на предыдущий блок, так как он первый.

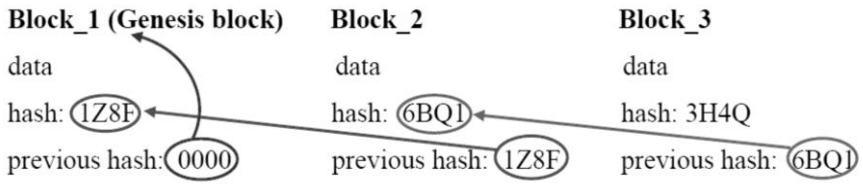


Рис.1. Цепочка из трех блоков
Fig.1. Chain of three blocks

Если изменить (фальсифицировать) блок, например Block_2, то изменится хеш этого блока (рис.2) и все следующие за ним блоки станут недействительными, так как они уже не хранят действительный хеш предыдущего блока.

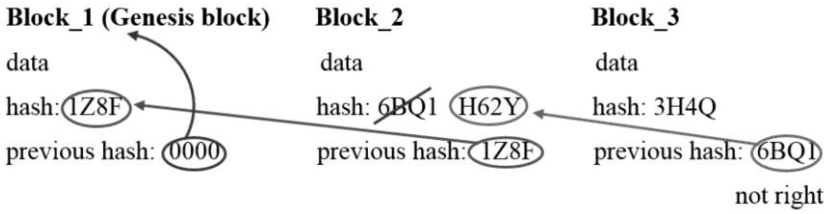


Рис.2. Изменение хеша блока
Fig.2. Changing the hash of a block

Использование хешей недостаточно для предотвращения фальсификации. Современные компьютеры могут существенно изменить блок и пересчитать все хеши других блоков, чтобы снова сделать блокчейн действительным (валидным). Поэтому в блокчейне используется механизм «доказательство работы». Он замедляет создание новых блоков и, следовательно, существенно затрудняет фальсификацию блоков. Например, если изменяется первый блок, требуется пересчитать «доказательство работы» для всех следующих за ним блоков. Таким образом, безопасность использования блокчейн-платформы Ethereum основана на совместном применении хеширования и «доказательства работы».

Надежность блокчейн-технологии реализуется согласно принципу децентрализованности [1]. Вместо использования центрального объекта для управления цепочкой в

блокчейне применяется одноранговая сеть (P2P network), доступная всем для подключения. Подключенный узел получает полную копию блокчейна и может проверить действительность цепочки.

Когда создается новый блок, он реплицируется всем подключенным к сети узлам. Каждый узел проверяет его достоверность. Если проверка хешей прошла успешно, узлы добавляют новый блок в свою копию блокчейна. Узлы в сети достигают консенсуса по отношению к действительности блоков. Фальсифицированные блоки отклоняются. Соответственно, для того чтобы успешно фальсифицировать цепочку блоков, следует для всех измененных и следующих за ними блоков повторить «доказательство работы» и взять под контроль более 50 % одноранговой сети для установки консенсуса. Только тогда фальсифицированный блок станет достоверным, что почти невозможно.

Блокчейн-платформа Ethereum позволяет решать различные задачи с помощью создания смарт-контрактов. В каждом контракте содержится база данных и представлены методы для работы с ней. Контракты реплицируются на все подключенные узлы, поэтому их база данных также реплицируется [2]. Когда вызывается метод контракта, обновляется база данных, команда реплицируется и воспроизводится по всей блокчейн-сети Ethereum. В результате достигается распределенный консенсус по выполнению обещания участниками контракта.

Результаты исследований проектов ДЭГ с использованием блокчейн-платформы Ethereum
Research results of REV projects using Ethereum blockchain platform

Предъявляемые требования	Проекты				
	eID-System (Швейцария)	Follow My Vote (США)	Voatz (США)	Активный гражданин (Россия)	Polys (Россия)
Однозначная идентификация избирателя	+	+	+	+	+
Одноразовая подача голоса избирателя	+	+	+	+	+
Анонимность процесса голосования	–	–	+	–	–
Возможность переголосовать	–	+	+	–	+
Достоверность переданного голоса избирателя	+	+	+	+	+
Корректность подсчета конечного результата	–	+	–	+	+
Возможность проверки результата голосования избирателем	–	+	–	+	+
Предотвращение возможности тайной подмены голоса избирателя	+	+	–	+	+
Предотвращение возможности несанкционированного вмешательства	+	+	–	–	+
Отказоустойчивость работы программно-технических средств	+	+	–	–	+

Примечание: + имеется возможность; – не имеется.

Результаты исследований похожих решений [3–7] ДЭГ с использованием блокчейн-платформы Ethereum приведены в таблице, где для каждого проекта указаны преимущества и недостатки.

Основными недостатками ДЭГ считаются нарушение тайны голосования и открытости процедуры для общества, давление на избирателя и отсутствие гарантии надежности системы в целом. Для устранения указанных недостатков необходимо решить следующие задачи:

– обеспечить конфиденциальность персональных данных избирателя с помощью QR-кода – идентификатора, сгенерированного на мобильном устройстве избирателя (некоего обезличенного ID), для анонимности процесса голосования использовать цифровую подпись на основе эллиптической кривой secp256k1;

– обеспечить прозрачность процедуры ДЭГ путем доступа в публичный регистр транзакций на ресурсе https://etherscan.io;

– решить проблему давления на избирателя посредством предоставления права избирателю изменять свой выбор без ограничений в период проведения голосования, но при подсчете результатов учитывать последний отправленный голос избирателя;

– обеспечить надежность процедуры ДЭГ за счет публичной децентрализованной блокчейн-сети Ethereum и алгоритма хеширования keccak256.

Методика построения ДЭГ на основе блокчейн-платформы Ethereum. Для вызова сетевого API Ethereum необходимы web3.j-библиотека и подключение к сетевому узлу Ethereum. Запустить узлы можно самостоятельно, также можно подключиться к уже существующим через мост / прокси (например, использовать MetaMask или Mist).

Предлагаемая методика построения ДЭГ на основе технологии Blockchain-Ethereum включает в себя следующие этапы.

Подготовка к голосованию. Администратор ДЭГ регистрируется в браузере MetaMask (создается учетная запись в Ethereum с открытым и закрытым ключами) и публикует смарт-контракт для голосования в Ethereum. Далее добавляется оператор (уполномоченный проверять личность и право голоса пользователя мобильного приложения) и создается голосование: вносятся кандидаты, задаются период проведения выборов и сумма перевода эфира для голосования. Выставляется мобильное приложение на сайте Центральной избирательной комиссии (ЦИК), исполнительный комитет которой формирует списки голосующих и предоставляет их операторам.

Избиратели устанавливают приложение на свои мобильные устройства. При установке приложения на устройствах пользователей автоматически генерируются ключевая пара (закрытый и открытый ключи) и идентификатор / адрес избирателя в виде QR-кода (и в цифровом представлении). Закрытый (секретный) ключ пользователя k – это случайная последовательность длиной 256 бит из отрезка [1, p–1], где p – простой порядок эллиптической кривой. Эту последовательность также можно представить в виде некоторого большого числа k. Открытый (публичный) ключ K генерируется на основе закрытого и представляет собой координату точки на эллиптической кривой:

$$K = Gk,$$

где G – образующая точка эллиптической кривой.

Поскольку результатом данной функции являются координаты, то для представления в виде открытого ключа нужно их выровнять до 32-байтных слов и конкатенировать друг с другом.

Между адресом пользователя в блокчейн-сети Ethereum и его открытым ключом устанавливается непосредственная связь для того, чтобы не тратить дополнительного

места (64 байт) в каждой транзакции для хранения открытого ключа. Адрес пользователя представляет собой последовательность из 20 байт, полученную из открытого ключа следующим преобразованием:

$$\text{addr} = \text{right}\left(\text{keccak256}\left(K\right), 20\right),$$

где keccak256 – хеш-функция из библиотеки SHA3 [8].

После кодирования хеш-функция возвращает массив из 32 байт. Поэтому для получения адреса следует обрезать первые 12 байт, полученные в результате кодирования, которые соответствуют 24 символам в шестнадцатеричной записи. Адрес используется для идентификации пользователя мобильного приложения в блокчейн-сети Ethereum, на него можно отправлять эфир. Адреса хранятся в отдельном файле, каждый в шестнадцатеричном представлении с префиксом «0x». Далее избиратель направляется в пункт проверки личности.

Подтверждение личности. Для подтверждения личности избирателя ЦИК выделяет время перед началом выборов (например, в период проведения предвыборной кампании). Процесс подтверждения личности аналогичен идентичному процессу при традиционном способе голосования. Чтобы принять участие в голосовании, необходимо подтвердить свое гражданство в данной юрисдикции. Для этого избиратель предъявляет оператору документ, удостоверяющий личность. Оператор верифицирует личность избирателя и отмечает в списках голосующих, избиратель подтверждает верификацию своей подписью. В результате доступ к голосованию имеют только те избиратели, которые имеют на это право. Данный этап необходим для доступа избирателей к ДЭГ.

Регистрация. Оператор регистрирует избирателя в блокчейн-сети Ethereum с помощью сканера QR-кода, отсканировав его в мобильном приложении избирателя. QR-код идентифицирует адрес избирателя в блокчейн-сети Ethereum, и на адрес избирателя автоматически начисляется эфир для голосования.

Процесс голосования. Избиратель выбирает кандидата в приложении и отправляет свой голос (эфир) в смарт-контракт на адрес кандидата вместе с хешем номера своей учетной записи и подписью этого хеша. Используется закрытый ключ для цифровой подписи хеша. Алгоритм подписи [9] сначала генерирует эфемерный (временный) закрытый ключ q случайным образом из отрезка [1, p–1], где p – простой порядок кривой secp256k1. Данный ключ используется при вычислении значений r и s для гарантии того, что фактический закрытый ключ отправителя не может быть вычислен злоумышленниками, наблюдающими за подписанными транзакциями в Ethereum. Далее рассчитывается точка на кривой secp256k1:

$$\left(x_1, y_1\right) = Gq.$$

В криптосистеме на основе эллиптических кривых функция получения цифровой подписи [9] возвращает два числа – r, s:

$$\text{Sig} = \left(r, s\right),$$

$$r = x_1 \bmod p, \quad s \equiv q^{-1}\left(\text{keccak256}\left(m\right) + rk\right)\left(\bmod p\right).$$

Здесь r – временный открытый ключ; m – транзакция в кодировке RLP.

