



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

*ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ*

# Электроника

*PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS*

Том 28

№ 4

июль – август

Vol. 28

No. 4

July – August

2023

## Российский форум «Микроэлектроника 2023»

С 9 по 14 октября 2023 г. в Парке науки и искусства «Сириус» (г. Сочи) пройдет одно из важнейших событий года в сфере высоких технологий – *Российский форум «Микроэлектроника 2023»*. Форум проводится при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, Группы компаний «Элемент».

**Председатель Программного комитета – Г. Я. Красников**, академик РАН, президент РАН, почетный президент научной конференции «Микроэлектроника – ЭКБ и электронные модули», руководитель приоритетного технологического направления Российской Федерации по электронным технологиям.

**Организаторы:** АО «НИИМЭ» и АО «НИИМА «Прогресс».

**Официальный партнер:** АО «Крафтвэй корпорэйшн ПЛС» (торговая марка Kraftway).

**Инновационный партнер:** АО «ОКБ «Астрон», ООО «Лазерный центр».

**Партнеры:** АО «АЙСА ИТ-Сервис», ООО ДЦ «ГеоСтар Навигация», ООО «Аэроб», Консорциум «Доверенные и экстремальные электронные системы» (НИЯУ МИФИ – АО «ЭНПО СПЭЛС»).

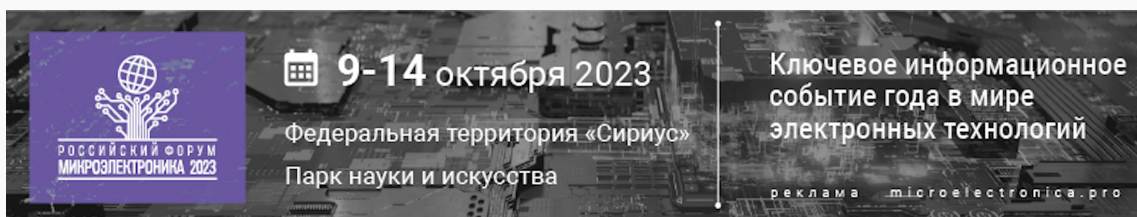
**Оператор:** агентство деловых коммуникаций «ПрофКонференции».

**Генеральный информационный партнер:** АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА».

### Программа Форума:

- пленарное заседание и трек обзорно-дискуссионных заседаний на тему «Доверенные ЭКБ и РЭА для критической гражданской инфраструктуры»;
- пленарное заседание по теме «Развитие ответственного электронного машиностроения в новых экономических условиях: от дорожной карты к долгосрочной стратегии» (включено в программу Форума впервые);
- пленарное заседание «Искусственный и гибридный интеллект: ЭКБ на новых принципах, алгоритмы, модели и технологии»;
- 9-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули», включающая в себя 13 научно-технических секций по тематическим направлениям с участием специалистов ведущих российских научно-исследовательских институтов, вузов, производственных предприятий, дизайн-центров. В 2023 г. секция «Технологии оптоэлектроники и фотоники» будет разделена на две подсекции: «Оптоэлектроника» и «Интегральная фотоника, волоконные и лазерные технологии»;
- две предконференции (пройдут в г. Москве и г. Зеленограде в сентябре 2023 г. на базе НИЯУ МИФИ и НИУ МИЭТ соответственно), в рамках которых будут представлены доклады на темы, связанные с созданием доверенных и экстремальных электронных систем, информационно-управляющих радиотехнических систем, ЭКБ, специального технологического оборудования, материалов, а также с другими актуальными направлениями развития научно-технического потенциала отрасли;
- деловая программа – обсуждение в рамках круглых столов актуальных вопросов развития цифровой экономики в России, формирования нормативно-правовой базы, разработки ЭКБ, развития производственных мощностей и выпуска готовой продукции с участием регуляторов отрасли, представителей бизнеса, промышленности, науки и образовательных учреждений;
- Школа молодых ученых (пройдет на главной площадке Форума) – коммуникационная среда для привлечения и выявления наиболее перспективных и талантливых ученых и инженеров среди студентов российских вузов и молодых специалистов.

Актуальную информацию можно получить на официальном сайте форума [microelectronica.pro](http://microelectronica.pro)





Известия высших учебных заведений.  
**ЭЛЕКТРОНИКА**

**Том 28, № 4, 2023**

**июль – август**

*Научно-технический журнал*

*Издается с 1996 г.*

**Выходит 6 раз в год**

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

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

**Редакционная коллегия:**

*Гаврилов Сергей Александрович* – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X

*Бахтин Александр Александрович* – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878

*Беневоленский Сергей Борисович* – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136

*Беспалов Владимир Александрович* – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия)

*Боргардт Николай Иванович* – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-8015-7603

*Гаврилов Сергей Витальевич* – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482

*Гагарина Лариса Геннадьевна* – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7591-9175

*Гапоненко Сергей Васильевич* – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., 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

*Душкин Александр Викторович* – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-8078-8971

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

*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), ORCID: 0000-0002-2441-7455

*Лабунев Владимир Архипович* – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881

*Меликян Вазген Шаваршович* – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синописис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860

*Неволин Владимир Кириллович* – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

*Неволин Владимир Николаевич* – д.физ.-мат.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия)

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

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

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

**Сауров Александр Николаевич** – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977

**Светухин Вячеслав Викторович** – чл.-корр. РАН, д.физ.-мат.н., проф., НПК «Технологический центр» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0831-9254

**Селищев Сергей Васильевич** – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),  
ORCID: 0000-0002-5589-7068

**Сизов Александр Сергеевич** – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186

**Сидоренко Анатолий Сергеевич** – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева (Орёл, Россия),  
ORCID: 0000-0001-7433-4140

**Телец Виталий Арсеньевич** – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X

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

**Хорев Анатолий Анатольевич** – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия),  
ORCID: 0000-0001-9074-385X

**Юриш Сергей Юрьевич** – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания),  
ORCID: 0000-0002-1433-260X

**Заведующая редакцией И. М. Доронина**

**Редактор А. В. Тихонова**

**Корректор И. В. Проскуракова**

**Верстка А. Ю. Рыжков, С. Ю. Рыжков**

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

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

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

Подписано в печать 10.08.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.  
Объем 17,67 усл.печ.л., 15,684 уч.-изд.л. Тираж 130 экз. Заказ № 24. Свободная цена.  
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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

**1.3.5. Физическая электроника (технические науки, физико-математические науки)**

**1.3.8. Физика конденсированного состояния (технические науки, физико-математические науки)**

**1.3.11. Физика полупроводников (технические науки, физико-математические науки)**

**1.3.12. Физика магнитных явлений (технические науки, физико-математические науки)**

**2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника (технические науки)**

**2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств (технические науки, физико-математические науки)**

**2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники (технические науки)**

**2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)**

**2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки),**

**2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)**

**2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)**

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

*Плата за публикацию статей не взимается.*

**Подписной индекс в каталоге «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» – 38934.**

**Подписной индекс в каталоге «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «Урал-Пресс Округ» – 47570.**

## СОДЕРЖАНИЕ

### Материалы электроники

- Лавров И. В.* Методы вычисления эффективных электрофизических свойств неоднородных сред с учетом многообразных структурных особенностей. Обзор ..... 403

### Элементы интегральной электроники

- Сауров М. А.* Оптимизация параметров преобразователя излучения на основе кремниевого  $p-i-n$ -диода ..... 431

### Схемотехника и проектирование

- Солодовников А. П., Переверзев А. Л., Силантьев А. М.* Программно-аппаратный комплекс для ускорения функциональной верификации систем на кристалл ..... 441

### Микро- и наносистемная техника

- Пайн Со Хту, Калугин В. В., Кочурина Е. С.* Моделирование и оптимизация емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа ..... 452

- Грабов А. Б., Рискин Д. Д., Суздальцев С. Ю., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А.* Технология герметизации МЭМС на уровне пластины на базе SLID-структур, выращенных из электролитов на основе металлоорганических комплексов Cu-Sn ..... 461

- Беляков И. А., Вертянов Д. В., Кочергин М. Д., Тимошенко С. П.* Особенности проектирования и технологии изготовления трехмерной микросистемы с торцевой коммутацией ..... 471

- Галкин А. А., Еркин П. В., Захаров В. П., Соломкина Н. А., Тимошенко А. С., Тимошенко С. П.* Применение инерциальных МЭМС в системе автоматической отцепки десантируемого груза ..... 489

- Баранов А. А., Грабов А. Б., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А.* Двухосевой однокристалльный АМР-преобразователь магнитного поля ..... 500

### Интегральные радиоэлектронные устройства

- Колесников Е. Б.* Управляемый фазовращатель гармонического сигнала ..... 509

### Биомедицинская электроника

- Жило Н. М.* Управление удалением жидкости в системе автоматизированного перитонеального диализа ..... 518

### Информационно-коммуникационные технологии

- Кузнецова Е. С.* Методика перехода к электронным конструкторским документам для автоматизации нормоконтроля ..... 529

- Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Колюхов Е. В., Харитонова А. Д.* Метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики ..... 537

### Конференции

- Российский форум «Микроэлектроника 2023» ..... 2-я стр. обложки

- К сведению авторов ..... 547



Proceedings of Universities.  
**ELECTRONICS**

**Volume 28, No. 4, 2023**  
**July – August**

*The scientific and technical journal*

*Published since 1996*  
**Published 6 times per year**

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

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

**Editorial Board:**

*Sergey A. Gavrilo* – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2967-272X

*Aleksandr A. Bakhtin* – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1107-0878

*Sergey B. Benevolensky* – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3177-9136

*Vladimir A. Bespalov* – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia)

*Nikolay I. Borgardt* – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-8015-7603

*Alexandr V. Dushkin* – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-8078-8971

*Larisa G. Gagarina* – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7591-9175

*Sergey V. Gaponenko* – Acad. NAS of Belarus, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0003-3774-5471

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

*Aleksandr A. Gorbatshevich* – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1950-356X

*Anatoly A. Horev* – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-9074-385X

*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), ORCID: 0000-0002-2441-7455

*Vladimir A. Labunov* – Acad. NAS of Belarus, Foreign member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0002-3494-4881

*Vazgen S. Melikyan* – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJSC Company “Synopsys Armenia” (Yerevan, Armenia), ORCID: 0000-0002-1667-6860

© “Proceedings of Universities. Electronics”, 2023  
© MIET, 2023

**Vladimir K. Nevolin** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia),  
ORCID: 0000-0003-4348-0377  
**Vladimir N. Nevolin** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI  
(Moscow, Russia)  
**Aleksey L. Pereverzev** – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia),  
ORCID: 0000-0002-5834-5138  
**Konstantin O. Petrosyants** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School  
of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786  
**Aleksandr N. Saurov** – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microe-  
lectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977  
**Andrey Y. Sazonov** – PhD, Prof., University of Waterloo (Canada),  
ORCID: 0000-0003-0974-1262  
**Sergey V. Selishchev** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia),  
ORCID: 0000-0002-5589-7068  
**Anatolie S. Sidorenko** – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,  
Orel State University named after I. S. Turgenev (Orel, Russia),  
ORCID: 0000-0001-7433-4140  
**Aleksandr S. Sigov** – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological  
University (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-2017-9186  
**Vyacheslav V. Svetukhin** – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,  
SMC “Technological Centre” (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-0831-9254  
**Vitaly A. Telets** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow,  
Russia), ORCID: 0000-0003-4944-676X  
**Sergey P. Timoshenkov** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia),  
ORCID: 0000-0001-5411-1804  
**Sergey Yu. Yurish** – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain),  
ORCID: 0000-0002-1433-260X

**Head of editorial staff** *Doronina I. M.*

**Chief editors** *Tikhonova A. V., Proskuryakova I. V.*

**Make-up** *Ryzhkov S. Yu., Ryzhkov A. Yu.*

**Editorial Board’s address:** 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET,  
editorial office of the Journal “Proceedings of Universities. Electronics”.