Перед тем как транзакция будет отправлена в Ethereum, она подписывается на узле с использованием одного из секретных ключей, доступных на данном узле. Транзакция

подписывается не вся, а только следующие данные: nonce, gasprice, gas, to, value, data. Перед подписанием эти данные представляются в виде набора байтов с помощью RLP-кодирования. В Ethereum к цифровой подписи также добавляется еще одно число – *v*. Оно позволяет упаковывать цифровую подпись в структуру размером 65 байт, а также несет информацию о том, на каких узлах Ethereum данная цифровая подпись может проверяться.

Далее смарт-контракт проверяет, допущен ли избиратель до голосования: вычисляет хеш номера адреса отправителя и сравнивает результат с предоставленным хешем. Используется открытый ключ для проверки цифровой подписи хеша. При проверке подписи избирателя закрытый ключ неизвестен и не раскрывается.

Проверка подписи – это обратный алгоритм относительно алгоритма генерации подписи с использованием значений *r*, *s* и открытого ключа избирателя для вычисления значения точки $Q(x_1, y_1)$ на эллиптической кривой secp256k1.

Для проверки цифровой подписи необходимо выполнить следующие шаги [9]:

Шаг 1. Убедиться, что *r* и *s* – целые числа из отрезка [1, *p*–1], в противном случае подпись недействительна.

Шаг 2. Вычислить: $w \equiv s^{-1} \bmod p$.

Шаг 3. Вычислить: $u_1 = \text{keccak256}(m) w \bmod p$.

Шаг 4. Вычислить: $u_2 = rw \bmod p$.

Шаг 5. Вычислить точку на кривой:

$$(x_1, y_1) \equiv u_1 G + u_2 K \,(\bmod p),$$

где *r* и *s* – значения подписи.

Если $(x_1, y_1) \equiv 0$, то подпись недействительна, если $r = x_1 \bmod p$, то подпись действительна. В случае успешной проверки эфир для голосования избирателя зачисляется на адрес кандидата.

Нерешительный избиратель или проголосовавший под давлением (например, когда руководство компании требует у сотрудников предоставить снимки экранов, подтверждающие их выбор) может изменить свой голос (переголосовать неограниченное количество раз) в период проведения голосования. Таким образом, решается проблема давления на избирателя.

Отданный голос записывается как транзакция в блокчейн-сети Ethereum. Он привязывается к определенному адресному пространству в Ethereum, которое указывается при выборе кандидата. По отданному голосу нельзя определить личность избирателя, так как используется криптография на основе эллиптических кривых и процесс регистрации происходит с помощью идентификатора (QR-кода) мобильного устройства избирателя.

Подсчет голосов. По окончании проведения голосования смарт-контракт автоматически определяет победителя (по количеству транзакций на адрес кандидата), набравшего наибольшее количество голосов. При подсчете голосов учитывается последний отправленный голос избирателя.

Проверка результатов голосования. Полученные голоса надежно хранятся в блокчейн-сети Ethereum, а правильность адресации голоса конкретному кандидату избиратель всегда может проверить в режиме реального времени, перейдя по ссылке «Моя транзакция» в мобильном приложении. Окончательные результаты голосования изби-

ратель может узнать в онлайн-режиме по завершении проведения голосования, перейдя по ссылке «Результаты голосования» в мобильном приложении. Чтобы убедиться, что голос избирателя учтен при подсчете результатов голосования, ему необходимо проверить публичный регистр транзакций, перейдя по ссылке «Все транзакции» в мобильном приложении.

Взаимодействие пользователей ДЭГ с блокчейн-платформой Ethereum происходит с помощью процедуры RPC (рис.3). При передаче данных используется сериализация данных методом RLP.

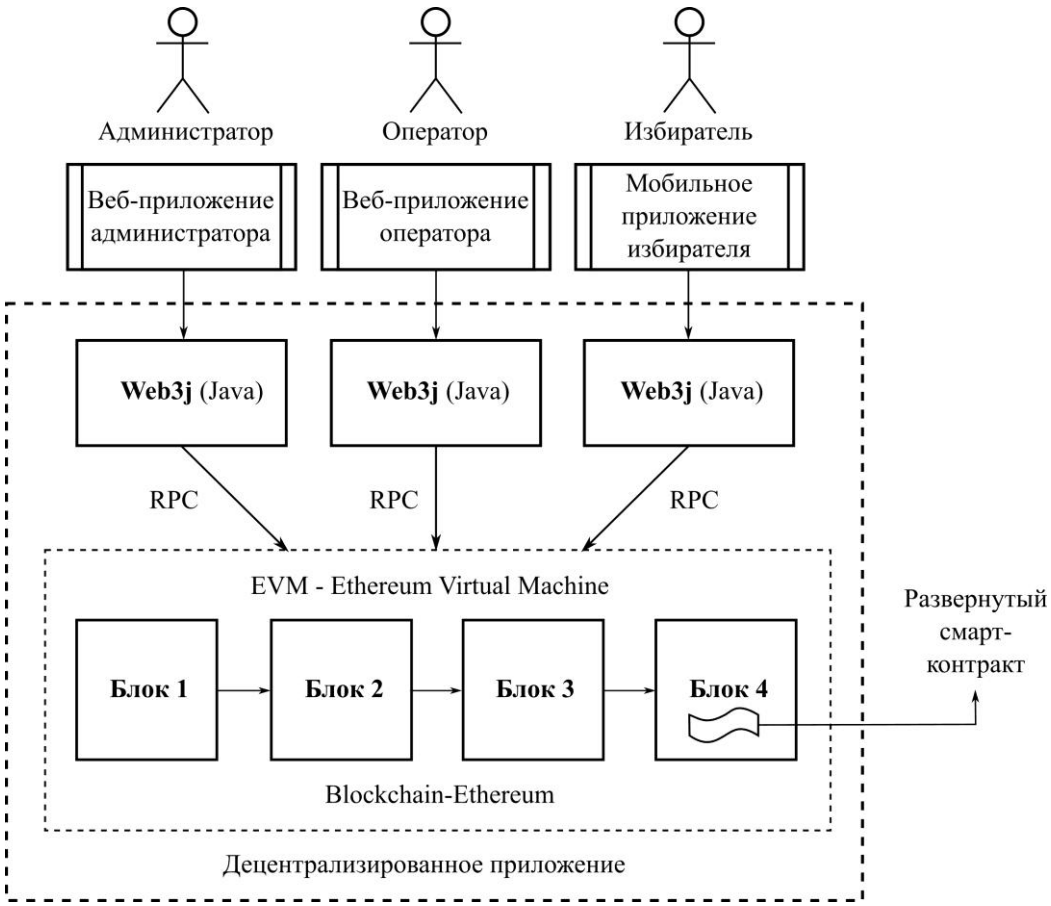


Рис.3. Диаграмма взаимодействия пользователей ДЭГ с блокчейн-платформой Ethereum
Fig.3. Diagram of interaction of REV users with Ethereum blockchain platform

Комплекс программных средств для ДЭГ. В предложенной методике ДЭГ программными средствами являются веб-приложения администратора и оператора, мобильное приложение избирателя и смарт-контракт для голосования, которые функционируют комплексно в процедуре ДЭГ.

Веб-приложение администратора. Интерфейс администратора представляет собой веб-сайт. Для авторизации необходимо ввести логин и пароль, которые задаются программно без возможности изменений. После успешной авторизации появляется главное меню «Выберите действие»:

1. Создание списка кандидатов.
2. Настройки голосования.
3. Просмотр результатов.
4. Просмотр транзакций.

В главном меню по первой ссылке администратор создает список кандидатов, отображающий в мобильном приложении избирателей. По второй ссылке администратор задает значения периода проведения голосования, который отображается в мобильном приложении во всплывающем окне перед началом голосования, и устанавливает сумму эфиров для голосования, чтобы избиратели смогли проголосовать. Задание проведения голосования автоматически влияет на активность кнопок «Отдать свой голос» и «Изменить свой голос» в мобильном приложении. Такой подход к процедуре голосования позволяет участвовать в выборах в день их проведения, а получать адресное пространство в сети Ethereum и эфиры для голосования до начала их проведения. По третьей ссылке администратор видит результаты голосования в виде списка кандидатов, напротив каждого кандидата – отданные голоса избирателей в процентном и количественном выражении, а также общее количество проголосовавших избирателей. Последняя ссылка в главном меню администратора показывает историю всех транзакций избирателей и может отследить любую из них. Для полной прозрачности процедуры голосования дополнительно есть ссылка на адрес смарт-контракта для голосования на ресурсе https://rinkeby.etherscan.io.

Веб-приложение оператора. Интерфейс оператора представляет собой веб-страницу, к которой подключен сканер QR-кода, для регистрации избирателей в сети Ethereum. Оператор также может вносить идентификатор мобильного устройства избирателя вручную.

Мобильное приложение избирателя. При открытии мобильного приложения неверифицированный пользователь видит сообщение: «Вы не можете принять участие в голосовании. Пройдите верификацию». Для прохождения верификации пользователь приложения обращается в местный уполномоченный орган, например МФЦ, подтверждает свою личность документально и предоставляет оператору (сотруднику МФЦ) автоматически сгенерированный идентификатор своего устройства (QR-код), нажав в правом верхнем углу экрана мобильного приложения на знак QR-кода. Далее осуществляется переход на следующую страницу приложения «Идентификатор вашего устройства», где изображен QR-код мобильного устройства для считывания сканером. На этой же странице, если нажать на кнопку «Показать идентификатор», появляется всплывающее окно, где указан QR-код в цифровом виде.

Успешно пройдя верификацию, избиратель видит меню выбора кандидатов. Сначала всплывает окно с информацией о периоде проведения голосования, который задается администратором, затем избиратель выбирает кандидата и нажимает на кнопку «Отдать свой голос». Далее избиратель перенаправляется на страницу «Результаты голосования» и видит только процентное соотношение всех голосов в реальном времени. С течением времени результаты будут меняться и, соответственно, процентное соотношение голосов будет обновляться вплоть до окончания проведения голосования. На этой же странице есть кнопки «Моя транзакция» и «Все транзакции». Перейдя на страницу «Моя транзакция», избиратель может убедиться, что его голос за того кандидата, за которого он проголосовал, учтен. На странице «Все транзакции» мобильного приложения избиратель видит отданные голоса (адреса избирателей), распределенные по кандидатам. Дополнительно имеется ссылка на ресурс https://etherscan.io для полной прозрачности процедуры голосования.