**Tel.:** +7-499-734-62-05, **e-mail:** magazine@miec.ru, **http://ivuz-e.ru**

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

Signed to print 10.08.2023. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed  
sheets 17,67. Number of copies 130. Order no. 24. 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 candi-  
date of science and doctor degrees must be published for the following specialties:

**1.3.5. Physical electronics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)**

**1.3.8. Condensed matter physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)**

**1.3.11. Semiconductor physics (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)**

**1.3.12. Physics of magnetic phenomena (Engineering Sciences, Physical and Mathematical Sciences)**

**2.2.1. Vacuum and plasma electronics (Engineering Sciences)**

**2.2.2. Electronic component base of micro- and nanoelectronics, quantum devices (Engineering Sciences, Physical and  
Mathematical Sciences)**

**2.2.3. Technology and equipment for electronic materials and devices production (Engineering Sciences)**

**2.2.8. Material, product, substance and natural environment control and diagnostic techniques and devices (Engineering  
Sciences)**

**2.3.1. System analysis, information handling and processing (Engineering Sciences)**

**2.3.3. Process industries automation and control (Engineering Sciences)**

**2.3.5. Mathware and software for computer systems, complexes and networks (Engineering Sciences)**

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

*The fee for the publication of articles is not charged.*

**The subscription index in catalogue “Russian Press” LLC “Agency “Book-Service” – 38934.**

**The subscription index in catalogue “Periodicals. Newspapers and magazines” LLC “Ural-Press Okrug” – 47570.**

## CONTENTS

### Electronics materials

- Lavrov I. V.* Methods of calculating the effective electrophysical properties of heterogeneous media with account for various structural features. Review ..... 403

### Integrated electronics elements

- Saurov M. A.* Optimization of energy converter parameters based on silicon *p-i-n* diode ..... 431

### Circuit engineering and design

- Solodovnikov A. P., Pereverzev A. L., Silantyev A. M.* Software-hardware complex for system on chip design verification acceleration ..... 441

### Micro- and nanosystem technology

- Paing Soe Thu, Kalugin V. V., Kochurina E. S.* Modeling and optimization of MEMS comb type capacitive acceleration sensor ..... 452

- Grabov A. B., Riskin D. D., Suzdaltsev S. Yu., Obizhaev D. Yu., Zhukova S. A.* The MEMS wafer-level sealing technology based on SLID structures grown from Cu-Sn organometallic complexes electrolytes ..... 461

- Belyakov I. A., Vertyanov D. V., Kochergin M. D., Timoshenkov S. P.* Design and manufacturing features of a three-dimensional microsystem with side commutations ..... 471

- Galkin A. A., Erkin P. V., Zaharov V. P., Solomkina N. A., Timoshenkov A. S., Timoshenkov S. P.* Automatic payload system separation device based on inertial MEMS ..... 489

- Baranov A. A., Grabov A. B., Obizhaev D. Yu., Zhukova S. A.* Two-axis single-chip AMR transducer of magnetic field ..... 500

### Integrated radioelectronic devices

- Kolesnikov E. B.* Controlled harmonic signal phase shifter ..... 509

### Biomedical electronics

- Zhilo N. M.* Control of fluid removal in an automated peritoneal dialysis system ..... 518

### Information-communication technologies

- Kuznetsova E. S.* Procedure of transition to electronic engineering drawings for regulatory document control automation ..... 529

- Shevnina Ju. S., Gagarina L. G., Konyukhov E. V., Kharitonova A. D.* Method of cluster analysis of heterogeneous data using the provisions of fuzzy logic ..... 537

### Conferences

- Russian Forum “Microelectronics 2023” ..... 2nd cover page

- Instructions for authors ..... 547



Обзорная статья  
УДК 537.2  
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-4-403-430  
EDN: TYTHFH

**Методы вычисления эффективных  
электрофизических свойств неоднородных сред  
с учетом многообразных структурных особенностей. Обзор**

*И. В. Лавров*

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

*iglavr@mail.ru*

**Аннотация.** При создании неоднородных материалов с требуемыми функциональными характеристиками большое значение имеют теоретические методы прогнозирования их свойств в зависимости от состава и структуры. В настоящей работе предложен обзор методов вычисления эффективных электрофизических характеристик неоднородных сред, способных учитывать такие структурные особенности данных сред, как многокомпонентность, вероятностные распределения ориентаций и форм включений, несколько уровней вложенности. Подробно представлены приближение Максвелла Гарнетта и его обобщения для неоднородных сред матричного типа: формулы Фрике и Брэгга – Пиппарда для случаев эллипсоидальных однородных включений, а также авторские обобщения приближения Максвелла Гарнетта для случаев эллипсоидальных однородных анизотропных включений, ориентированных по вероятностному закону, и эллипсоидальных анизотропных включений с анизотропной оболочкой. Рассмотрены варианты приближения эффективной среды для сред с однородными включениями: приближение Бруггемана; обобщенный подход эффективной среды Д. Страуда; обобщенное сингулярное приближение. Изложен дифференциальный подход на основе обобщенного сингулярного приближения, с помощью которого получено уравнение с параметром, позволяющим варьировать степень дифференциальности приближения. Приведено описание авторского подхода для сред с включениями в многослойной оболочке: обобщенное приближение эффективного поля, которое можно считать обобщением обобщенного сингулярного приближения на среды с несколькими уровнями вложенности. Описаны методы учета вероятностных распределений ориентаций включений (использующие теорию представлений группы  $SO(3)$ ) и форм включений. Установлено, что наибольшей степенью общности обладает обобщенное приближение эффективного поля для неоднородных сред с включениями в многослойной оболочке.

**Ключевые слова:** неоднородная среда, матрица, включение с оболочкой, обобщенное приближение эффективного поля, обобщенное сингулярное приближение, приближение Максвелла Гарнетта, приближение эффективной среды

**Для цитирования:** Лавров И. В. Методы вычисления эффективных электрофизических свойств неоднородных сред с учетом многообразных структурных особенностей. Обзор // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 403–430. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-403-430>. – EDN: TYTHFH.

Review article

## **Methods of calculating the effective electrophysical properties of heterogeneous media with account for various structural features. Review**

*I. V. Lavrov*

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

*iglavr@mail.ru*

**Abstract.** Upon designing a materials with the required functional characteristics, theoretical methods for predicting their properties depending on the composition and structure are a major asset. In this work, an overview of methods of calculating the effective electrophysical characteristics of heterogeneous media configured to consider such structural features of heterogeneous media as multicomponence, probabilistic distributions of orientations and forms of inclusions, and several levels of nesting, is proposed. The Maxwell Garnett approximation and its generalizations for heterogeneous matrix-type media are presented in detail, namely the Fricke and Bragg – Pippard formulas for cases of ellipsoidal homogeneous inclusions, and the author’s generalizations of the Maxwell

Garnett approximation for cases of ellipsoidal homogeneous anisotropic inclusions oriented by probability law and of ellipsoidal anisotropic inclusions with anisotropic shell. Variants of the effective medium approximation for media with homogeneous inclusions are considered: Bruggeman approximation; generalized effective-medium approach by D. Stroud; generalized singular approximation. A differential approach based on a generalized singular approximation is exposed, with the help of which an equation was obtained with a parameter allowing the differentiability degree variation of the approximation. The description is given of author’s approach for media with inclusions in a multilayer shell: a generalized effective-field approximation that can be considered a generalization of a generalized singular approximation to media with several levels of nesting. The methods of accounting for probabilistic distributions of inclusion orientations (using the theory of representations of the SO(3) group) and inclusion forms are described. It has been established that the most general of these approaches is the generalized effective-field approximation for heterogeneous media with inclusions in a multilayer shell.

**Keywords:** heterogeneous medium, matrix, inclusion with shell, generalized effective field approximation, generalized singular approximation, Maxwell Garnett approximation, effective medium approximation

**For citation:** Lavrov I. V. Methods of calculating the effective electrophysical properties of heterogeneous media with account for various structural features. Review. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 403–430. [https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2023-28-4-403-430](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-403-430). – EDN: TYTHFH.

**Введение.** Неоднородные материалы, т.е. материалы, у которых тензоры материальных свойств являются функциями пространственных координат, широко используются как в научно-технических областях, так и в быту. В микро- и нанoeлектронике, например, применяются пористые структуры на углероде, кремнии и его оксиде, на оксиде алюминия, тонкие поликристаллические и композитные пленки различного функционального назначения. В технике в качестве элементов конструкций, деталей и узлов механизмов используются композитные материалы на основе высокопрочных наполнителей и полимерных связующих, имеющие наряду с требуемыми механическими свойствами малую плотность и относительную простоту изготовления. Перечисленные виды неоднородных материалов – поликристаллы, композиты, пористые структуры – относятся к подклассу гетерогенных материалов, состоящих из однородных областей с четкой границей между ними. В настоящей работе под термином «неоднородные материалы» подразумеваются материалы именно из этого подкласса.

Создаются искусственные неоднородные материалы с требуемыми или максимально возможно приближенными к таковым функциональными, стоимостными и экологическими характеристиками. При освоении нанометровых масштабов для элементов ИС появляются новые специфические требования к совокупности физических характеристик используемых материалов, например высокая диэлектрическая проницаемость у подзатворного диэлектрика и, наоборот, низкая у подложки в ИС. Управление светом на нанометровом масштабе откроет новые возможности для детектирования молекул, получения изображений биологических объектов и обработки информации на терагерцевых частотах. Для создания соответствующих фотонных устройств может использоваться свойство металл-диэлектрических наноструктур, в которых возможно образование плазмонов, т.е. коллективных колебаний электронов [1–3]. Металл-диэлектрические нанокомпозиты вызывают большой интерес у исследователей, поскольку благодаря возникающим в них на определенных частотах плазмонным резонансам могут иметь свойства, отсутствующие у природных материалов [4–7].

В последнее время в радиотехнической, авиакосмической, автомобильной, нефтегазовой и других отраслях промышленности, на транспорте востребованы так называемые синтактные материалы, или сферопластики, – композиты, в которых в качестве наполнителей используются неоднородные включения, в основном сферической формы (микросферы) [8–11]. Например, для теплоизоляционного и антикоррозийного покрытия на внешней поверхности труб нефтегазопроводов, проложенных в зонах с повышенным риском коррозии, применяются сферопластики с микросферами со стеклянной оболочкой, наполненной воздухом. Данный материал устойчив к механическому, химическому и другим видам воздействия, а также имеет низкую теплопроводность и плотность [9–11]. Перспективным представляются сферопластики специального назначения, например, при изготовлении радиопрозрачных обтекателей и укрытий радиотехнических комплексов, где наряду с высокими механическими и антикоррозийными характеристиками требуются специфические диэлектрические свойства в определенном частотном диапазоне [8]. В узлах трения перспективно использовать самосмазывающиеся трибокомпозиты с микросферами, заполненными смазочным материалом [12].

Однако, чтобы создать материал с близкими к требуемым функциональными свойствами, необходимо, во-первых, подобрать качественный и количественный состав

компонентов материала и структуру, образуемую ими. Во-вторых, нужно разработать технологию создания материала с данными компонентами и структурой. При решении первой из указанных задач важно прогнозирование свойств проектируемого материала в зависимости от его состава и структуры с помощью теоретических методов. Это обусловлено значительными временными и материальными затратами, необходимыми для изготовления опытных образцов материалов и измерения их характеристик. Кроме того, при получении опытных образцов с приемлемыми характеристиками без предварительного теоретического исследования их свойств останутся открытыми вопросы: можно ли улучшить характеристики материала, является ли он оптимальным с точки зрения функциональных свойств?

Во многих процессах неоднородные материалы с большой точностью можно считать однородными с некоторыми усредненными эффективными характеристиками. Например, рассеивающие свойства неоднородного диэлектрика в электромагнитном поле при условии малости характерного масштаба неоднородности в нем по сравнению с длиной волны воздействующего поля определяются его эффективной диэлектрической проницаемостью [1].

Таким образом, потребность в разработке теоретических методов прогнозирования эффективных свойств неоднородных материалов, учитывающих наряду с их компонентным составом также качественные особенности и количественные характеристики их структуры, возрастает. К качественным особенностям структуры относится, например, наличие оболочки у включений в композите, к количественным характеристикам – относительная толщина оболочки, аспектное отношение и ориентация включений. При изготовлении реальных образцов материала посредством технологического процесса неизбежно возникают отклонения от «идеальной» структуры материала, например параметры, описывающие формы и ориентации включений, будут иметь некоторые разбросы вокруг желаемых значений, поэтому важно иметь инструмент для оценивания влияния таких разбросов на характеристики получаемого материала.

В настоящей работе рассматриваются методы вычисления эффективных диэлектрических и электропроводящих характеристик неоднородных сред, учитывающие такие структурные особенности данных сред, как концентрация, форма включений, наличие у них оболочек, а также вероятностные распределения форм и ориентаций включений, наличие в материале нескольких видов включений с различными материальными свойствами. В общем случае эффективная физическая характеристика неоднородной среды имеет тензорный вид. Например, тензор  $\epsilon^*$  эффективной диэлектрической проницаемости образца неоднородной среды определяется уравнением  $\langle \mathbf{D} \rangle = \epsilon^* \langle \mathbf{E} \rangle$ , где  $\langle \mathbf{D} \rangle$ ,  $\langle \mathbf{E} \rangle$  – средние по образцу электрическая индукция и напряженность электрического поля соответственно. (Во всех случаях, рассматриваемых в настоящей работе, гипотеза эргодичности предполагается применимой, т. е. среднее по ансамблю реализаций неоднородной среды совпадает со средним по образцу неоднородной среды.)

Поскольку в стационарном случае распределения электрического, магнитного, температурного полей, а также концентрации частиц вещества описываются одинаковыми уравнениями, задачи вычисления эффективных диэлектрических, магнитных, электро- и теплопроводящих характеристик и эффективного коэффициента диффузии неоднородных сред математически эквивалентны [13]. Поэтому методы, разработанные для решения любой из перечисленных задач, и полученные результаты могут быть использованы и для решения остальных задач при условии структурного соответствия данных сред.

**Краткий обзор теоретических исследований диэлектрических и транспортных свойств неоднородных материалов.** Задача вычисления эффективных диэлектрических и транспортных характеристик неоднородных сред уже полтора века интересует исследователей. Так, Дж. К. Максвелл [14] вычислил эффективное удельное электрическое сопротивление  $\rho^*$  неоднородной среды, состоящей из проводящей матрицы с удельным сопротивлением  $\rho_1$  и погруженных в нее случайно распределенных проводящих шаров малого радиуса с удельным сопротивлением  $\rho_2$ , в предположении, что шары не вносят возмущения в линии тока в матрице, не проходящие сквозь них. В итоге для эффективного сопротивления среды получен следующий результат:

$$\rho^* = \rho_1 \left[ 1 + \frac{3f(\rho_2 - \rho_1)}{2\rho_2 + \rho_1 - 2f(\rho_2 - \rho_1)} \right], \quad (1)$$

где  $f$  – объемная доля шаров в неоднородной среде.

Эффективную диэлектрическую проницаемость среды, состоящей из диэлектрической матрицы с проницаемостью  $\varepsilon_1$  и погруженных в нее шаров с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2$ , в приближении Максвелла можно получить из (1), используя соответствие  $\varepsilon \leftrightarrow \sigma = 1/\rho$ :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 \left[ 1 + \frac{3f(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - f(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \right]. \quad (2)$$

Рэлей [15] рассмотрел задачи нахождения эффективной теплопроводности неоднородных матричных сред с регулярным расположением включений в двумерном и трехмерном случаях: в виде круговых цилиндров с параллельными друг другу осями, расположенных в узлах квадратной решетки, или в виде шаров в узлах кубической решетки. Он непосредственно учитывал влияние включений друг на друга, используя симметрии задач и разложение потенциалов полей, индуцированных включениями, на соответствующие гармоники. В частности, для эффективной теплопроводности среды в двумерном случае получено выражение

$$k^* \approx k_1 \left[ 1 + \frac{2f}{v - f + 0,3058v^{-1}f^4} \right],$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – теплопроводности матрицы и включений соответственно;  $v = (k_2 + k_1)/(k_2 - k_1)$ .

Дж. К. Максвелл Гарнетт (названный в честь британского физика Максвелла Джеймса Клерка [16]) получил формулу для оптических характеристик стекла с шарообразными металлическими включениями при условии малости шаров по сравнению с длиной волны падающего излучения [17]:

$$\tilde{n}^2 = \varepsilon^* = n_1^2 \left( 1 + 3f \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1^2 + n_2^2} \left( 1 - f \frac{n_2^2 - n_1^2}{2n_1^2 + n_2^2} \right)^{-1} \right), \quad (3)$$

где  $n_2$ ,  $n_1$  и  $\tilde{n}$  – комплексные показатели преломления шаров, стекла и неоднородной среды соответственно;  $f$  – объемная доля шаров.

С учетом того, что  $n_2^2 = \varepsilon_2$ ,  $n_1^2 = \varepsilon_1$  ( $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_1$  – диэлектрические проницаемости шаров и стекла), формула (3) равносильна формуле (2), которую называют формулой Максвелла Гарнетта (МГ). Результаты Максвелла и Гарнетта получились одинаковыми (причины совпадения этих результатов в настоящей работе не обсуждаются), несмотря на то, что Максвелл при выводе своей формулы фактически пренебрег взаимодействием шаров между собой, считая, что действующее на отдельные шары поле равно внешнему приложенному полю вследствие малой концентрации шаров в среде, в то время как Гарнетт косвенно учитывал их взаимодействие, считая, что поле  $\mathbf{E}'$ , действующее на включение, равно локальному полю Лорентц – Лоренца:

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E}_0 + \frac{4\pi}{3} \mathbf{P}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{E}_0$  – приложенное внешнее поле, равное среднему полю;  $\mathbf{P}$  – вектор поляризации.

О. Винер [18, 19] вычислил эффективную проводимость среды, состоящей из плоских однородных и изотропных слоев (толщина и номер составляющего слой компонента являются случайными величинами).

Бруггеман [20] получил уравнение для эффективной диэлектрической проницаемости среды, состоящей из смеси сферических частиц двух видов:

$$v_1 \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon^*}{2\varepsilon^* + \varepsilon_1} + v_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon^*}{2\varepsilon^* + \varepsilon_2} = 0, \quad (5)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – объемные доли видов частиц в среде ( $v_2 = 1 - v_1$ ).

Уравнение (5) называют симметричным уравнением Бруггемана. Фактически с уравнения (5) берет начало приближение эффективной среды. Также в [20] Бруггеманом были заложены основы дифференциального подхода эффективной среды и получено уравнение, называемое асимметричным уравнением Бруггемана:

$$\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon^*}{\sqrt[3]{\varepsilon^* / \varepsilon_1}} = (1 - v_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1). \quad (6)$$

Процедура его вывода заключается в добавлении малых порций компонента 2 вместо таких же по объему порций имеющейся неоднородной среды в данной области, которая в начальный момент была заполнена частицами компонента 1.

Результаты, полученные при исследовании двумерных систем (теорема Келлера [21], преобразования симметрии Дыхне [22], метод спектральных функций Д. Бергмана [23]), активизировали изучение подобных систем и систем со столбчатой структурой. В случае малого различия материальных характеристик составляющих неоднородной среды к хорошим результатам приводит корреляционное приближение метода случайных функций, состоящее в том, что тензор эффективного свойства неоднородного материала представляется в виде суммы среднего значения и корреляционных добавок, учитывающих многочастичные взаимодействия [24–26]. Хашин и Штрикман [27] разработали вариационный метод для определения границ эффективных значений констант неоднородной среды, физический смысл которого состоит в минимизации рассеиваемой энергии.

Рассмотрим некоторые методы вычисления эффективных физических свойств неоднородных сред и их обобщения.

**Приближение Максвелла Гарнетта и его обобщения.** Гарнетт [17] при выводе формулы (3) вначале производил вычисления, считая, что шары погружены в матрицу с диэлектрической проницаемостью, равной 1. Он учитывал взаимное влияние шаров путем коррекции действующего поля, принимая, что оно равно локальному полю Лорентц – Лоренца (4), а затем перешел к случаю реальной среды путем подстановки

$$\varepsilon^* \rightarrow \varepsilon^*/\varepsilon_1, \quad \varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_2/\varepsilon_1,$$

используя однородность уравнений электростатики относительно  $\varepsilon$  [28].

Покажем, что в данном случае напряженность поля Лорентц – Лоренца равна средней напряженности поля в матрице. Рассмотрим образец неоднородной матричной среды с шарообразными включениями с концентрацией  $N$ , диэлектрические проницаемости матрицы и шаров равны 1 и  $\varepsilon_2$  соответственно. Если к границе образца среды приложено однородное поле напряженностью  $\mathbf{E}_0$ , вектор поляризации  $\mathbf{P}$  в среде как дипольный момент единицы его объема равен [29]:

$$\mathbf{P} = N\mathbf{p} = N \frac{\varepsilon_2 - 1}{2 + \varepsilon_2} a^3 \mathbf{E}', \quad (7)$$

где  $\mathbf{p}$  – дипольный момент одного шара;  $\mathbf{E}'$  – напряженность поля Лорентц – Лоренца.

Подставляя (7) в (4), выразим  $\mathbf{E}'$  через  $\mathbf{E}_0$ :

$$\mathbf{E}' = \left( 1 - f \frac{\varepsilon_2 - 1}{2 + \varepsilon_2} \right)^{-1} \mathbf{E}_0, \quad (8)$$

где  $f = \frac{4\pi}{3} Na^3$  – объемная доля шаров в среде.

В рассматриваемом случае средняя напряженность поля в образце равна  $\mathbf{E}_0$  [30], поэтому имеем уравнение

$$\langle \mathbf{E} \rangle = (1 - f) \langle \mathbf{E}_m \rangle + f \langle \mathbf{E}_2 \rangle = \mathbf{E}_0, \quad (9)$$

где  $\langle \mathbf{E}_m \rangle$  и  $\langle \mathbf{E}_2 \rangle$  – средняя напряженность поля в матрице и шарах соответственно.

Напряженность поля в шаре связана с напряженностью действующего поля формулой [29]

$$\mathbf{E}_2 = \frac{3}{2 + \varepsilon_2} \mathbf{E}', \quad (10)$$

поэтому, выражая  $\mathbf{E}_0$  из (8) и подставляя вместе с (10) в (9), получаем

$$\langle \mathbf{E}_m \rangle = \mathbf{E}'.$$

Последующие исследования [31] показали, что формула МГ (2) обеспечивает высокую точность прогнозирования эффективных свойств среды при объемной доле шаровых включений вплоть до 0,3.