Если избиратель решил изменить свой голос, он может это сделать, нажав на кнопку «Изменить свой голос» на странице «Моя транзакция» в период проведения голосования. Кнопка «Изменить свой голос» возвращает избирателя на страницу «Выберите кандидата» и позволяет выбрать другого кандидата. Если проголосовавший избиратель

решит вновь зайти в приложение, то он сразу попадет на страницу «Результаты голосования». Он не сможет вновь проголосовать, но сможет просмотреть результаты и транзакции, а также переголосовать неограниченное количество раз в период проведения голосования, если есть в этом необходимость.

Смарт-контракт для голосования. Смарт-контракт представляет собой программный код [10], структура которого позволяет хранить данные в виде списка структур, одна из которых – структура голосования. В ней записывается вся основная информация: список избирателей, допущенных к голосованию; дата, время начала и окончания голосования; список всех голосов; список проголосовавших; список количества голосов для кандидата; имена кандидатов; эфиры для перечисления избирателю; операторы; администратор; список всех голосований.

Логика смарт-контракта задает правила для хранения данных и операций над ними, изменяя их внутреннее состояние [10]. Таким образом, смарт-контракт автоматически контролирует запись данных, обеспечивает исполнение функциональных обязательств участников процедуры голосования и автоматически выводит результаты голосования (рис.4).

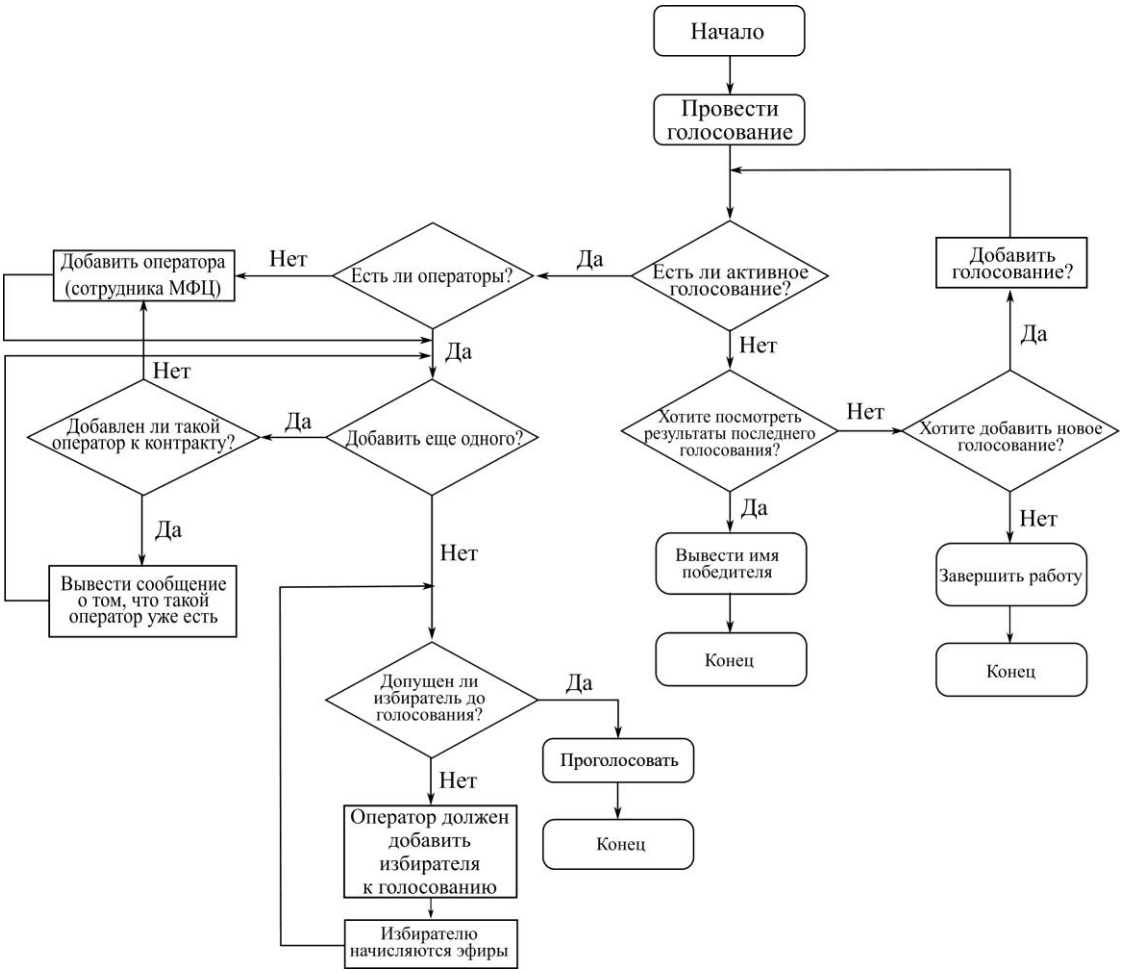


Рис.4. Алгоритм смарт-контракта ДЭГ
Fig.4. Diagram of the REV smart contract algorithm

Результаты экспериментальных исследований комплекса программных средств ДЭГ на основе блокчейн-платформы Ethereum. Продемонстрируем поэтапно разработанную методику в виде комплекса программных средств для ДЭГ на основе блокчейн-платформы Ethereum (рис.5).



Рис.5. Этапы ДЭГ с использованием блокчейн-платформы Ethereum: *а* – список кандидатов; *б* – настройки голосования; *в* – сообщение о верификации; *г* – идентификатор устройства; *д* – регистрация избирателя; *е* – процесс голосования; *ж* – результаты голосования; *з* – моя транзакция; *и* – все транзакции

Fig.5. Stages of REV using Ethereum blockchain platform: *a* – list of candidates; *b* – voting settings; *c* – verification message; *d* – device ID; *e* – voter registration; *f* – voting process; *g* – voting results; *h* – my transaction; *i* – all transactions

Подготовка к голосованию. Администратор регистрируется в браузере MetaMask. Перед публикацией смарт-контракта в Ethereum администратор тестирует его с помощью Solidity compiler в Remix IDE, далее добавляет оператора и создает голосование: заходит в веб-приложение администратора и создает список кандидатов (рис.5,*а*), задает период проведения голосования и устанавливает сумму эфиров для перевода избирателям (рис.5,*б*). Далее администратор выставляет приложение для голосования на сайте ЦИК.

Подтверждение личности. Пользователю мобильного приложения необходимо подтвердить свою личность (рис.5,*в*). Он приходит в пункт проверки личности и предъявляет оператору документ, удостоверяющий личность. Далее нажимает на знак QR-кода в правом верхнем углу экрана мобильного приложения и переходит на страницу, где отображается QR-код мобильного устройства, который доступен и в цифровом виде (рис.5,*г*).

Регистрация. Оператор верифицирует избирателя по удостоверению личности и спискам избирателей, допущенных до голосования, затем через веб-приложение оператора регистрирует избирателя в Ethereum, сканируя QR-код с мобильного приложения или внося идентификатор устройства вручную (рис.5,*д*). Логика смарт-контракта определит, что избиратель прошел верификацию и допущен к голосованию.

Процесс голосования. В мобильном приложении на странице «Выберите кандидата» кнопка «Отдать свой голос» активна в период проведения голосования, заданный администратором. Избиратель выбирает кандидата и голосует (рис.5,*е*). После голосования приложение перенаправляет избирателя на страницу «Результаты голосования» (рис.5,*ж*). Чтобы изменить свой голос, избиратель переходит на страницу «Моя транзакция» (рис.5,*з*) и нажимает кнопку «Изменить свой голос». Далее он вновь попадет на страницу «Выберите кандидата» и выбирает другого кандидата. Изменение голоса создает новую транзакцию от избирателя в публичном реестре транзакций.

Подсчет голосов. Смарт-контракт определяет победителя, набравшего наибольшее количество голосов. При подсчете голосов учитывается последний отправленный голос избирателя.

Проверка результатов голосования. Проверить результаты голосования можно на странице «Моя транзакция» (рис.5,*з*), нажав на имя кандидата. Откроется публичный реестр транзакций, где можно убедиться в правильности адресации своего голоса выбранному кандидату. При переходе на страницу «Все транзакции» избиратель видит свою транзакцию, транзакции других избирателей и ссылку на ресурс https://etherscan.io (рис.5,*и*). По окончании проведения голосования кнопки «Отдать свой голос» и «Изменить свой голос» неактивны, что свидетельствует о завершении голосования.

В результате проведенных исследований установлено, что разработанный комплекс программных средств ДЭГ выполняет следующие функции: проводит голосование анонимно; обеспечивает одноразовую подачу голоса; позволяет изменять свой голос в период проведения голосования; автоматически подсчитывает результаты голосования; позволяет проверить правильность адресации голоса выбранному кандидату и учета голоса при подсчете результатов голосования. Также отвечает предъявляемым требованиям:

1) прозрачность – избиратель может убедиться, что его голос учтен при подсчете результатов голосования, просмотреть историю транзакций и наблюдать за результатами голосования в онлайн-режиме;

2) анонимность – процесс регистрации осуществляется с помощью QR-кода (так называемого обезличенного ID); используется цифровая подпись на основе эллиптической кривой secp256k1;

3) непринужденность – избиратель может изменить свой голос в период проведения голосования, таким образом решается проблема давления на избирателя;

4) безопасность – благодаря алгоритму хеширования keccak256 и применению блокчейн-платформы Ethereum транзакции максимально защищены. Чем больше пользователей в Ethereum, тем эффективнее безопасность;

5) надежность – данные ДЭГ благодаря применению блокчейн-платформы Ethereum защищены от несанкционированного доступа со стороны как администратора (в приложении нет доступа к ним), так и злоумышленников;

6) децентрализованность – отсутствуют контролирующие центры, вся информация поступает через смарт-контракт в блокчейн-сеть Ethereum;

7) отказоустойчивость – блокчейн-технология построена по принципу децентрализованности, поэтому алгоритм методики ДЭГ продолжит свою работу при выходе одного или нескольких устройств из строя с данными ДЭГ, так как они будут реплицироваться на устройства всех участников сети Ethereum;

8) гибкость – блокчейн-платформа Ethereum имеет виртуальную машину, воспринимающую любой язык программирования (переводит смарт-контракт в байт-код, а затем отправляет результат в блокчейн);

9) масштабируемость – можно добавить (сколько необходимо) операторов для идентификации личности и регистрации избирателей;

10) доступность – избирателю не требуется учетная запись или пароль для участия в ДЭГ; интерфейс приложения автоматизирует и скрывает процесс отправки эфира на конкретный адрес Ethereum, и избиратели видят список кандидатов (напротив каждого располагается ячейка для установки маркера по выбору) и кнопку «Отдать свой голос».