Вследствие последнего равенства за обобщение приближения МГ на более сложные варианты матричных сред логично принимать методы и полученные с их помощью результаты, в которых в качестве действующего на включения поля принимается среднее

поле в матрице [1]. Х. Фрике [32] обобщил результат Гарнетта на матричную среду с хаотически ориентированными эллипсоидами одного вида, взяв в роли действующего поля среднее поле в матрице. Полученное им уравнение для эффективной проводимости имеет вид

$$\sigma^* = \sigma_1 + \frac{1}{3} \frac{f}{1-f} \sum_{i=1}^3 \frac{\sigma_2 - \sigma^*}{1 + L_i (\sigma_2 / \sigma_1 - 1)},$$

где  $f$  – объемная доля эллипсоидов;  $L_i, i = 1, 2, 3$ , – главные значения тензора геометрических факторов эллипсоида с полуосями  $a_1, a_2, a_3$  [1]:

$$L_i = \frac{a_1 a_2 a_3}{2} \int_0^\infty \frac{du}{[a_i^2 + u] R_u}, \quad i = 1, 2, 3; \quad R_u = [(u + a_1^2)(u + a_2^2)(u + a_3^2)]^{1/2}. \quad (11)$$

У. Брэгг и А. Пиппард [33] обобщили формулу МГ на случай матричной среды с одинаково ориентированными эллипсоидами, предваряя свой вывод логическими рассуждениями, обосновывающими выбор среднего поля в матрице в качестве действующего. Среда в данном случае получается анизотропной, главные компоненты тензора  $\epsilon^*$  эффективной диэлектрической проницаемости равны:

$$\epsilon_j^* = \epsilon_1 + \frac{f(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{1 + (1-f)\epsilon_1^{-1}(\epsilon_2 - \epsilon_1)L_j}, \quad j = 1, 2, 3.$$

Наиболее общая форма обобщения приближения МГ для матричных сред с изотропной матрицей и однородными анизотропными эллипсоидальными включениями предложена в работе [34]. Выражение для тензора  $\epsilon^*$  таких сред можно записать в виде

$$\epsilon^* = [(1-f)\epsilon_m \mathbf{I} + f \langle \mathbf{k} \rangle] [(1-f)\mathbf{I} + f \langle \mathbf{\lambda} \rangle]^{-1}, \quad (12)$$

где  $\epsilon_m$  – диэлектрическая проницаемость матрицы;  $f$  – объемная доля всех включений в материале;  $\mathbf{I}$  – единичный тензор 2-го ранга;  $\mathbf{\lambda}$  – тензор, связывающий напряженность  $\mathbf{E}_1$  электрического поля внутри конкретного включения и напряженность  $\mathbf{E}'$  действующего поля:

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{\lambda} \mathbf{E}'.$$

В данном случае, если считать, что образец среды содержит  $N$  включений, для  $k$ -го включения тензор  $\mathbf{\lambda}$  имеет вид

$$\mathbf{\lambda}^{(k)} = [\mathbf{I} + \epsilon_m^{-1} \mathbf{L}^{(k)} (\epsilon^{(k)} - \epsilon_m \mathbf{I})]^{-1}, \quad k = 1, \dots, N. \quad (13)$$

Здесь  $\mathbf{L}^{(k)}$  – тензор геометрических факторов эллипсоидальных включений, главные компоненты которого определяются выражениями, аналогичными (11);  $\epsilon^{(k)}$  – тензор его диэлектрической проницаемости.

Тензор  $\mathbf{k}$   $k$ -го включения определяется формулой

$$\mathbf{k}^{(k)} = \epsilon^{(k)} \mathbf{\lambda}^{(k)}. \quad (14)$$



Усреднение в (12) проводится по всем включениям образца и естественным образом может учитывать различные виды включений с точки зрения материальных характеристик, их разброс по форме и вероятностное распределение их ориентаций. В частности, если образец композита содержит  $n$  видов включений, которые могут различаться как материальными свойствами, так и вероятностными распределениями форм и ориентаций, формула (12) принимает вид

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \left[ \left( 1 - \sum_{p=1}^n f_p \right) \boldsymbol{\varepsilon}^{(m)} \mathbf{I} + \sum_{p=1}^n f_p \langle \boldsymbol{\kappa}^p \rangle \right] \left[ \left( 1 - \sum_{p=1}^n f_p \right) \mathbf{I} + \sum_{p=1}^n f_p \langle \boldsymbol{\lambda}^p \rangle \right]^{-1}, \quad (15)$$

где  $f_p$  – объемная доля включений  $p$ -го вида;  $p = \overline{1, n}$ ;  $\langle \boldsymbol{\lambda}^p \rangle$ ,  $\langle \boldsymbol{\kappa}^p \rangle$  – средние значения тензоров  $\boldsymbol{\lambda}$  и  $\boldsymbol{\kappa}$  по включениям  $p$ -го вида.

В работе [35] проведено сравнение результатов модельных расчетов по формулам (12), (13) и конечноразностных расчетов для двумерных регулярных диэлектрических структур матричного вида с однопипными включениями в форме эллипса. Данная двумерная структура появляется при декомпозиции трехмерной задачи для матричного композита с включениями в виде регулярно расположенных параллельных эллиптических цилиндров. При реализации вычислений по формулам (12), (13) для приведения трехмерной модели к двумерной величина третьей полуоси эллипсоида принималась на несколько порядков большей, чем величины первых двух. Это соответствовало тому, что по форме эллипсоиды приближались к эллиптическим цилиндрам. Расчеты показали, что при объемных долях включений  $f \leq 0,4$  относительная погрешность модельных вычислений по формулам (12), (13) для обеих главных компонент тензора  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$  не превышает 1 % при любой контрастности включений. При этом размеры элементарной ячейки данной структуры должны быть согласованы с размерами полуосей эллипсов [35].

*Обобщение приближения Максвелла Гарнетта для матричного композита с включениями в оболочке.* Рассмотрим образец объемом  $V$  статистически однородной гетерогенной среды, состоящей из однородной изотропной матрицы с погруженными в нее неоднородными включениями общим количеством  $N$ , каждое из которых представляет собой однородное анизотропное эллипсоидальное ядро с однородной анизотропной оболочкой, внешняя граница которой, так же как и внутренняя, является эллипсоидальной. Предполагается отсутствие свободных зарядов, а также двойных заряженных слоев в образце среды. Диэлектрическую проницаемость матрицы обозначим  $\varepsilon_m$ , тензоры диэлектрической проницаемости оболочки и ядра  $k$ -го включения обозначим  $\boldsymbol{\varepsilon}_1^{(k)}$  и  $\boldsymbol{\varepsilon}_2^{(k)}$ ,  $k = \overline{1, N}$ . Полуоси внешней  $S_1^{(k)}$  и внутренней  $S_2^{(k)}$  границ оболочки  $k$ -го включения обозначим  $a_{j1}^{(k)}, a_{j2}^{(k)}, a_{j3}^{(k)}$ ,  $j = 1, 2$ . Пусть  $v_k$  – объемная доля ядра в нем,  $V^{(k)}$  – объем всего  $k$ -го включения,  $f$  – объемная доля всех включений в образце. Очевидно, что

$$v_k = \frac{a_{21}^{(k)} a_{22}^{(k)} a_{23}^{(k)}}{a_{11}^{(k)} a_{12}^{(k)} a_{13}^{(k)}}, \quad V^{(k)} = \frac{4\pi}{3} a_{11}^{(k)} a_{12}^{(k)} a_{13}^{(k)}, \quad k = \overline{1, N}.$$

В работе [36] предложено обобщение приближения МГ на случай неоднородной среды данного типа. Развивая идею Борена и Хафмена [1], в [36] в качестве напряженности действующего поля принята средняя напряженность поля в матрице  $\langle \mathbf{E}^{(m)} \rangle$ ,

а средние значения напряженности электрического поля в оболочке  $\langle \mathbf{E}_1^{(k)} \rangle$  и ядре  $\langle \mathbf{E}_2^{(k)} \rangle$  конкретного включения с номером  $k$  связаны со средней напряженностью поля в матрице так же, как и в таком же уединенном включении в бесконечной матрице с однородным приложенным полем, т. е.

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{E}_1^{(k)} \rangle &= \lambda_1^{(k)} \langle \mathbf{E}^{(m)} \rangle, \quad \langle \mathbf{E}_2^{(k)} \rangle = \lambda_2^{(k)} \langle \mathbf{E}^{(m)} \rangle, \\ \lambda_1^{(k)} &= \frac{1}{1-\nu_k} \left( (1-\nu_k) \mathbf{I} + (\mathbf{L}'_{2,0} - \nu_k \mathbf{L}'_{1,0}) (\boldsymbol{\varepsilon}_2^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}_1^{(k)}) \right) \lambda_{20}^{(k)}, \quad \lambda_2^{(k)} = \lambda_{20}^{(k)}, \\ \lambda_{20}^{(k)} &= \left[ (\mathbf{I} + (\boldsymbol{\varepsilon}_m)^{-1} \mathbf{L}_1^{(k)} (\boldsymbol{\varepsilon}_1^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}_m \mathbf{I})) (\mathbf{I} + (\mathbf{L}'_{2,0} - \nu_k \mathbf{L}'_{1,0}) (\boldsymbol{\varepsilon}_2^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}_1^{(k)})) + \right. \\ &\quad \left. + \nu_k (\boldsymbol{\varepsilon}_m)^{-1} \mathbf{L}_1^{(k)} (\boldsymbol{\varepsilon}_2^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}_1^{(k)}) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь  $\mathbf{L}_1^{(k)}$  – тензор геометрических факторов эллипсоида с поверхностью  $S_1^{(k)}$ , главные компоненты которого определяются формулами, аналогичными (11);  $\mathbf{L}'_{1,0}, \mathbf{L}'_{2,0}$  – тензоры обобщенных геометрических факторов эллипсоидов с внешними границами  $S_1^{(k)}, S_2^{(k)}$  соответственно с учетом анизотропии оболочки  $k$ -го включения в исходной декартовой системе координат  $x^1 x^2 x^3$ , связанные формулами

$$\mathbf{L}'_{j,0} = (\mathbf{T}_k^{-1})^T \mathbf{L}_j^{(k)} \mathbf{T}_k^{-1}, \quad j = 1, 2,$$

с этими же тензорами  $\mathbf{L}_1^{(k)}, \mathbf{L}_2^{(k)}$  в системе координат  $x_k^{1'} x_k^{2'} x_k^{3'}$ , которая получена из системы  $x^1 x^2 x^3$  неортогональным преобразованием [37]

$$\mathbf{r} = \mathbf{T}_k \mathbf{r}'_k, \quad (17)$$

устраняющим анизотропию диэлектрических свойств оболочки  $k$ -го включения. Здесь  $\mathbf{r} = (x^1 x^2 x^3)^T$ ,  $\mathbf{r}'_k = (x_k^{1'} x_k^{2'} x_k^{3'})^T$  – вектор-столбцы текущей точки в данных системах координат.

При преобразовании (17) поверхности-эллипсоиды  $S_1^{(k)}, S_2^{(k)}$  трансформируются соответственно в поверхности-эллипсоиды  $S_1'^{(k)}, S_2'^{(k)}$ , которые предполагаются софокусными; их полуоси обозначаются как  $a_{11'}^{(k)}, a_{12'}^{(k)}, a_{13'}^{(k)}$  и  $a_{21'}^{(k)}, a_{22'}^{(k)}, a_{23'}^{(k)}$ . Оси системы  $x_k^{1'} x_k^{2'} x_k^{3'}$  направлены вдоль осей поверхностей-эллипсоидов  $S_1'^{(k)}, S_2'^{(k)}$ , тензоры  $\mathbf{L}_j'^{(k)}, j = 1, 2$ , в данной системе имеют диагональный вид с главными компонентами

$$\begin{aligned} L_{j i'}'^{(k)} &= \frac{a_{j1'}^{(k)} a_{j2'}^{(k)} a_{j3'}^{(k)}}{2} \int_0^{+\infty} \frac{du}{[u + (a_{j i'}^{(k)})^2] \tilde{R}_j^{(k)}(u)}, \quad i' = 1', 2', 3'; \quad j = 1, 2, \\ \tilde{R}_j^{(k)}(u) &= \left[ (u + (a_{j1'}^{(k)})^2)(u + (a_{j2'}^{(k)})^2)(u + (a_{j3'}^{(k)})^2) \right]^{1/2}. \end{aligned}$$

В итоге для тензора  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$  эффективной диэлектрической проницаемости данного образца неоднородной среды получаем выражение [36]

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \left[ (1-f)\boldsymbol{\varepsilon}_m \mathbf{I} + \sum_{k=1}^N w_k \left( (1-v_k)\boldsymbol{\varepsilon}_1^{(k)} \boldsymbol{\lambda}_1^{(k)} + v_k \boldsymbol{\varepsilon}_2^{(k)} \boldsymbol{\lambda}_2^{(k)} \right) \right] \times \left[ (1-f)\mathbf{I} + \sum_{k=1}^N w_k \left( (1-v_k)\boldsymbol{\lambda}_1^{(k)} + v_k \boldsymbol{\lambda}_2^{(k)} \right) \right]^{-1}, \quad (18)$$

где  $w_k = V^{(k)}/V$  – объемная доля  $k$ -го включения в образце.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda}^{(k)} &= (1-v_k)\boldsymbol{\lambda}_1^{(k)} + v_k \boldsymbol{\lambda}_2^{(k)}, \\ \boldsymbol{\kappa}^{(k)} &= (1-v_k)\boldsymbol{\varepsilon}_1^{(k)} \boldsymbol{\lambda}_1^{(k)} + v_k \boldsymbol{\varepsilon}_2^{(k)} \boldsymbol{\lambda}_2^{(k)}, \quad k = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (19)$$

Тензоры  $\boldsymbol{\lambda}^{(k)}$  и  $\boldsymbol{\kappa}^{(k)}$  по сути являются средними значениями соответствующих тензорных величин по  $k$ -му включению. Вводя средние значения тензоров  $\boldsymbol{\lambda}^{(k)}$  и  $\boldsymbol{\kappa}^{(k)}$  по всем включениям:

$$\langle \boldsymbol{\lambda} \rangle = \frac{1}{f} \sum_{k=1}^N w_k \boldsymbol{\lambda}^{(k)}, \quad \langle \boldsymbol{\kappa} \rangle = \frac{1}{f} \sum_{k=1}^N w_k \boldsymbol{\kappa}^{(k)}, \quad (20)$$

выражение (18) может быть переписано в виде

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \left[ (1-f)\boldsymbol{\varepsilon}_m \mathbf{I} + f \langle \boldsymbol{\kappa} \rangle \right] \left[ (1-f)\mathbf{I} + f \langle \boldsymbol{\lambda} \rangle \right]^{-1}, \quad (21)$$

аналогичном выражению (12) для тензора эффективной диэлектрической проницаемости текстурированного матричного композита с однородными анизотропными эллипсоидальными включениями. Отметим, что в данном случае тензоры  $\boldsymbol{\lambda}$  и  $\boldsymbol{\kappa}$ , усредняемые по всем включениям, имеют более сложный вид. Таким образом, обобщенным приближением МГ на случай неоднородной среды матричного типа с включениями в оболочке является выражение (21), тензорные величины в котором определяются формулами (16), (19), (20). В предельном случае однородных включений тензоры  $\boldsymbol{\lambda}^{(k)}$  и  $\boldsymbol{\kappa}^{(k)}$  вычисляются по формулам (13), (14), что соответствует предложенному в [34] варианту приближения МГ для матричной среды с однородными анизотропными эллипсоидальными включениями.

Рассмотрим частный случай среды с включениями с шарообразным анизотропным ядром в сферической изотропной оболочке. Будем также считать, что материальные характеристики и объемные доли ядер у всех включений одинаковы:

$$v_k = v, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_1^{(k)} = \boldsymbol{\varepsilon}_1, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_2^{(k)} = \boldsymbol{\varepsilon}_2, \quad k = \overline{1, N}.$$

В этом случае [36]

$$\mathbf{L}_1^{(k)} = \mathbf{L}_2^{(k)} = 3^{-1} \mathbf{I}, \quad k = \overline{1, N},$$

и по формулам (16), (19) получим

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda}_{20} &= 9\varepsilon_m \varepsilon_1 \left[ (2\varepsilon_m + \varepsilon_1)(2\varepsilon_1 \mathbf{I} + \boldsymbol{\varepsilon}_2) + 2v(\varepsilon_1 - \varepsilon_m)(\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \varepsilon_1 \mathbf{I}) \right]^{-1}, \\ \boldsymbol{\lambda} &= (3\varepsilon_1)^{-1} \left[ (2\varepsilon_1 \mathbf{I} + \boldsymbol{\varepsilon}_2) - v(\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \varepsilon_1 \mathbf{I}) \right] \boldsymbol{\lambda}_{20}, \quad \boldsymbol{\kappa} = 3^{-1} \left[ (2\varepsilon_1 \mathbf{I} + \boldsymbol{\varepsilon}_2) + 2v(\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \varepsilon_1 \mathbf{I}) \right] \boldsymbol{\lambda}_{20}. \end{aligned} \quad (22)$$

Подставляя (22) в (21), получаем

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}^* = & \varepsilon_m \left[ (1-f)\mathbf{I} + 3f\varepsilon_1 \left\langle \left[ (2\varepsilon_1\mathbf{I} + \boldsymbol{\varepsilon}_2) + 2\nu(\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \varepsilon_1\mathbf{I}) \right] \times \right. \right. \\ & \times \left. \left. \left[ (2\varepsilon_m + \varepsilon_1)(2\varepsilon_1\mathbf{I} + \boldsymbol{\varepsilon}_2) + 2\nu(\varepsilon_1 - \varepsilon_m)(\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \varepsilon_1\mathbf{I}) \right]^{-1} \right\rangle \right] \times \\ & \times \left[ (1-f)\mathbf{I} + 3\varepsilon_m f \left\langle \left( (2\varepsilon_1\mathbf{I} + \boldsymbol{\varepsilon}_2) - \nu(\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \varepsilon_1\mathbf{I}) \right) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \left[ (2\varepsilon_m + \varepsilon_1)(2\varepsilon_1\mathbf{I} + \boldsymbol{\varepsilon}_2) + 2\nu(\varepsilon_1 - \varepsilon_m)(\boldsymbol{\varepsilon}_2 - \varepsilon_1\mathbf{I}) \right]^{-1} \right\rangle \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (23)$$

Усреднение в (23) проводится по всем ориентациям кристаллографических осей ядер включений.

**Приближение эффективной среды и его обобщения.** Формула МГ (2) несимметрична относительно параметров, характеризующих компоненты 1 и 2 смеси, что естественно, поскольку компонент 1 – матрица – непрерывный, а компонент 2 – включения, окруженные со всех сторон матрицей. Если оба компонента образуют статистическую смесь, т. е. зерна каждого компонента могут контактировать как с зёрнами одного, так и другого компонента, то в этом случае можно считать, что они погружены в некоторую усредненную эффективную среду с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon^*$ . Действующее поле в этой эффективной среде принимается равным среднему полю в системе с напряженностью  $\mathbf{E}$ . Тогда напряженности поля  $\mathbf{E}_1$ ,  $\mathbf{E}_2$  и векторы поляризации  $\mathbf{P}_1$  и  $\mathbf{P}_2$  внутри сферических включений 1-го и 2-го видов будут равны [38]

$$\mathbf{E}_i = \frac{3\varepsilon^*}{2\varepsilon^* + \varepsilon_i} \mathbf{E}, \quad \mathbf{P}_i = \frac{\varepsilon_i - 1}{4\pi} \frac{3\varepsilon^*}{2\varepsilon^* + \varepsilon_i} \mathbf{E}, \quad i = 1, 2.$$

Средняя поляризация в неоднородной среде с объемными долями фаз  $\delta_1$  и  $\delta_2$  равна:

$$\langle \mathbf{P} \rangle = \delta_1 \frac{\varepsilon_1 - 1}{4\pi} \frac{3\varepsilon^*}{2\varepsilon^* + \varepsilon_1} \mathbf{E} + \delta_2 \frac{\varepsilon_2 - 1}{4\pi} \frac{3\varepsilon^*}{2\varepsilon^* + \varepsilon_2} \mathbf{E}.$$

Так как  $\langle \mathbf{P} \rangle = (4\pi)^{-1}(\varepsilon^* - 1)\mathbf{E}$ , то для  $\varepsilon^*$  после упрощения получим уравнение [38]

$$\frac{\varepsilon^* - \varepsilon_1}{3\varepsilon^*} = \delta_2 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{2\varepsilon^* + \varepsilon_2}. \quad (24)$$

Уравнение (24) элементарно приводится к симметричному уравнению Бруггемана (5). Метод, с помощью которого получено это уравнение, называют приближением эффективной среды, или приближением Бруггемана. Для статистической смеси  $n$  изотропных компонентов получается обобщение уравнения (5):

$$\sum_{i=1}^n \delta_i \frac{\varepsilon_i - \varepsilon^*}{2\varepsilon^* + \varepsilon_i} = 0.$$

Одним из преимуществ приближения эффективной среды считается то, что оно в отличие от приближения МГ предсказывает порог перколяции при некотором граничном значении доли более проводящей фазы [39]. Среди попыток обобщения прибли-

жения эффективной среды следует отметить обобщенный подход эффективной среды Д. Страуда [30], который, используя идею вспомогательной однородной референтной среды, заимствованную у советских физиков-теоретиков [40], и метод функций Грина, получил интегральное уравнение и вывел из него свое приближение, имеющее большую степень общности. Итоговая формула для тензора эффективной проводимости неоднородной среды, состоящей из эллипсоидальных кристаллитов, имеет вид

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \boldsymbol{\sigma}_0 + \langle (\mathbf{I} - \delta\boldsymbol{\sigma}\boldsymbol{\Gamma})^{-1} \rangle^{-1} \langle (\mathbf{I} - \delta\boldsymbol{\sigma}\boldsymbol{\Gamma})^{-1} \delta\boldsymbol{\sigma} \rangle, \quad (25)$$

где  $\boldsymbol{\sigma}_0$  – проводимость референтной среды;  $\delta\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}) = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}) - \boldsymbol{\sigma}_0$ ;  $\boldsymbol{\Gamma} \equiv \boldsymbol{\Gamma}_i$  – тензор, связанный с  $i$ -м кристаллитом:

$$\boldsymbol{\Gamma}_i = -\oint\!\!\!\!\!\oint_{S'_i} d^2\mathbf{r}' (\nabla G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')) \otimes \mathbf{n}'. \quad (26)$$

Здесь  $S'_i$  – поверхность  $i$ -го кристаллита;  $\mathbf{n}'$  – нормаль к  $S'_i$ .

Усреднение в формуле (25) проводится по всем кристаллитам образца. Тип аппроксимации в (25) зависит от выбора  $\boldsymbol{\sigma}_0$ . Так, например, если  $\boldsymbol{\sigma}_0 = \boldsymbol{\sigma}^*$ , то из (25) получим уравнение для  $\boldsymbol{\sigma}^*$ :

$$\langle (\mathbf{I} - (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}^*)\boldsymbol{\Gamma})^{-1} (\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}^*) \rangle = 0. \quad (27)$$

Данный тип приближения называют методом самосогласованного решения [19], который можно считать обобщением приближения эффективной среды в узком смысле. В случае статистической двухкомпонентной смеси с изотропными компонентами со сферическими частицами уравнение (27) приводит к симметричному уравнению Бруггемана. Для матричного композита с изотропными шаровыми включениями одного вида при  $\boldsymbol{\sigma}_0$ , равной проводимости матрицы, формула (25) приводит к уравнению МГ для  $\boldsymbol{\sigma}^*$ .

Уравнения (25) и (27) позволяют учитывать такие особенности структуры неоднородной среды, как разброс по ориентациям и формам кристаллитов, многокомпонентность среды. В связи с этим обобщенный подход эффективной среды впоследствии активно использовался для прогнозирования свойств неоднородных сред [41–43].

**Обобщенное сингулярное приближение.** Обобщенное сингулярное приближение (ОСП) [24, 44] теории случайных полей, а также сингулярное приближение (более громоздкий метод, характерный для ранних работ [40, 45]) развиты на основе формального решения краевой задачи для стохастического дифференциального уравнения эллиптического типа

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) \nabla \varphi(\mathbf{r}) = 0, \quad \varphi|_S = -(\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{r}) \quad (28)$$

методом функций Грина. Учитывается также то, что вторая производная функции Грина является обобщенной функцией и может быть разложена на формальную  $G_{,ij}^{(f)}$  и сингулярную  $G_{,ij}^{(s)}$  составляющие [46]:

$$G_{,ij}(\mathbf{r}) = G_{,ij}^{(f)}(\mathbf{r}) + G_{,ij}^{(s)}(\mathbf{r}). \quad (29)$$

В задаче (28)  $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r})$  – тензор диэлектрической проницаемости неоднородной среды, являющийся случайной кусочно-постоянной функцией точки;  $\varphi(\mathbf{r})$  – скалярный электростатический потенциал;  $S$  – граница рассматриваемого образца неоднородной среды;  $\mathbf{E}_0$  – напряженность приложенного электрического поля.