Перспективы использования ДЭГ на основе блокчейн-платформы Ethereum. Рынок сбыта разработанной методики для построения ДЭГ и ее программная реализация перспективны при использовании не только в избирательной системе, но и в случаях, когда необходимо дистанционное голосование. Методика позволит обеспечить наибольшую защищенность и прозрачность процедуры голосования, а также конфиденциальность по отношению к пользователям (в отличие от сервисов, основанных на традиционных базах данных).

Среди основных сегментов сбыта разработанной методики для ДЭГ на основе блокчейн-платформы Ethereum стоит выделить следующие:

– государственные организации, представляющие региональную / городскую / районную власть, проводящие голосование для граждан;

– организации, проводящие выборы кандидатов на руководящие должности или принимающие решения внутри компании путем анонимного голосования, в котором участвуют все сотрудники;

– юридические или физические лица, проводящие дистанционные опросы на различного рода мероприятиях, проходящих в режиме онлайн.

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования разработанного комплекса программных средств для реализации методики построения ДЭГ на основе блокчейн-платформы Ethereum способствовали решению возникающих проблем при ДЭГ.

Для дальнейшего исследования по данной теме выделим следующее направление: внедрение верификации личности в Интернете для полной автоматизации предложенной методики ДЭГ. Это даст возможность убедиться, что лицо, предоставившее документы о гражданстве, является тем же лицом, которое находится за устройством во время голосования.

Литература

1. ***Nakamoto S.*** Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system // United States Sentencing Commission: [Web]. URL: https://www.ussc.gov/sites/default/files/pdf/training/annual-national-training-seminar/2018/Emerging_Tech_Bitcoin_Crypto.pdf (дата обращения: 05.01.2021).

2. ***Zaninotto F.*** The blockchain explained to web developers, part 1: the theory // Marmelab: [Web]. 28.04.2016. URL: https://marmelab.com/blog/2016/04/28/blockchain-for-web-developers-the-theory.html (дата обращения: 09.01.2021).

3. ***Kohlhaas P.*** Zug ID: Exploring the first publicly verified blockchain identity // Medium: [Web]. 07.12.2017. URL: https://medium.com/uport/zug-id-exploring-the-first-publicly-verified-blockchain-identity-38bd0ee3702 (дата обращения: 12.01.2021).

4. Blockchain technology in online voting // FollowMyVote: [Web]. URL: https://followmyvote.com/blockchain-technology/ (дата обращения: 06.10.2021).

5. Secure, accessible voting at your fingertips. The future of voting is mobile // Voatz: [Web]. URL: https://voatz.com (дата обращения: 20.01.2021).

6. «Активный Гражданин» на блокчейне // Активный Гражданин: [Электронный ресурс]. URL: https://ag.mos.ru/blockchain (дата обращения: 25.01.2021).

7. Polys – система безопасных онлайн-голосований // Polys: [Электронный ресурс]. URL: https://ru.polys.me (дата обращения: 30.01.2021).

8. ГОСТ 34.11-2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Функция хэширования. М.: Стандартинформ, 2018. 23 с.

9. ГОСТ 34.10-2018. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Процессы формирования и проверки электронной цифровой подписи. М.: Стандартинформ, 2018. 20 с.

10. ***Фролов А.В.*** Создание смарт-контрактов. Solidity для блокчейна Ethereum. Практическое руководство. Электронная книга. М.: ЛитРес: Самиздат, правообладатель, 2019. 258 с. Режим доступа: База ЛитРес: https://www.litres.ru/aleksandr-frolov-198/sozdanie-smart-kontraktov-solidity-dlya-blokcheyna-et/ (дата обращения: 06.10.2021).

Поступила в редакцию 13.05.2021 г.; после доработки 13.05.2021 г.; принята к публикации 11.10.2021 г.

Паскарь Владислав – магистрант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vlad.id.04@gmail.com

Гагарина Лариса Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, директор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gagar@bk.ru

Слюсарь Валентин Викторович – кандидат технических наук, доцент Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vslyusar@mail.ru

References

1. Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *United States Sentencing Commission.* Available at: https://www.ussc.gov/sites/default/files/pdf/training/annual-national-training-seminar/2018/Emerging_Tech_Bitcoin_Crypto.pdf (accessed: 05.01.2021).

2. Zaninotto F. The blockchain explained to web developers, part 1: the theory. *Marmelab.* 28.04.2016. Available at: https://marmelab.com/blog/2016/04/28/blockchain-for-web-developers-the-theory.html (accessed: 09.01.2021).

3. Kohlhaas P. Zug ID: Exploring the first publicly verified blockchain identity. *Medium.* 07.12.2017. Available at: https://medium.com/uport/zug-id-exploring-the-first-publicly-verified-blockchain-identity-38bd0ee3702 (accessed: 12.01.2021).

4. Blockchain technology in online voting. *FollowMyVote.* Available at: https://followmyvote.com/blockchain-technology/ (accessed: 06.10.2021).

5. Secure, accessible voting at your fingertips. The future of voting is mobile. *Voatz.* Available at: https://voatz.com (accessed: 20.01.2021).

6. «Active Citizen» on the blockchain. *Aktivnyy Grazhdanin.* Available at: https://ag.mos.ru/blockchain (accessed: 25.01.2021). (In Russian).

7. Polys is a secure online voting system. *Polys.* Available at: https://ru.polys.me (accessed: 30.01.2021). (In Russian).

8. *GOST 34.11-2018. Information technology. Cryptographic data security. Hash-function.* Moscow, Standartinform Publ., 2018. 23 p. (In Russian).

9. *GOST 34.10-2018. Information technology. Cryptographic data security. Signature and verification processes of electronic digital signature.* Moscow, Standartinform Publ., 2018. 20 p. (In Russian).

10. Frolov A.V. *Creation of smart contracts. Solidity for the Ethereum blockchain. A practical guide.* eBook. Moscow, LitRes: Samizdat, rightsholder, 2019. 258 p. Available at: https://www.litres.ru/aleksandr-frolov-198/sozdanie-smart-kontraktov-solidity-dlya-blokcheyna-et/ (accessed: 06.10.2021). (In Russian).

Received 13.05.2021; Revised 13.05.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the authors:

Vladislav Pascari – Master's degree student of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia,124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vlad.id.04@gmail.com

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), gagar@bk.ru

Valentin V. Slyusar – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of System and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq.,1), vslyusar@mail.ru

Уважаемые авторы!

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

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
BRIEF REPORTS

УДК 548.3:621.382 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-580-583**

Энергия связи между атомами кубического углерода

С.А. Неустроев

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

Doloto@list.ru

Энергетический спектр газовых частиц плазмы достаточно широк – от долей до десятков электронвольт. Частицы с необходимыми энергетическими параметрами, участвующие в синтезе кубического углерода *c*-C, составляют небольшой процент. Внешнее энергетическое воздействие может перевести инертный атом углерода в активное состояние, а также изменить его электронную конфигурацию. Энергия связи между атомами в кубическом углероде зависит от взаимодействия источников энергии. В работе в результате расчета получено значение энергии связи, которое сопоставлено со значением энергии связи между атомами углерода в этане. Отмечена целесообразность внешнего источника – генератора активированных атомов углерода. Установлено, что добавление в реактор ускоренных атомов углерода с энергией 9,687 эВ может повысить производительность выращивания пленок, покрытий и объемных кристаллов.

Ключевые слова: атомы углерода; источники энергии; активация; кубический углерод

Для цитирования: Неустроев С.А. Энергия связи между атомами кубического углерода // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 580–583. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-580-583

Binding Energy of Cubic Carbon Atoms

S.A. Neoustroev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

Doloto@list.ru

Abstract: Energy spectrum of gas particles in plasma is broad, ranging from fractions to 10s of electron volts. Proportion of particles with required energetic parameters, participating in cubic carbon *c*-C synthesis, is small. External energy deposition can transfer an inert carbon atom to active state and change its electronic configuration. Binding energy of *c*-C atom depends on energy sources interaction. In this work, the calculations found the binding energy value that was compared with value of energy of the bond

© С.А. Неустроев, 2021

between the carbon atoms in ethane. The advisability of external source, activated carbon atoms generator, is marked. It has been established that by adding accelerated carbon atoms with energy of 9,687 eV into reactor it is possible to increase productivity of films, coatings and bulk crystals growth.

Keywords: carbon atoms; energy source; activation; cubic carbon; *c*-C

For citation: Neoustroev S.A. Binding energy of cubic carbon atoms. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 580–583. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-580-583

В природных условиях кубический углерод *c*-C (кубическая разновидность алмаза) образуется под воздействием высокой температуры и давления ($T > 4000$ K, $P > 125$ кбар). Его образование – это результат сближения возбужденных атомов углерода с насыщенной валентностью. Сближение атомов и их возбуждение реализуются в производстве наноалмазов при «взрыве» [1], импульсном разряде, разряде в газе пониженного давления [2, 3]. В ходе каждого процесса образуется плазма, в объеме которой накапливаются возбужденные и ускоренные атомы углерода, участвующие в реакции синтеза *c*-C. Известно, что энергетический спектр газовых частиц плазмы широкий – от долей до десятков электронвольт. Частицы с необходимыми энергетическими параметрами, участвующие в синтезе *c*-C, составляют небольшой процент. Рабочие параметры определяются условиями ведения процесса: используют различные виды энергии, постоянный и переменный ток (ВЧ- и СВЧ-диапазонов), подбирают состав исходного сырья, содержащего углерод, давление, температуру, конструкцию реактора и т.д. Под влиянием внешнего энергетического воздействия (удара ускоренной частицей, электромагнитного поля) инертный атом углерода переходит в активное состояние, а также изменяется его электронная конфигурация. Сближение двух атомов углерода может сопровождаться образованием ковалентной связи, что является первичным актом синтеза *c*-C.

Определим последовательность внешнего воздействия на электронную конфигурацию атома углерода с использованием энергетической диаграммы Гротриана [4]. Из всего спектра энергетических состояний углерода взяты пять уровней: CII, (CII)*, CIII, (CIII)* и CIV, которые относятся к атомам с пентакратной мультиплетностью (природная форма с четырьмя валентностями). Эти состояния и конфигурация орбиталей приведены в таблице в соответствии с последовательностью стадий достижения реакции синтеза *c*-C.