Формализм ОСП включает в себя наряду с (28) рассмотрение аналогичной краевой задачи для однородного тела сравнения такой же формы с диэлектрической проницаемостью  $\boldsymbol{\varepsilon}^c = \text{const}$ , распределение потенциала в котором обозначим как  $\varphi^c(\mathbf{r})$  [44]. Вводя обозначения для разностей между величинами, относящихся к задаче (28) и задаче для тела сравнения

$$\varphi'(\mathbf{r}) = \varphi(\mathbf{r}) - \varphi^c(\mathbf{r}), \quad \boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r}) = \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) - \boldsymbol{\varepsilon}^c,$$

и вычитая из одной задачи другую, получаем краевую задачу

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^c \nabla \varphi'(\mathbf{r}) = -\nabla \cdot \boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r}) \nabla \varphi(\mathbf{r}), \quad \varphi'|_S = 0, \quad (30)$$

решение которой можно записать в виде [44]

$$\varphi'(\mathbf{r}) = \int_V G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) (\nabla \cdot \boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r}_1) \nabla \varphi(\mathbf{r}_1)) d\mathbf{r}_1, \quad (31)$$

где  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)$  – функция Грина, являющаяся решением краевой задачи

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\varepsilon}^c \nabla G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_1), \quad G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)|_{\mathbf{r}_1 \in S} = 0. \quad (32)$$

Дальнейшие преобразования проводятся в пределе неограниченного тела (тогда  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1) = G(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r})$ ), и для эффективной диэлектрической проницаемости образца неоднородной среды получается точное операторное выражение [44]

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \left\langle \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) (\mathbf{I} - \mathbf{Q}(\mathbf{r}) \boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle \left\langle (\mathbf{I} - \mathbf{Q}(\mathbf{r}) \boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle^{-1},$$

где  $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$  – тензорный интегральный оператор, действующий по формуле

$$\mathbf{Q}(\mathbf{r}) \mathbf{f}(\mathbf{r}) = \int \nabla^1 \otimes \nabla^1 G(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}) \mathbf{f}(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1. \quad (33)$$

Здесь  $\nabla^1 \otimes \nabla^1 G(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r})$  – тензор вторых производных функции Грина, индекс 1 у оператора Гамильтона означает дифференцирование по  $\mathbf{r}_1$ .

Разложение (29) выделяет у  $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$  локальную и нелокальную части:  $\mathbf{Q}(\mathbf{r}) = \mathbf{Q}^{loc}(\mathbf{r}) + \mathbf{Q}^{nonl}(\mathbf{r})$ , где локальная часть определяется сингулярной составляющей  $G_{,ij}^{(s)}$ , а нелокальная – формальной  $G_{,ij}^{(f)}$ , которая получается операцией формального дифференцирования. Сингулярная составляющая вычисляется по формуле [44]

$$G_{,ij}^{(s)}(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r}) \oint_{S'} G_{,i}(\mathbf{r}') n'_j dS', \quad (34)$$

где интегрирование проводится по внешней границе  $S'$  включения (кристаллита). Подставляя (34) в (33), получаем, что действие локальной части оператора  $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$  сводится к умножению на постоянный тензор:

$$\mathbf{Q}^{loc}(\mathbf{r})\mathbf{f}(\mathbf{r}) = \int \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}) \left( \oint_{S'} \nabla' G(\mathbf{r}') \otimes \mathbf{n}' dS' \right) \mathbf{f}(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1 \equiv \mathbf{g} \cdot \mathbf{f}(\mathbf{r}),$$

где

$$\mathbf{g} = \oint_{S'} \nabla' G(\mathbf{r}') \otimes \mathbf{n}' dS'. \quad (35)$$

Далее принимается, что  $G_{,ij}(\mathbf{r}) \approx G_{,ij}^{(s)}(\mathbf{r})$ , т. е. пренебрегаем нелокальной частью оператора  $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$  и подставляем вместо  $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$  постоянный тензор  $\mathbf{g}$ . Основанием для этого является предположение об однородности поля в пределах конкретного однородного включения, форма которого считается эллипсоидальной. Таким образом, в ОСП выражение для тензора эффективной диэлектрической проницаемости принимает вид

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \left\langle \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r})(\mathbf{I} - \mathbf{g}\boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle \left\langle (\mathbf{I} - \mathbf{g}\boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle^{-1}. \quad (36)$$

Компоненты тензора  $\mathbf{g}$  в системе эллипсоида могут быть вычислены из следующих выражений:

$$g_{ij} = -\frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{n_i n_j}{n_k \varepsilon_{kl}^c n_l} \sin \alpha d\alpha d\beta, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

где компоненты неединичной нормали к границе эллипсоида  $S'$  ( $a_1, a_2, a_3$  – полуоси) равны:

$$n_1 = a_1^{-1} \sin \alpha \cos \beta, \quad n_2 = a_2^{-1} \sin \alpha \sin \beta, \quad n_3 = a_3^{-1} \cos \alpha.$$

Несмотря на пренебрежение нелокальной частью оператора  $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$ , ОСП позволяет учитывать межчастичные взаимодействия, но в некотором усредненном варианте [24]. ОСП, как и обобщенный подход эффективной среды Д. Страуда, способно учитывать разброс ориентаций и форм включений, многокомпонентность среды. Сравнение выражений для тензора эффективных характеристик в обобщенном подходе эффективной среды (25), (26) и в ОСП (35), (36) приводит к выводу, что оба приближения являются родственными. ОСП находит широкое применение для прогнозирования эффективных упругих и транспортных свойств неоднородных сред и распределения в них локальных полей [47–49].

Рассмотрим двухкомпонентную среду со скалярной диэлектрической проницаемостью и сферическими частицами обоих компонентов. Возьмем среду сравнения скалярной:  $\boldsymbol{\varepsilon}^c = \varepsilon^c \mathbf{I}$ . Компоненты тензора  $\mathbf{g}$  частиц обоих компонентов равны:

$$g_{ij} = -(3\varepsilon^c)^{-1} \delta_{ij} \equiv g \delta_{ij}, \quad g = -(3\varepsilon^c)^{-1}, \quad (37)$$

где  $\delta_{ij}$  – символ Кронеккера.

Усреднение в (36) в рассматриваемом случае сводится к вычислению среднего по объему, что с учетом (37) приводит к следующему выражению для эффективной диэлектрической проницаемости данной среды:

$$\varepsilon^* = \frac{v_1 \varepsilon_1 (1 - g(\varepsilon_1 - \varepsilon^c))^{-1} + v_2 \varepsilon_2 (1 - g(\varepsilon_2 - \varepsilon^c))^{-1}}{v_1 (1 - g(\varepsilon_1 - \varepsilon^c))^{-1} + v_2 (1 - g(\varepsilon_2 - \varepsilon^c))^{-1}}, \quad (38)$$

где  $v_1, v_2$  – объемные доли компонентов 1 и 2.

Варьируя  $\varepsilon^c$ , можно получать различные виды приближений для  $\varepsilon^*$ . В [44] показано, что при выборе  $\varepsilon^c = \varepsilon_1$  из выражения (38) получается уравнение МГ, в котором роль матрицы играет компонент 1, а при выборе  $\varepsilon^c = \varepsilon^*$ , т. е. применив идею самосогласования, можно получить симметричное уравнение Бруггемана. В [44] также показано, что из (38) или его обобщения на случай  $n$ -компонентной среды соответствующим выбором  $\varepsilon^c$  могут быть получены верхние и нижние оценки Винера [18] и Хашина – Штрикмана [27]. Приближение МГ (12), (13) для матричной среды с эллипсоидальными анизотропными включениями также может быть получено как частный случай ОСП (36), если взять матрицу в качестве среды сравнения, т. е. положив  $\varepsilon^c = \varepsilon_m$  [44].

**Дифференциальный подход на основе обобщенного сингулярного приближения.** Рассмотрим дифференциальный процесс формирования образца объемом  $V$  двухфазного (двухкомпонентного) композита с изотропными компонентами с частицами шарообразной формы. Будем считать, что в начальный момент весь объем занимают частицы фазы 1, а также, что процесс происходит при постоянном объеме  $V$  образца. Вычисления будем проводить на основе формулы (38), в течение всего процесса композит будем считать статистически однородным и изотропным [47].

Пусть в некоторый момент из композита удаляется его объемная доля  $\Delta v$  и добавляется такая же доля фазы 2. При этом приращение объемной доли фазы 2 составляет

$$\Delta v_2 = \frac{\Delta V_2}{V} = \Delta v (1 - v_2),$$

где  $v_2$  – текущее значение объемной доли фазы 2.

Применим формулу (38) к измененному в результате указанного замещения объемной доли  $\Delta v$  композиту, считая, что композит после изменения состоит из однородной фазы 1\* с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon^*$ , по которой равномерно распределена объемная доля  $\Delta v$  фазы 2. При этом эффективная диэлектрическая проницаемость получит приращение  $\Delta \varepsilon^*$ :

$$\varepsilon^* + \Delta \varepsilon^* = \frac{(1 - \Delta v) \varepsilon^* (1 - g(\varepsilon^* - \varepsilon^c))^{-1} + \Delta v \varepsilon_2 (1 - g(\varepsilon_2 - \varepsilon^c))^{-1}}{(1 - \Delta v) (1 - g(\varepsilon^* - \varepsilon^c))^{-1} + \Delta v (1 - g(\varepsilon_2 - \varepsilon^c))^{-1}}.$$

Выразим  $\Delta \varepsilon^*$  с учетом того, что  $\Delta v = \Delta v_2 / (1 - v_2)$ , и линеаризуем по  $\Delta v_2$ :

$$\Delta \varepsilon^* = \frac{\Delta v_2}{1 - v_2} \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon^*) (1 - g(\varepsilon^* - \varepsilon^c))}{(1 - g(\varepsilon_2 - \varepsilon^c))},$$

откуда получим дифференциальное уравнение [47]

$$\frac{(1 - g(\varepsilon_2 - \varepsilon^c)) d\varepsilon^*}{(\varepsilon_2 - \varepsilon^*) (1 - g(\varepsilon^* - \varepsilon^c))} = \frac{dv_2}{1 - v_2}. \quad (39)$$



При решении уравнения (39) будем считать параметры среды сравнения подстраиваемыми под изменяющуюся среду в виде линейной зависимости от  $\varepsilon^*$ :

$$\varepsilon^c = (1 - \alpha)\varepsilon_0^c + \alpha\varepsilon^*, \quad (40)$$

где  $\varepsilon_0^c$ ,  $\alpha$  – некоторые постоянные.

Подставляя (40) в (39) и учитывая, что  $g = -3^{-1}((1 - \alpha)\varepsilon_0^c + \alpha\varepsilon^*)^{-1}$ , получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{(2\alpha\varepsilon^* + 2(1 - \alpha)\varepsilon_0^c + \varepsilon_2)d\varepsilon^*}{(\varepsilon_2 - \varepsilon^*)((2\alpha + 1)\varepsilon^* + 2(1 - \alpha)\varepsilon_0^c)} = \frac{dv_2}{1 - v_2},$$

интегрируя которое с начальным условием  $\varepsilon^*|_{v_2=0} = \varepsilon_1$ , имеем [47]

$$\left( \frac{(\alpha + 1/2)\varepsilon^* + (1 - \alpha)\varepsilon_0^c}{(\alpha + 1/2)\varepsilon_1 + (1 - \alpha)\varepsilon_0^c} \right)^{\frac{1}{2\alpha + 1}} = \frac{1}{1 - v_2} \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon^*}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (41)$$

Уравнение (41) имеет еще более высокую степень общности, чем уравнение (38), на основе которого оно получено с помощью дифференциального процесса [47]. Полагая  $\alpha = 0$  в (41), получаем уравнение, равносильное (38), если  $\alpha = 1$ , получаем асимметричное уравнение Бруггемана (6), если взять промежуточные значения  $0 < \alpha < 1$ , из (41) можно получать новые варианты приближений. В [47] показано, что при любых значениях  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_0^c$ ,  $v_2$ ,  $\alpha$ , удовлетворяющих условию  $\varepsilon_1 > 0$ ,  $\varepsilon_2 > 0$ ,  $\varepsilon_0^c > 0$ ,  $0 < v_2 < 1$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , метод Ньютона [50] для уравнения (41) сходится к корню  $\varepsilon^*$ , если в качестве начального приближения взять  $\varepsilon^0 = \varepsilon_1$ .