Состояние и энергия переходов атомов углерода при образовании ячейки *c*-C
State and transition energy of carbon atoms during the formations of the *c*-C cell

Состояние атома	Конфигурация орбиталей	Энергия, эВ	Примечание
Исходное (CII)*	$^5S^0_2$	4,183	Метастабильность
При подводе энергии (CII)* → CIII	–	4,588	Прямой переход
Промежуточное CIII	$^5S^0_2$	8,771	–
При подводе энергии CIII → (CIII)*	–	1,063	Прямой переход
Промежуточное (CIII)*	$^3P_{0,1,2}nd$	9,834	Источник энергии
Рекомбинация (CIII)*nd → (CIII)*ns	–	0,147	Непрямой переход
Промежуточное CIV	$^3P_{0,1,2}ns$	0,158740776	

Примечание. Энергетическое состояние атома CIV – участника связи *c*-C – составляет 9,228388836 эВ.

Валентности исходного состояния атома углерода насыщены и обозначены (CII)*. Его электронная конфигурация $2s2p^3(^5S^0)2$), энергия E = 4,183 эВ. Состояние атома (CII)* характеризуется сохранением конфигурации и инертности. Инертность атома сохраняется и после сообщения ему энергии 4,588 эВ. Это состояние CIII с конфигурацией $^5S^0$2 и энергией E = 8,771 эВ. Последующий подвод энергии переводит атом в состояние (CIII)* с энергией 9,834 эВ и конфигурацией $^3P^0_{0,1,2}nd$. Оба перехода прямые: (CII)* → CIII с энергией 4,588 эВ и CIII → (CIII)* с энергией 1,063 эВ.

Непрямые переходы происходят с дополнительными затратами энергии. Непрямой переход из состояния (CIII)* в состояние CIV происходит с затратой энергии 0,147 · 1,5 = 0,2205 эВ. При этом наблюдается изменение конфигурации до нормальных условий $^3P^0_{0,1,2}np$ и одновременно атому CIV сообщается активное состояние с энергией 9,687 эВ. Оно может оказаться исходным для реакции синтеза *c*-C. Непрямой переход из состояния CIV в состояние CII также происходит с дополнительной затратой энергии: 0,158740776 · 1,5 = 0,238111164 эВ.

Суммарные затраты энергии на непрямые переходы достигают 0,458611164 эВ, и энергия состояния CIV снижается до 9,228388836 эВ. Пара атомов, находящихся в состоянии CIV с энергией 9,228388836 эВ, при взаимодействии может образовать связь C – C, прочность которой равна: 9,228388836 эВ · 2 = 18,45677767 эВ, т.е. 1780,802194 кДж/моль. Сопоставляя это значение со значением энергии связи между атомами углерода в этане, равным 1696,31584 кДж/моль [5], можно видеть, что расхождение между этими значениями невелико – менее 5 %.

Частота реакции образования связи между двумя атомами углерода, находящимися в состоянии CIV, ограничивается их низкой концентрацией в плазме, непродолжительным временем жизни и нечастым взаимодействием. Добавление в реактор ускоренных атомов углерода в состоянии CIV с энергией 9,687 эВ способствует повышению производительности выращивания пленок, покрытий и объемных кристаллов. Их генерация может осуществляться с использованием внешнего источника.

Литература

1. ***Сакович Г.В., Жарков А.С., Петров Е.А.*** Результаты исследований физико-химических процессов детонационного синтеза и применения наноалмазов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 9-10. С. 11–20.

2. Твердотельный автоэмиссионный диод / ***В.А. Беспалов, Э.А. Ильичев, А.Е. Кулешов и др.*** // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 4. С. 46–52.

3. Исследование технологий формирования наноструктурированных эмиссионных сред для сильноточной радиочастотной электроники / ***В.А. Беспалов, Э.А. Ильичев, Е.П. Кириленко и др.*** // Изв. вузов. Электроника. 2014. № 4 (108). С. 27–35.

4. ***Радциг А.А.*** Спектры атомов и молекул // Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 794–858.

5. ***Неустроев С.А.*** Этан как модель энергетического состояния атомов в кристалле кубического углерода // Изв. вузов. Электроника. 2016. Т. 21. № 1. С. 86–87.

Поступило в редакцию 11.03.2021 г.; после доработки 30.08.2021 г.; принято к публикации 11.10.2021 г.

Неустроев Степан Архипович – доктор технических наук, профессор-консультант Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), doloto@list.ru

References

1. Sakovich G.V., Zharkov A.S., Petrov E.A. Results of research into the physicochemical processes of detonation synthesis and nanodiamond applications. *Nanotechnol. Russia,* 2013, vol. 8, iss. 9-10, pp. 581–591. DOI: https://doi.org10.1134/S1995078013050121

2. Bespalov V.A., Ilichev E.A., Kuleshov A.E., Migunov D.M., Nabiev R.M., Petrukhin G.N., Rychkov G.S., Shcherbakhin Yu.V. Solid state auto-emission diode. *Pis'ma v ZhTF = Technical Physics Letters,* 2013, vol. 39, no. 4, pp. 46–52. (In Russian).

3. Bespalov V.A., Il'ichev E.A., Kirilenko E.P., Kozlitin A.I., Kuleshov A.E., Migunov D.M., Nabiev R.M., Petrukhin G.N., Rychkov G.S., Sakhariv O.A., Trifonov A.I. Peculiarities of forming emission structures for powerful microwave electronics. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2014, no. 4 (108), pp. 27–35. (In Russian).

4. Radzig A. Atomic optical spectra. *Handbook of Physical Quantities*, eds. I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhov. Boca Raton, FL, CRC Press, 1997, pp. 955–1000.

5. Neoustroev S.A. Ethane as model of energetic state of atoms in cubic carbon crystal. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2016, vol. 21, no. 1, pp. 86–87. (In Russian).

Received 11.03.2021; Revised 30.08.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the author:

Stepan A. Neoustroev – Dr. Sci. (Eng.), Consulting Prof. of the Institute of Perspective Materials and Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), doloto@list.ru

УДК 621.313.22:681.5 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-6-583-588**

Разработка системы управления позиционированием сервопривода с применением ПИД-регулятора и контроллера нечеткой логики

Зо Мьо Наин

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

zawmyo53.zm@gmail.com

Сервоприводы широко используются для обеспечения точного управления положением во многих механических системах и промышленных приложениях. Изучение производительности и эффективности сервопривода – важная задача. В работе исследованы пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор (ПИД-регулятор) и контроллер нечеткой логики для управления положением сервопривода постоянного тока. Приведена схема моделирования работы сервопривода с применением разных регуляторов. Расчет значений параметров сервопривода осуществлен в программе MATLAB Simulink. Предложена математическая модель сервопривода постоянного тока для системы управления позиционированием. Проведено сравнение характеристик управления ПИД-регулятора, контроллера нечеткой логики и ПИД-регулятора нечеткой логики. Результаты моделирования показывают, что ПИД-регулятор позволяет обеспечить перерегулирование около 1 % с временем установления около 4 с. ПИД-регулятор нечеткой логики по сравнению с другими регуляторами позволяет повысить производительность и эффективность работы системы управления позиционированием сервопривода.

Ключевые слова: сервопривод постоянного тока; ПИД-регулятор; контроллер нечеткой логики; ПИД-регулятор нечеткой логики; время установления; перерегулирование

Для цитирования: Зо Мьо Наин. Разработка системы управления позиционированием сервопривода с применением ПИД-регулятора и контроллера нечеткой логики // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 583–588. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-583-588

© Зо Мьо Наин, 2021

Development of Servo Drive Positioning Control System Using PID Controller and Fuzzy Logic Controller

Zaw Myo Naing

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

zawmyo53.zm@gmail.com

Abstract: Servo drives are one of the most widely utilized devices in various mechanical systems and industrial applications to provide precise position control. The study of servo driver productiveness and performance index is the important task. In this work, PID controller and fuzzy logic controller (FLC) were developed to control the position of a DC servo drive. The MATLAB Simulink program was investigated and implemented to calculate the values of servo drive parameters, and a scheme for simulating the operation of a servo drive using different controllers was presented. A mathematical model of a DC servo drive for a positioning control system has been proposed. The control characteristics of the PID controller, fuzzy logic controller and fuzzy PID controller are compared. The simulation results have shown that the PID controller allows for an overshoot of about 1 % with a settling time of about 4 sec. The use of the fuzzy PID controller reduces the maximum overshoot to 1 % and decreases the settling time to 2 sec. As a result, the fuzzy PID controller allows for better performance and efficiency compared to other controllers.

Keywords: DC servo drive; PID controller; fuzzy logic controller; fuzzy PID controller; settling time; overshoot

For citation: Zaw Myo Naing. Development of servo drive positioning control system using PID controller and fuzzy logic controller. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 583–588. DOI: https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2021-26-6-583-588

Сервопривод является распространенным электроприводом, используемым во многих механических системах и промышленных приложениях [1], таких как автоматические станки для сборки и монтажа, промышленные роботы и образовательная робототехника, антенны спутникового слежения, автоматические навигационные системы в самолетах и на кораблях, медицинские применения, транспортные средства и др. [2].

Цель настоящей работы – исследование системы управления позиционированием сервопривода постоянного тока с использованием разных регуляторов в среде MATLAB Simulink.

При моделировании сервопривода постоянного тока используются следующие уравнения для системы сервопривода, основанные на законе Ньютона в сочетании с законом Кирхгофа [3, 4]:

$$u_a(t) - u_b(t) = L\frac{di_a(t)}{dt} + Ri_a(t), \quad (1)$$

$$Ki_a(t) = J\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B\frac{d\theta(t)}{dt}, \quad (2)$$

где L – индуктивность якоря; R – сопротивление якоря; i_a – ток якоря; J – эквивалентный момент инерции сервопривода; B – коэффициент вязкого трения вала сервопривода.

Обратная электромагнитная сила [5] вызвана угловой скоростью вала сервопривода:

$$u_b(t) = K_b\omega(t) = K_b\frac{d\theta(t)}{dt},$$

где K_b – постоянная обратной электромагнитной силе привода.

Используя функцию преобразования Лапласа, уравнения (1) и (2) можно записать как

$$u(s) = (La + R)i_a(s) + K_b s\theta(s),$$

$$Ki_a(s) = Js^2\theta(s) + Bs\theta(s).$$

Передаточная функция от входного напряжения $u(s)$ [5] до угла выхода имеет вид

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{K_t}{JLs^2 + (JR + BL)s + BR + K_b K_t}.$$

Передаточная функция положения сервопривода определяется умножением передаточной функции скорости сервопривода на $1/s$:

$$G_{\text{п}}(s) = \frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{K_t}{s[JLs^2 + (JR + BL)s + BR + K_t K_b]}. \quad (3)$$

Основные параметры и значения, выбранные для моделирования сервопривода постоянного тока, следующие:

Сопротивление якоря сервопривода R ..... 2,2 Ом
Индуктивность якоря сервопривода L ..... $2{,}3 \cdot 10^{-3}$ мГн
Инерция ротора сервопривода J_m ..... $0{,}02 \cdot 10^{-6}$ кг·м^2
Коэффициент вязкого трения вала сервопривода B_m ..... $50 \cdot 10^{-6}$ Н·м/рад/с
Коэффициент вязкого трения вала нагрузки B_l ..... $150 \cdot 10^{-6}$ Н·м/рад/с
Постоянная крутящего момента сервопривода K_t ..... $0{,}0384 \cdot 10^{-3}$ Н·м/А
Постоянная обратной электромагнитной силе сервопривода K_b ..... $100 \cdot 10^{-3}$ В/рад/с

Для исследования поведения сервопривода постоянного тока необходимо подставить значения параметров сервопривода в уравнение (3). Тогда передаточная функция разомкнутого контура сервопривода постоянного тока определяется следующим образом:

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{3{,}84}{0{,}0046s^2 + 0{,}35s + 1}.$$

Проведен сравнительный анализ пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД-регулятора), контроллера нечеткой логики (Fuzzy Logic Controller, FLC) и ПИД-регулятора нечеткой логики в системе управления позицией сервопривода постоянного тока в программе MATLAB Simulink. ПИД-регулятор позволяет выполнять автоматическую стабилизацию положения и скорости вращения вала сервопривода и обычно используется для регулирования поведения различных типов динамических объектов, обеспечивая хорошие динамические характеристики при моделировании точных систем положения [6].

Характеристики разработанного ПИД-регулятора нечеткой логики зависят от комбинирования ПИД-регулятора с контроллером нечеткой логики [7]. На рис.1 представлена система нечеткого вывода (Fuzzy Inference System, FIS) с двумя входными и одним выходным параметрами [8], реализованная в наборе инструментов нечеткой логики в программе MATLAB Simulink.

Проведено моделирование системы управления положением сервопривода постоянного тока с применением ПИД-регулятора, контроллера нечеткой логики и ПИД-регулятора нечеткой логики в программе MATLAB Simulink. Результаты моделирования приведены на рис.2 и 3.

Для оценки эффективности различных регуляторов проанализированы максимальное перерегулирование, время нарастания T_r и время установления T_s. В таблице представлены значения данных параметров, рассчитанные по отклику на единичную переходную характеристику. Сравнение параметров системы управления положением сервопривода постоянного тока с применением разных регуляторов показало следующее. ПИД-регулятор позволяет обеспечивать перерегулирование около 1 % с временем установления около 4 с. ПИД-регулятор нечеткой логики обеспечивает максимальное перерегулирование на 1 % с временем установления 2 с.

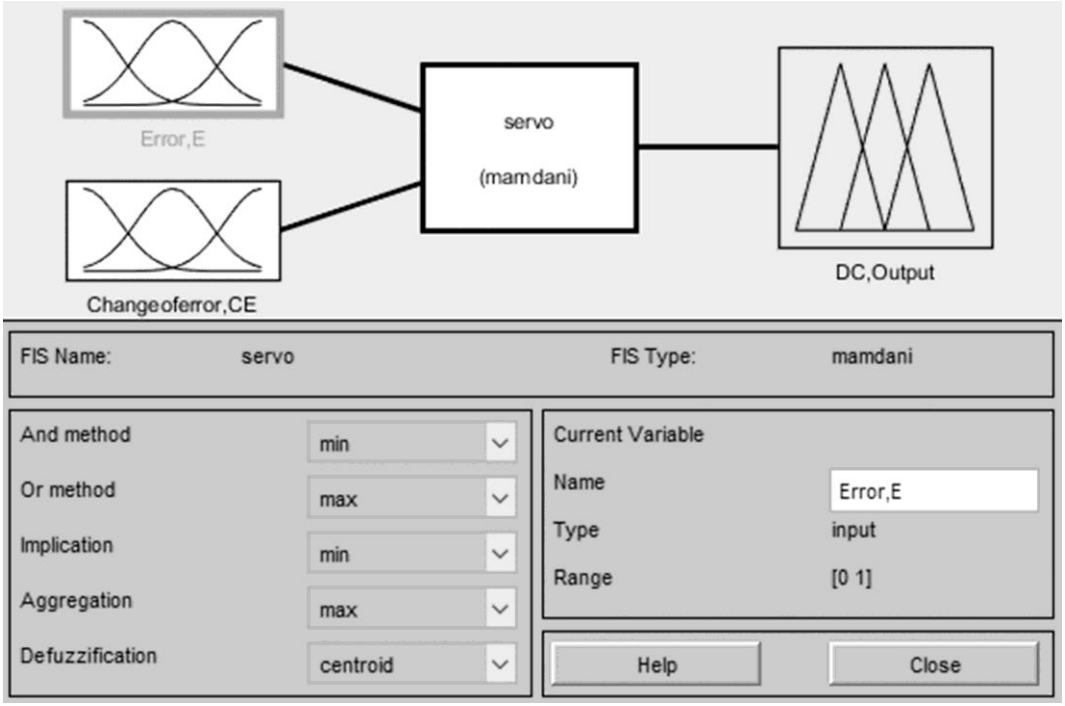


Рис.1. Система нечеткого вывода с двумя входными и одним выходным параметрами
Fig.1. Fuzzy Inference System with two input and one output parameters using the fuzzy logic tool

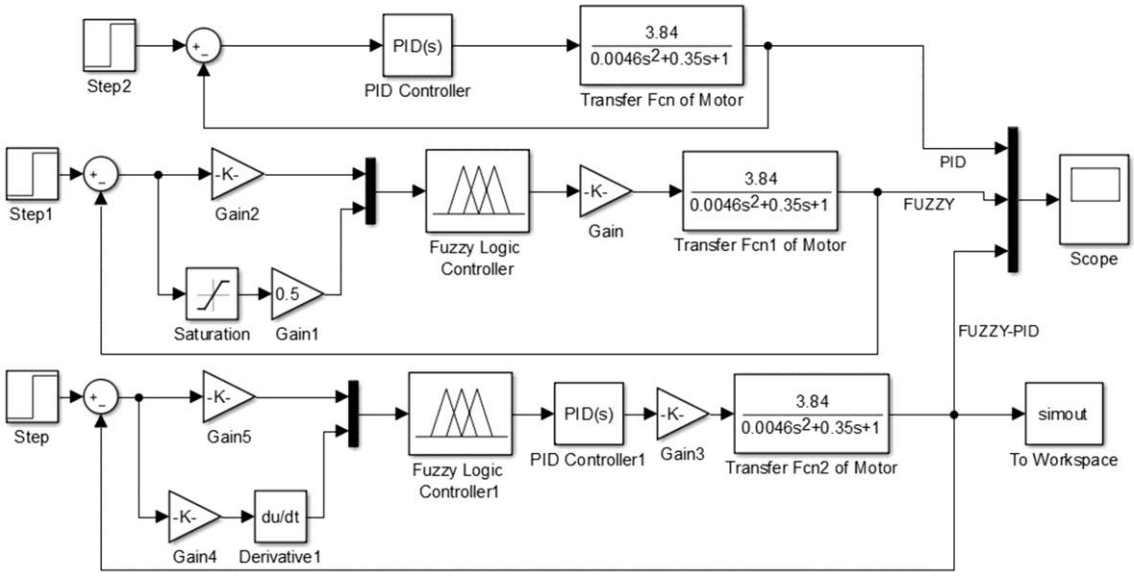


Рис.2. Схема моделирования системы управления положением сервопривода постоянного тока с применением ПИД-регулятора, контроллера нечеткой логики и ПИД-регулятора нечеткой логики
Fig.2. Simulation scheme of the DC servo motor position control system using PID controller, fuzzy logic controller, and fuzzy PID controller

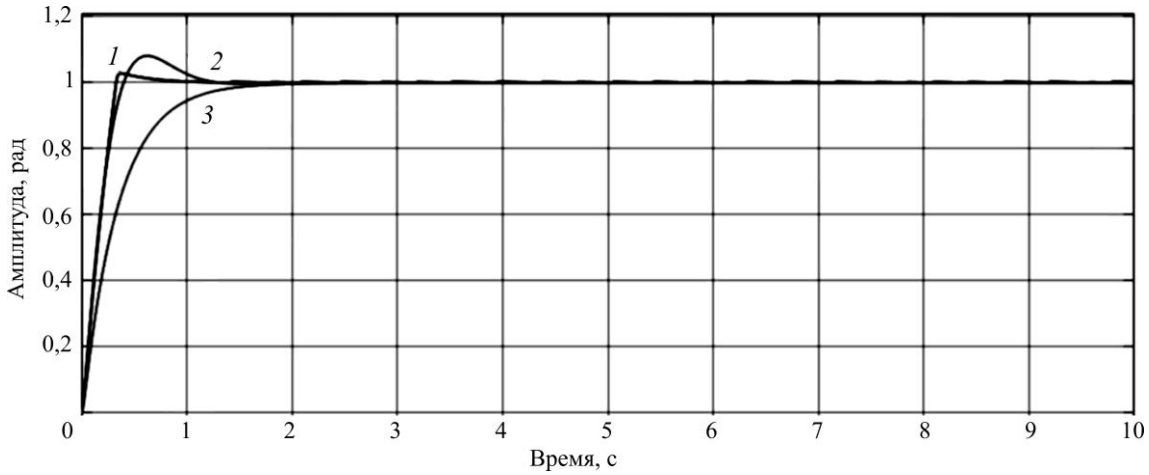


Рис.3. Результаты моделирования работы сервопривода с применением различных регуляторов: *1* – контроллер нечеткой логики; *2* – ПИД-регулятор; *3* – ПИД-регулятор нечеткой логики
Fig.3. Simulation results of servo drive using various regulators: *1* – fuzzy logic controller; *2* – PID controller; *3* – fuzzy PID controller

Значения параметров системы управления положением сервопривода постоянного тока с применением разных регуляторов
Values of parameters of the DC servo drive position control system using different regulators

Регулятор	Максимальное перерегулирование, %	Время нарастания T_r, с	Время установления T_s, с
ПИД-регулятор	1,08	0,6	3,78
Контроллер нечеткой логики	1,028	0,74	2,4
ПИД-регулятор нечеткой логики	0,9	1,56	1,98

Таким образом, ПИД-регулятор нечеткой логики по сравнению с другими регуляторами дает возможность повышать производительность и эффективность системы управления позиционированием сервопривода.