Поскольку асимметричная формула Бруггемана считается частным случаем дифференциального приближения эффективной среды, то можно сказать, что входящий в уравнение (41) параметр  $\alpha$  является мерой дифференциальности приближения. В работе [31] на основе точных решений в форме кратных рядов смоделирована матричная среда с металлическими шаровыми включениями, размеры которых имеют логнормальное распределение с дисперсией  $\sigma$ . Сходство результатов, полученных в [31], с результатами модельных расчетов по уравнению (41) свидетельствует о сильной корреляции между параметром  $\alpha$  уравнения (41) и дисперсией  $\sigma$  размеров шаровых включений в среде [47].

**Обобщенное приближение эффективного поля для неоднородной среды с включениями в многослойной оболочке.** Пусть образец объемом  $V$  с границей  $S$  статистически однородной гетерогенной среды состоит из включений вложенной структуры,  $N$  – количество всех включений в образце. Конкретное включение с номером  $k$  считается состоящим из однородного ядра  $V_n^{(k)}$ , которое окружено оболочкой, имеющей однородные слои  $V_{n-1}^{(k)}, \dots, V_1^{(k)}$ ,  $k = \overline{1, N}$ , где  $V_{n-1}^{(k)}$  – ближайший к ядру слой,  $V_1^{(k)}$  – самый внешний слой оболочки  $k$ -го включения. Максимальное количество однородных областей, составляющих конкретное включение среды, будем считать равным  $n$ . Область, занимаемую всем  $k$ -м включением, обозначим как  $V^{(k)}$ . Введем также обо-

значение  $f_j^{(k)}$  для относительных объемных долей слоев оболочки и ядра в  $k$ -м включении:

$$f_j^{(k)} = V_j^{(k)} / V^{(k)}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Обозначим  $\boldsymbol{\varepsilon}_i^{(k)}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;  $k = \overline{1, N}$ , тензоры диэлектрической проницаемости областей  $V_i^{(k)}$ . Будем также считать, что свободные заряды в среде отсутствуют.

Пусть к границе данного образца гетерогенной среды приложено постоянное электрическое поле напряженностью  $\mathbf{E}_0$ . Начало процедуры вычисления тензора  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$  образца данной среды аналогично используемой в ОСП: рассматривается краевая задача (28) для скалярного электрического потенциала  $\varphi(\mathbf{r})$  в образце неоднородной среды, а также аналогичная задача для однородного тела сравнения такой же формы и размеров. Вычитая из первой задачи вторую, получаем краевую задачу (30), решение которой записывается в виде интеграла (31). Преобразовав (31) по частям и взяв градиент от левой и правой частей, получим

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r}) = \int \nabla^1 \otimes \nabla^1 G(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}) \boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r}_1) \mathbf{E}(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1. \quad (42)$$

Интеграл в (42) подразумевается в смысле главного значения с вырезанным бесконечно малым шаром вокруг точки  $\mathbf{r}$  [46]. Поскольку  $\mathbf{E}'(\mathbf{r}) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) - \mathbf{E}^c$ , где  $\mathbf{E}^c = \text{const}$  – напряженность электрического поля в теле сравнения, из (42) получим уравнение для напряженности электрического поля в образце неоднородной среды:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^c + \mathbf{Q}(\mathbf{r})(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) - \boldsymbol{\varepsilon}^c) \mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad (43)$$

где  $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$  – тензорный интегральный оператор, определяемый формулой (33).

Пусть текущая точка  $\mathbf{r}$  лежит внутри  $k$ -го включения. Разложим оператор  $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$  на внешнюю и внутреннюю составляющие по отношению к  $k$ -му включению:  $\mathbf{Q}(\mathbf{r}) = \mathbf{Q}_{ext}^{(k)}(\mathbf{r}) + \mathbf{Q}_{int}^{(k)}(\mathbf{r})$ , тогда (43) примет вид

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^c + \mathbf{Q}_{ext}^{(k)}(\mathbf{r})(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) - \boldsymbol{\varepsilon}^c) \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{Q}_{int}^{(k)}(\mathbf{r})(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) - \boldsymbol{\varepsilon}^c) \mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \in V^{(k)}. \quad (44)$$

Первые два члена в (44) можно назвать напряженностью эффективного поля в данной точке  $k$ -го включения, которое формируется в результате приложения к образцу композита внешнего поля и наличия в образце других включений [51]:

$$\mathbf{E}_{eff}^{(k)}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}^c + \mathbf{Q}_{ext}^{(k)}(\mathbf{r})(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) - \boldsymbol{\varepsilon}^c) \mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \in V^{(k)}.$$

С учетом того, что

$$\mathbf{Q}_{int}^{(k)}(\mathbf{r})(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) - \boldsymbol{\varepsilon}^c) \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^n \int_{V_j^{(k)}} \nabla^1 \otimes \nabla^1 G(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}) (\boldsymbol{\varepsilon}_j^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}^c) \mathbf{E}(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1,$$

выражение (44) для напряженности поля в точке  $k$ -го включения запишем в виде

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_{eff}^{(k)}(\mathbf{r}) + \sum_{j=1}^n \int_{V_j^{(k)}} \nabla^1 \otimes \nabla^1 G(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}) (\boldsymbol{\varepsilon}_j^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}^c) \mathbf{E}(\mathbf{r}_1) d\mathbf{r}_1, \quad \mathbf{r} \in V^{(k)}.$$

После громоздкой вычислительной процедуры, изложенной в [51], в итоге для тензора  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$  данного образца неоднородной среды в предположении эллипсоидальности границ всех слоев оболочек включений получим выражение

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \left\langle \left( \sum_{i=1}^n f_i \boldsymbol{\varepsilon}_i \boldsymbol{\lambda}_{in} \right) \boldsymbol{\lambda}_{n0} \right\rangle \left\langle \left( \sum_{i=1}^n f_i \boldsymbol{\lambda}_{in} \right) \boldsymbol{\lambda}_{n0} \right\rangle^{-1}, \quad (45)$$

где  $\boldsymbol{\lambda}_{n0}$ ,  $\boldsymbol{\lambda}_{in}$ ,  $i = 1, \dots, n-1$ , – тензоры, связанные с конкретным включением.

Тензор  $\boldsymbol{\lambda}_{n0}^{(k)}$  связывает среднюю напряженность поля в ядре  $k$ -го включения и среднюю напряженность эффективного поля:

$$\langle \mathbf{E} \rangle_n^{(k)} = \boldsymbol{\lambda}_{n0}^{(k)} \langle \mathbf{E}_{eff} \rangle^{(k)},$$

а тензор  $\boldsymbol{\lambda}_{in}^{(k)}$  – среднюю напряженность поля в  $i$ -м слое оболочки  $k$ -го включения со средней напряженностью поля в ядре этого же включения:

$$\langle \mathbf{E} \rangle_i^{(k)} = \boldsymbol{\lambda}_{in}^{(k)} \langle \mathbf{E} \rangle_n^{(k)}, \quad i = \overline{1, n-1},$$

причем [51]

$$\boldsymbol{\lambda}_{n0}^{(k)} = \left[ \sum_{i=1}^n f_i^{(k)} (\mathbf{I} - \mathbf{g}_1^{(k)} (\boldsymbol{\varepsilon}_i^{(k)} - \boldsymbol{\varepsilon}^c)) \boldsymbol{\lambda}_{in}^{(k)} \right]^{-1}. \quad (46)$$

Тензор  $\mathbf{g}_1^{(k)}$ , используемый в (46), определяется формулой

$$\mathbf{g}_1^{(k)} = \int_{V^{(k)}} \nabla \otimes \nabla G(\mathbf{r}) d\mathbf{r}. \quad (47)$$

Усреднение в (45) проводится по всем включениям, составляющим образец (матрицу также можно считать состоящей из включений). В предельном случае однородных включений выражение (45) в обобщенном приближении эффективного поля упрощается до выражения (36) в ОСП [51]. Также можно показать, что для матричной среды с включениями в однослойной оболочке обобщенное приближение МГ, реализуемое формулами (16), (19)–(21), является частным случаем обобщенного приближения эффективного поля при выборе матрицы в качестве среды сравнения. В целом следует отметить, что обобщенное приближение эффективного поля является подходом с большой степенью общности, который учитывает такие особенности структуры неоднородных сред, как несколько уровней ее вложенности, разбросы по ориентациям и формам включений, а также наличие нескольких видов включений.

Рассмотрим случай матричного композита с однотипными сферическими включениями со сферическими изотропными слоями оболочки. Выражения для электрического потенциала в оболочках и ядре изолированного включения, помещенного в бесконечную среду сравнения с однородным приложенным полем напряженностью  $\mathbf{E}_0$ , имеют вид ( $\mathbf{k}$  – орт в направлении  $\mathbf{E}_0$ ) [52]:

$$\varphi_i(\mathbf{r}) = A_i (\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) + B_i \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}{r^3}, \quad i = \overline{1, n-1},$$

$$\varphi_n(\mathbf{r}) = A_n(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}),$$

где  $A_i, B_i$  – постоянные коэффициенты, определяемые из граничных условий.

Функция Грина, определяемая задачей (32), имеет вид [53]

$$G(\mathbf{r}) = \left( 4\pi \sqrt{\det \boldsymbol{\varepsilon}^c} \sqrt{\mathbf{r}^T (\boldsymbol{\varepsilon}^c)^{-1} \mathbf{r}} \right)^{-1}. \quad (48)$$

Приняв, что  $\boldsymbol{\varepsilon}^c = \varepsilon^c \mathbf{I}$ , и проведя вычисления по формулам (47), (48), получим

$$\mathbf{g}_i^{(k)} = -(3\varepsilon^c)^{-1} \mathbf{I}, \quad k = \overline{1, N}.$$

Для тензоров включений  $\boldsymbol{\lambda}_{i_n}, i = \overline{1, n}$ , имеем  $\boldsymbol{\lambda}_{i_n} = (A_i / A_n) \mathbf{I}$ . Тогда, считая частицы матрицы сферическими без оболочки, получаем в итоге для эффективной диэлектрической проницаемости композита выражение [51]

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \varepsilon_m \frac{\sum_{i=1}^n f_i [(1-f)2\varepsilon^c \varepsilon_m + f(2\varepsilon^c + \varepsilon_m)\varepsilon_i] A_i}{\sum_{i=1}^n f_i [(1-f)(2\varepsilon^c + \varepsilon_i) + f(2\varepsilon^c + \varepsilon_m)] A_i}.$$

**Метод учета вероятностного распределения ориентаций включений.** Рассмотрим случай матричного композита с однотипными однородными эллипсоидальными включениями, ориентации которых распределены по некоторому вероятностному закону. В обобщенном приближении МГ выражение для вычисления тензора  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$  имеет вид (12), где тензоры  $\boldsymbol{\lambda}$  и  $\boldsymbol{\kappa}$  определяются формулами (13), (14). Усреднение в (12) в данном случае – это вычисление средних значений тензоров 2-го ранга  $\boldsymbol{\lambda}$  и  $\boldsymbol{\kappa}$  по всем ориентациям включений в некоторой фиксированной системе координат  $xuz$  (целесообразно ее связывать с текстурой образца). Введем системы координат  $\xi^{(k)} \eta^{(k)} \zeta^{(k)}, k = \overline{1, N}$  ( $N$  – количество включений в образце композита), связанные с включениями, оси которых совпадают с осями соответствующих эллипсоидов  $V^{(k)}$ . Ориентации систем  $\xi^{(k)} \eta^{(k)} \zeta^{(k)}$  относительно  $xuz$  (повороты от  $xuz$  к  $\xi^{(k)} \eta^{(k)} \zeta^{(k)}$ ) обозначим как  $g^{(k)}(\psi^{(k)}, \theta^{(k)}, \varphi^{(k)})$ , где  $\psi^{(k)}, \theta^{(k)}, \varphi^{(k)}$  – углы Эйлера. Будем также считать, что ориентации системы главных осей тензора  $\boldsymbol{\varepsilon}_i^{(k)}$  диэлектрической проницаемости  $k$ -го включения и системы  $\xi^{(k)} \eta^{(k)} \zeta^{(k)}$  совпадают у всех включений. В этом случае тензоры  $\boldsymbol{\lambda}^{(k)}, \boldsymbol{\kappa}^{(k)}$   $k$ -го включения в системе координат  $\xi^{(k)} \eta^{(k)} \zeta^{(k)}$  диагональные, их главные компоненты

$$\lambda_j^{(k)} = \lambda'_j = (1 + \varepsilon_m^{-1} L'_j (\varepsilon'_{1j} - \varepsilon_m))^{-1}, \quad \kappa_j^{(k)} = \kappa'_j = \varepsilon'_{1j} \lambda'_j, \quad j = 1, 2, 3, \quad k = \overline{1, N},$$

где  $\varepsilon'_{1j}$  и  $L'_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) – главные компоненты тензоров диэлектрической проницаемости и геометрических факторов включений, одинаковые для всех включений.