Литература

1. ***Meena D.K., Chahar S.*** Speed control of DC servo motor using genetic algorithm // 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC). Indore: IEEE, 2017. P. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1109/ICOMICON.2017.8279122

2. ***Saputra H.M., Nurhakim A., Mardanies M.*** Design of servo motor controller device for antenna stabilization based on PID controller // 2019 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Application (IC3INA). Tangerang: IEEE, 2019. P. 162–165. DOI: https://doi.org/10.1109/IC3INA48034.2019.8949577

3. ***Зо Мьо Наин, Щагин А.В., Е Тет Линн.*** Автоматизация монтажа трубопроводов на основе композитных труб // Путь науки. 2018. Т. 1. № 10 (56). С. 33–38.

4. ***Щагин А.В., Йе Наунг, Зо Мин Кхаинг.*** Режимы управления двигателем постоянного тока с замкнутым контуром в высокоточных системах позиционирования // Изв. вузов. Электроника. 2018. Т. 23. № 3. С. 304–307. DOI: https://doi.org/10.214151/1561-5405-2018-23-3-304-308

5. ***Jasim M.H.*** Tuning of a PID controller by bacterial foraging algorithm for position control of DC servo motor // Engineering and Technology Journal. 2018. Vol. 36. Part A. No. 3. P. 287–294. DOI: http://dx.doi.org/10.30684/etj.36.3A.7

6. ***Aqeel-Ur-Rehman, Cai C.*** Autonomous mobile robot obstacle avoidance using fuzzy-PID controller in robot's varying dynamics // 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang: IEEE, 2020. Vol. 2. P. 2182–2186. DOI: https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9188467

7. ***Jilani A., Murawwat S., Jilani S.O.*** Controlling speed of DC motor with fuzzy controller in comparison with ANFIS controller // Intelligent Control and Automation. 2015. Vol. 6. No. 1. P. 64–74. DOI: http://dx.doi.org/10.4236/ica.2015.61008

8. ***Velasco N.O.M., Rosario J.R.B. del, Bandala A.A.*** Development of a fuzzy logic controller for a smart RGB lighting system // 2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). Laoag: IEEE, 2019. P. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/HNICEM48295.2019.9072854

Поступило в редакцию 21.05.2021 г.; после доработки 21.05.2021 г.; принято к публикации 11.10.2021 г.

Зо Мьо Наин – аспирант Института микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), zawmyo53.zm@gmail.com

References

1. Meena D.K., Chahar S. Speed control of DC servo motor using genetic algorithm. *2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC).* Indore, IEEE, 2017, pp. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1109/ICOMICON.2017.8279122

2. Saputra H.M., Nurhakim A., Mardanies M. Design of servo motor controller device for antenna stabilization based on PID controller. *2019 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Application (IC3INA).* Tangerang, IEEE, 2019, pp. 162–165. DOI: https://doi.org/10.1109/IC3INA48034.2019.8949577

3. Zaw Myo Naing, Shchagin A.V., Ye Htet Linn. Automation of installation of pipelines on the basis of composite pipes. *Put' nauki = The Way of Science,* 2018, vol. 1, no. 10 (56), pp. 33–38. (In Russian).

4. Shagin A.V., Ye Naung, Zaw Min Khaing. Control method of DC motor with closed loop system of precision positioning system. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 304–307. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2018-23-3-304-308

5. Jasim M.H. Tuning of a PID controller by bacterial foraging algorithm for position control of DC servo motor. *Engineering and Technology Journal*, 2018, vol. 36, part A, no. 3, pp. 287–294. DOI: http://dx.doi.org/10.30684/etj.36.3A.7

6. Aqeel-Ur-Rehman, Cai C. Autonomous mobile robot obstacle avoidance using fuzzy-PID controller in robot's varying dynamics. *2020 39th Chinese Control Conference (CCC).* Shenyang, IEEE, 2020, vol. 2, pp. 2182–2186. DOI: https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9188467

7. Jilani A., Murawwat S., Jilani S.O. Controlling speed of DC motor with fuzzy controller in comparison with ANFIS controller. *Intelligent Control and Automation*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 64–74. DOI: http://dx.doi.org/10.4236/ica.2015.61008

8. Velasco N.O.M., Rosario J.R.B. del, Bandala A.A. Development of a fuzzy logic controller for a smart RGB lighting system. *2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM).* Laoag, IEEE, 2019, pp. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/HNICEM48295.2019.9072854

Received 21.05.2021; Revised 21.05.2021; Accepted 11.10.2021.

Information about the author:

Zaw Myo Naing – PhD student of the Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), zawmyo53.zm@gmail.com

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

Полные тексты статей журнала с 2007 по 2020 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

Памяти Грибова Бориса Георгиевича



07.04.1935 – 05.12.2021

На 87 году ушел из жизни известный ученый в области материалов для электроники, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН Борис Георгиевич Грибов.

В 1958 г. Б.Г. Грибов окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова по специальности «Химия». Трудовую деятельность начал младшим научным сотрудником в филиале Института химической физики Академии наук СССР, где работал до 1964 г. В июне 1963 г. ему была присвоена ученая степень кандидата химических наук.

В 1964–1987 гг. Борис Георгиевич работал в НИИ материаловедения (г. Зеленоград): младшим научным сотрудником, начальником отдела, заместителем директора НИИ материаловедения по производству – директором завода «ЭЛМА».

В 1987 г. Б.Г. Грибов был назначен генеральным директором Научно-производственного объединения «ЭЛМА» – директором НИИ материаловедения им. А.Ю. Малинина – директором завода «ЭЛМА».

В 1974 г. Б.Г. Грибову присвоена ученая степень доктора химических наук, в 1976 г. – ученое звание профессора.

Большую научно-производственную работу Борис Георгиевич совмещал с активной преподавательской деятельностью, будучи профессором кафедры специальных материалов микроэлектроники и членом ГЭК на физико-химическом факультете МИЭТ.

В 1982 г. Б.Г. Грибов был назначен главным конструктором отрасли по материалам электронной техники. Под его руководством формировались перспективные программы и осуществлялись конкретные планы развития электронного материаловедения.

В 1984 г. профессор Б.Г. Грибов был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. На протяжении длительного времени он возглавлял один из экспертных советов Высшей аттестационной комиссии при Совете Министров СССР.

В 1990–2014 гг. Б.Г. Грибов работал директором Государственного научно-исследовательского института особо чис-

тых материалов. В последнее время Борис Георгиевич был советником генерального директора АО «НИИМЭ». Б.Г. Грибов занимался исследованиями, разработкой и организацией производства отечественных высокочистых материалов для электронной промышленности. При его участии составлена и утверждена программа производства электронных материалов на 2020–2030 гг., организован выпуск ряда высокочистых материалов.

Б.Г. Грибов опубликовал более 300 научных трудов, он автор и соавтор 100 изобретений и ряда зарубежных патентов, в 1984 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный изобретатель РСФСР».

За большие заслуги в научно-производственной деятельности Борис Георгиевич Грибов награжден орденами Октябрьской Революции, «Знак Почета», медалями. В 1976 г. за разработку и использование новых материалов в промышленности Б.Г. Грибов удостоен звания лауреата Государственной премии СССР, в 1988 г. за разработку, организацию серийного производства и внедрение в медицинскую практику искусственных клапанов сердца – звания лауреата премии Совета Министров СССР.

Выражаем соболезнования родным и близким Бориса Георгиевича.

Редколлегия

Тематический указатель статей, опубликованных в 2021 году

Материалы электроники

Вигдорович Е.Н. Прогнозирование условий хлоридно-гидридной эпитаксии слоев $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}P_x$, изопериодных с GaAs и $GaAs_{1-x}P_x$.**Т. 26, № 3–4, с. 207–213.**

Вигдорович Е.Н. Тензиметрические исследования состава пара мышьяка и фосфора. **Т. 26, № 5, с. 347–352.**

Зайцева Ю.С., Боргардт Н.И., Приходько А.С., Zallo E., Calarco R. Электронно-микроскопические исследования структуры тонких эпитаксиальных слоев $Ge_2Sb_2Te_5$, выращенных на подложке Si(111). **Т. 26, № 3–4, с. 214–225.**

Лавров И.В., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Бардушкин А.В. Моделирование эффективной диэлектрической проницаемости пенополимерных материалов. **Т. 26, № 2, с. 115–122.**

Морозова Е.В., Тимкаева Д.А. Влияние инкапсуляции фуллеренов на оптические и термоэлектрические свойства углеродных нанотрубок. **Т. 26, № 2, с. 123–131.**

Хамдохов З.М., Маргушев З.Ч., Калажоков З.Х., Калажоков Х.Х., Левин Д.Д. Исследование химического состава пленок, полученных методом электродугового распыления графита и титана из двух источников. **Т. 26, № 6, с. 459–467.**

Шунаев В.В., Герасименко А.Ю., Глухова О.Е. Электронные свойства графеновых нанолент, допированных пирролоподобным азотом. **Т. 26, № 6, с. 447–458.**

Технологические процессы и маршруты

Abazyan S.S., Melikyan V.Sh. Power and Ground Metal Insertion into Integrated Circuit Design Combined with Timing Aware Dummy Metal Fill Insertion
(***Абазян С.С., Меликян В.Ш.*** Конструирование шин питания и заземления в интегральной схеме с вставкой фиктивного металлического заполнителя с учетом временных параметров). **Т. 26, № 3-4, с. 226–233.**

Зеленский А.А., Морозкин М.С., Грибков А.А. Обзор полупроводниковой промышленности в мире и России: производство и оборудование. **Т. 26, № 6, с. 468–480.**

Каракеян В.И., Харламов Н.Р., Рябышенков А.С. Оценка профессиональных рисков в технологических помещениях на предприятии микроэлектроники. **Т. 26, № 3–4, с. 265–272.**

Кубарев Ю.В., Котельников В.А., Котельников М.В. Зондовая диагностика физических процессов в магнитодинамической плазме. **Т. 26, № 2, с. 132–143.**

Новак А.В., Новак В.Р., Румянцев А.В. Особенности процесса изготовления кремниевых игл для кантилеверов. **Т. 26, № 3–4, с. 234–245.**

Тихонов Р.Д., Поломошнов С.А., Амеличев В.В., Черемисинов А.А., Ковалев А.М. Формирование пленок тройной системы CoNiFe электрохимическим осаждением. **Т. 26, № 3–4, с. 246–254.**

Царик К.А. Экспонирование фокусированным ионным пучком сверхтонкого электронного резиста для создания контактов наноразмерного полевого транзистора. **Т. 26, № 5, с. 353–362.**

Чугунов Е.Ю., Погалов А.И., Тимошенков С.П. Инженерные расчеты узлов и сборок изделий микроэлектронной техники с применением конечно-элементного моделирования. **Т. 26, № 3–4, с. 255–264.**

Шомахов З.В., Налимова С.С., Бобков А.А., Мошников В.А. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия поверхностных слоев ограненных наностержней оксида цинка. **Т. 26, № 6, с. 481–490.**

Элементы интегральной электроники

Белов Е.Н., Савостин Ю.А. Определение LC-параметров корпусов ИМС с помощью электромагнитного моделирования. **Т. 26, № 5, с. 363–373.**
Бондарев А.В., Ефанов В.Н. Исследование робастности наноэлектронных структур на базе резонансно-туннельных элементов. **Т. 26, № 6, с. 491–507.**
Зеневич А.О., Кочергина О.В. Исследование динамического диапазона кремниевых фотоэлектронных умножителей. **Т. 26, № 1, с. 30–39.**
Петросянц К.О., Силкин Д.С., Попов Д.А., Бо Ли, Сюй Чжан. TCAD-моделирование нанометровых структур FinFET на объемном кремнии с учетом воздействия радиации. **Т. 26, № 5, с. 374–386.**
Юсипова Ю.А., Попов А.И. Спиновые вентили в микроэлектронике. Обзор. **Т. 26, № 1, с. 7–29.**

Схемотехника и проектирование

Melikyan V.Sh., Gevorgyan V.S. High Accuracy Two-Step Flash ADC with Changeable Comparison Range Using Latch Based Comparator
(***Меликян В.Ш., Геворгян В.С.*** Высокоточный двухступенчатый АЦП с изменяемым диапазоном сравнения с использованием компаратора на основе защелки). **Т. 26, № 3–4, с. 273–281.**
Melikyan V.Sh., Hovhannisyan V.D., Grigoryan M.T., Avetisyan A.A., Grigoryan H.T. Real Number Modeling Flow of Digital to Analog Converter
(***Меликян В.Ш., Ованнисян В.Д., Григорян М.Т., Аветисян А.А., Григорян А.Т.*** Маршрут моделирования цифроаналогового преобразователя на действительных числах). **Т. 26, № 2, с. 144–153.**
Белостоцкая С.О., Лукьянов А.А., Росляков А.С., Семенов А.Н., Федоров Р.А. Особенности реализации аналогового умножителя на основе базового структурированного кристалла серии 5529. **Т. 26, № 2, с. 154–161.**
Волобуев С.В., Рябцев В.Г. Особенности интерфейса устройства тестового диагностирования памяти DDR SDRAM. **Т. 26, № 3–4, с. 282–290.**
Заплетина М.А., Гаврилов С.В. Модификация алгоритма Pathfinder для этапа трассировки межсоединений ПЛИС. **Т. 26, № 5, с. 399–409.**
Крупкина Т.Ю., Лосев В.В., Недашковский Л.В., Чаплыгин Ю.А. Исследование методов подавления паразитных составляющих в спектре выходного сигнала СВЧ-квадратурного модулятора. **Т. 26, № 1, с. 54–63.**
Минаков Е.И., Валихин Г.А., Овчинников А.В., Матвеева С.С. Следящая фильтрация показаний радиолокационной станции при обнаружении БПЛА. **Т. 26, № 6, с. 554–564.**
Пилькевич А.В., Садков В.Д. Тонкопленочные поглощающие элементы адаптоаттенюаторов для ГИС. **Т. 26, № 6, с. 521–532.**
Хватов В.М., Гаврилов С.В. Формирование библиотек СФ-блоков в маршруте проектирования пользовательских схем на ПЛИС и РСнК. **Т. 26, № 5, с. 387–398.**
Чердинцев А.А., Щагин А.В., Лупин С.А. Модифицированная прогнозирующая система управления повышающего DC-DC-преобразователя. **Т. 26, № 6, с. 533–546.**
Шумарин С.В., Богачев А.М. Простой способ уточнения параметров SPICE-моделей ИС транзисторного уровня в температурном диапазоне. **Т. 26, № 6, с. 547–553.**
Эннс В.И., Гаврилов С.В., Чочаев Р.Ж. Автоматическая настройка программных средств размещения пользовательских схем на ПЛИС. **Т. 26, № 6, с. 508–520.**
Якунин А.Н., Аунг Мьо Сан, Кхант Вин. Повышение быстродействия многоразрядного арифметико-логического устройства. **Т. 26, № 1, с. 40–53.**

Интегральные радиоэлектронные устройства

Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Ахмедов Р.А., Садыхов М.В. Математические модели характеристик акустооптической линии задержки и оценка их адекватности. **Т. 26, № 5, с. 410–425.**
Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Ахмедов Р.А., Садыхов М.В. Функциональные возможности акустооптической линии задержки за пределами граничной частоты. **Т. 26, № 1, с. 74–83.**
Ефимов А.Г., Корнеев С.А., Матвеев В.С., Чистюхин В.В. Проектирование многолучевой приемо-передающей апертуры низкоорбитальной космической системы связи. **Т. 26, № 1, с. 64–73.**

Биомедицинская электроника

Литинская Е.Л. Управление и поддержка принятия решений в системе персонализированной инсулинотерапии. **Т. 26, № 2, с. 162–171.**

Информационно-коммуникационные технологии

Вишняков И.Э., Масягин М.М., Одинцов О.А., Слюсарь В.В. Методы и алгоритмы шумоочистки звука в реальном времени. **Т. 26, № 2, с. 184–196.**
Гагарина Л.Г., Доронина А.А., Фомин Р.А., Чухляев Д.А. Исследование управляемости билинейных систем с ограниченным управлением. **Т. 26, № 3–4, с. 302–313.**
Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Исследование антропогенных изменений в городском ландшафте по данным инфракрасного диапазона Landsat-8. **Т. 26, № 3–4, с. 314–323.**
Немченко Д.И., Семаков В.П., Шариков А.И., Шарикова Е.М. Применение алгоритма Джарвиса для сопровождения объекта на изображениях дальнего инфракрасного диапазона. **Т. 26, № 1, с. 92–103.**
Паскарь В., Гагарина Л.Г., Слюсарь В.В. Разработка методики и комплекса программных средств для дистанционного электронного голосования на основе блокчейн-платформы Ethereum. **Т. 26, № 6, с. 565–579.**
Степанов Н.В. Оценка вероятности выполнения целевых функций автомата видеоконтроля. **Т. 26, № 3–4, с. 291–301.**
Теплова Я.О. Алгоритмы и методика исследования рабочих характеристик асинхронных двигателей для автоматизации испытаний. **Т. 26, № 1, с. 84–91.**
Янакова Е.С., Мачарадзе Г.Т., Гагарина Л.Г., Швачко А.А. Параллельно-конвейерная обработка видеоинформации в многопроцессорных гетерогенных системах на кристалле. **Т. 26, № 2, с. 172–183.**

Краткие сообщения

Гундарцев М.А., Каракеян В.И., Рябышенков А.С., Шараева В.П. Применение методологии энергоэкологического анализа для исследования системы удаления воздуха чистых помещений в микроэлектронике. **Т. 26, № 3–4, с. 328–332.**
Злобин А.В., Клюкин В.И., Николаенков Ю.К. Моделирование блока восстановления тактовой частоты и данных на основе схемы фазовой автоподстройки частоты. **Т. 26, № 3–4, с. 324–327.**
Зо Мьо Наин. Разработка системы управления позиционированием сервопривода с применением ПИД-регулятора и контроллера нечеткой логики. **Т. 26, № 6, с. 583–588.**
Неустроев С.А. Энергия активизации атомов углерода в алмазе. **Т. 26, № 5, с. 432–434.**
Неустроев С.А. Энергия связи между атомами кубического углерода. **Т. 26, № 6, с. 580–583.**
Сергеев В.А., Ходаков А.М., Сальников М.Ю. Тепловая модель сквозного металлизированного отверстия печатной платы при одностороннем нагреве. **Т. 26, № 5, с. 426–431.**

Юбилеи

К 90-летию со дня рождения Валиева Камиля Ахметовича. **Т. 26, № 1, с. 104–105.**
Коноплёву Борису Георгиевичу – 70 лет. **Т. 26, № 1, с. 106.**
Неволину Владимиру Кирилловичу – 80 лет. **Т. 26, № 3–4, с. 333–334.**
Неустроеву Степану Архиповичу – 95 лет. **Т. 26, № 5, с. 437.**
Чаплыгину Юрию Александровичу – 70 лет. **Т. 26, № 3–4, с. 335–336.**

Конференции

28-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2021». **Т. 26, № 1. 4-я стр. обложки**
4th International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT '2021). **Т. 26, № 2, 3-я стр. обложки**
X Юбилейная Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2021). **Т. 26, № 2, 4-я стр. обложки; Т. 26, № 3–4, 2-я стр. обложки**
Калугин В.В. Об итогах 5-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника-2021». **Т. 26, № 2, с. 197–198.**
Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы информатизации в цифровой экономике и научных исследованиях – 2021». **Т. 26, № 5, 2-я стр. обложки**
Харач О.Г. Об итогах 28-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2021» **Т. 26, № 3–4, с. 337.**

Памяти Грибова Бориса Георгиевича. **Т. 26, № 6, с. 589–590.**
Памяти Кубарева Юрия Васильевича. **Т. 26, № 5, с. 435–436.**

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 декабря 2021 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, 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. Векторные рисунки представляются в формате файла *.SVG (версии 1.1). Для выполнения иллюстраций рекомендуется использовать свободно распространяемый векторный редактор Inkscape 0.92 (официальный сайт https://inkscape.org). Текст и линии на рисунке должны быть редактируемыми (текст не «в кривых»).

2. Полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в формате TIFF (без компрессии). **Использование MS Word не допускается.**

3. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок должен быть представлен в отдельном файле. Формат рисунков не должен превышать 15×22 см. 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@miee.ru

http://ivuz-e.ru

ПОДПИСКА 2022

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 «УП Урал-Пресс». Подписной индекс 47570
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934
- **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 «УП Урал-Пресс»: 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