В системе  $xuz$  компоненты тензоров  $\boldsymbol{\lambda}^{(k)}, \boldsymbol{\kappa}^{(k)}$  зависят от ориентации  $g^{(k)}$ . Поэтому, чтобы получить выражение для тензора  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$  в системе  $xuz$ , нужно найти компоненты

тензоров  $\lambda^{(k)}$ ,  $\kappa^{(k)}$  в системе  $xuz$  как функции параметров, описывающих ориентацию  $g'^{(k)}$ , а затем выполнить их усреднение по ориентациям.

Пусть  $p(\psi', \theta', \varphi')$  – плотность распределения ориентаций включений с учетом множителя инвариантной меры  $\sin \theta'$  [54]. Если  $\lambda_{lj}(\psi', \theta', \varphi')$ ,  $l, j = 1, 2, 3$ , – выражения для компонент тензора  $\lambda$  конкретного включения в системе  $xuz$ , то их средние по ориентациям в системе  $xuz$  значения будут вычисляться по формуле

$$\langle \lambda_{lj} \rangle = \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi} d\theta' \int_0^{2\pi} d\psi' \lambda_{lj}(\psi', \theta', \varphi') p(\psi', \theta', \varphi'), \quad l, j = 1, 2, 3. \quad (49)$$

Средние значения  $\langle \kappa_{lj} \rangle$  вычисляются по аналогичной формуле.

Поскольку тензор  $\lambda$  симметричный, для вычисления  $\lambda_{lj}(\psi', \theta', \varphi')$  можно применить метод, где используется теория представлений группы  $SO(3)$  [54]. Данный метод применялся К. А. Валиевым и его учениками для описания вращательных стохастических процессов [55, 56]. Идея применить данный метод для усреднения по ориентациям включений в композите принадлежит Е. Н. Иванову [57]. Разложим  $\lambda$  на тензоры, преобразующиеся по неприводимым представлениям группы  $SO(3)$  весов 0 и 2:

$$\lambda_{lj} = \lambda_{lj}^I + \lambda_{lj}^{II}, \quad (50)$$

где

$$\lambda_{lj}^I = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \delta_{lj} / 3, \quad \lambda_{lj}^{II} = \lambda_{lj} - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \delta_{lj} / 3. \quad (51)$$

Тензор  $\lambda_{lj}^I$  – кратный единичному и не меняется при вращениях системы координат, тензор  $\lambda_{lj}^{II}$  – симметричный с нулевым следом, преобразуется по неприводимому представлению веса 2. Введем тензор 1-го ранга  $\tilde{\lambda}$  с пятью компонентами

$$\tilde{\lambda}_{\pm 2} = (\lambda_{11}^{II} - \lambda_{22}^{II}) / 2 \mp i \lambda_{12}^{II}, \quad \tilde{\lambda}_{\pm 1} = \mp \lambda_{13}^{II} + i \lambda_{23}^{II}, \quad \tilde{\lambda}_0 = \sqrt{3/2} \lambda_{33}^{II}. \quad (52)$$

Выражения для компонент тензора в системе  $\xi\eta\zeta$  с учетом (50)–(52) и того, что в ней тензор  $\lambda$  диагональный с компонентами  $\lambda'_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ), имеют вид [34]

$$\tilde{\lambda}'_{\pm 2} = (\lambda'_1 - \lambda'_2) / 2, \quad \tilde{\lambda}'_{\pm 1} = 0, \quad \tilde{\lambda}'_0 = (2\lambda'_3 - \lambda'_1 - \lambda'_2) / \sqrt{6}.$$

При переходе от  $\xi\eta\zeta$  к  $xuz$  компоненты  $\tilde{\lambda}$  преобразуются по формулам [34]

$$\tilde{\lambda}_m = \sum_{s=-2}^2 T_{ms}^2(g') \tilde{\lambda}'_s, \quad m = -2, -1, \dots, 2, \quad (53)$$

где  $g' = g'(\psi', \theta', \varphi')$  – поворот от  $xuz$  к  $\xi\eta\zeta$  в системе  $xuz$ ;  $T_{ms}^2(g'(\psi', \theta', \varphi'))$  – обобщенные сферические функции веса 2 [54]. Для средних по ориентациям включений значений компонент  $\tilde{\lambda}_m$  по аналогии с (49) с учетом (53) имеем

$$\langle \tilde{\lambda}_m \rangle = \sum_{s=-2}^2 \tilde{\lambda}'_s \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^{\pi} d\theta' \int_0^{2\pi} d\varphi' T_{ms}^2(g') p(g'), \quad m = -2, \dots, 2.$$

Выражая обратно усредненные по ориентациям компоненты тензора  $\langle \lambda_{ij}'' \rangle$  в системе  $xuz$  через  $\langle \tilde{\lambda}_m \rangle$ , используя (52) и подставляя в (50), получаем усредненные по ориентациям включений компоненты  $\langle \lambda_{ij} \rangle$  в системе  $xuz$ . Усредненные по ориентациям включений компоненты  $\langle \kappa_{ij} \rangle$  вычисляются аналогичным образом. Данный способ особенно удобен, если плотность распределения ориентаций включений представлена в виде ряда Фурье по обобщенным сферическим функциям [58, 59].

Данный метод использовался для вычисления эффективных характеристик неоднородных сред в зависимости от разброса в ориентациях включений (кристаллитов) в работах [7, 34, 41, 57, 60].

**Методы учета вероятностного распределения форм включений.** Рассмотрим матричный композит с однопипными эллипсоидальными включениями, форма которых является случайной величиной, оставаясь в рамках эллипсоидальной формы. Также для простоты будем считать, что ориентация и форма включений не зависят друг от друга. Обобщенное приближение МГ (12) в данном случае может быть переписано в виде

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = [(1-f)\boldsymbol{\varepsilon}_m \mathbf{I} + f \langle \langle \boldsymbol{\kappa} \rangle \rangle_o] [(1-f)\mathbf{I} + f \langle \langle \boldsymbol{\lambda} \rangle \rangle_o]^{-1},$$

где нижние индексы « $o$ » и « $f$ » означают усреднение по ориентациям и формам включений соответственно.

Будем считать, что средняя форма включений сфероидальная с отношением полуосей  $a : a : c$ . Величина третьей полуоси у всех включений считается фиксированной:  $a_3 = c = \text{fixe}$ , а полуоси  $a_1$  и  $a_2$  случайно отклоняются от среднего значения, равного  $a$ , т. е.  $\langle a_1 \rangle = \langle a_2 \rangle = a$ . В этом случае форма каждого включения задается случайным вектором, компоненты которого – относительные отклонения  $e_1, e_2$  полуосей  $a_1, a_2$  от их средних значений:  $e_j = (a_j - a)/a$ ,  $j = 1, 2$ ;  $\langle e_1 \rangle = \langle e_2 \rangle = 0$ . Дисперсии отклонений  $e_1, e_2$  считаются малыми:  $\langle e_j^2 \rangle \equiv \sigma_j^2 \ll 1$ ,  $j = 1, 2$ , также считается, что  $e_1$  и  $e_2$  независимы. В работе [60] предложен метод усреднения по формам включений, основанный на моделировании неоднородного материала с несколькими видами включений.

Пусть материал содержит  $M$  видов включений, каждый со своими параметрами и распределением ориентаций, тогда тензор  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$  будет вычисляться по формуле, аналогичной (19). В данном методе непрерывное распределение  $e_1, e_2$  аппроксимируется дискретным распределением путем разбиения квадрата  $-1 < e_1, e_2 < 1$  на  $(2n+1)^2$  ячеек и задания каждой ячейке относительной доли включений с отклонениями полуосей, лежащими внутри данной ячейки. При этом, если ячейка  $(k_1, k_2)$  содержит относительную долю  $f_{k_1, k_2}$  включений, принимается, что все они имеют относительные отклонения, равные координатам центра ячейки, т. е.

$$e_1 = 2k_1/(2n+1), \quad e_2 = 2k_2/(2n+1). \quad (54)$$

Сумма относительных долей включений по всем ячейкам равна 1:  $\sum_{k_1=-n}^n \sum_{k_2=-n}^n f_{k_1, k_2} = 1$ .

Применение формулы (15) к данной модели приводит к следующему выражению для  $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \left[ (1-f)\boldsymbol{\varepsilon}_m \mathbf{I} + f \sum_{k_1=-n}^n \sum_{k_2=-n}^n f_{k_1, k_2} \langle \boldsymbol{\kappa}^{k_1, k_2} \rangle_o \right] \left[ (1-f)\mathbf{I} + f \sum_{k_1=-n}^n \sum_{k_2=-n}^n f_{k_1, k_2} \langle \boldsymbol{\lambda}^{k_1, k_2} \rangle_o \right]^{-1}, \quad (55)$$

где  $\boldsymbol{\kappa}^{k_1, k_2}$  и  $\boldsymbol{\lambda}^{k_1, k_2}$  – тензоры включений с относительными отклонениями полуосей (54). Усреднение в (55) проводится по ориентациям включений.

В работе [60] вычислены частотные диэлектрические характеристики пористого кремния слоистой и волокнистой структур с учетом разброса форм включений, моделирующих волокна или слои. Данный метод может быть развит и для учета разброса форм неоднородных включений, при этом, очевидно, потребуется большее количество случайных величин, описывающих форму включения с оболочкой.

**Заключение.** Подходом с наибольшей степенью общности, который может учитывать такие структурные особенности неоднородных сред, как многокомпонентность, несколько уровней вложенности, вероятностные распределения ориентаций и форм включений, является обобщенное приближение эффективного поля для неоднородных сред с включениями в многослойной оболочке. При этом вероятностное распределение ориентаций включений может быть учтено с помощью метода, использующего теорию представлений группы SO(3), а вероятностное распределение форм включений – на основе модели композита с несколькими видами включений.

### Литература

1. **Борен К., Хафмен Д.** Поглощение и рассеяние света малыми частицами / пер. с англ. З. И. Фейзулина и др. М.: Мир, 1986. 660 с.
2. **Сарычев А. К., Шалаев В. М.** Электродинамика метаматериалов. М.: Научный мир, 2011. 221 с.
3. **Астапенко В. А.** Электромагнитные процессы в среде, наноплазманика и метаматериалы. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 584 с.
4. **Займидорога О. А., Самойлов В. Н., Проценко И. Е.** Проблема получения высокого показателя преломления и оптические свойства гетерогенных сред // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2002. Т. 33. № 1. С. 99–157.
5. **Моисеев С. Г., Пашина Е. А., Сухов С. В.** К проблеме прозрачности металлодиэлектрических композитных сред с диссипативными и усиливающими компонентами // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 5. С. 446–452. EDN: TTEUMP.
6. **Agranovich V. M., Shen Y. R., Vaughan R. H., Zakhidov A. A.** Linear and nonlinear wave propagation in negative refraction metamaterials // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 69. Iss. 16. Art. No. 165112. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.165112>
7. **Завгородняя М. И., Лавров И. В.** Моделирование оптического фильтра на основе текстурированного пленочного нанокompозита // Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. 2015. Т. 6. № 1. С. 3–7. EDN: TUFBDV.
8. **Трофимов А. Н.** Высокотехнологичные эпоксидные связующие, полимерные композиты и инновационные технологии получения радиопрозрачных изделий специального назначения из конструкционных стеклопластиков: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2018. 304 с.
9. **Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю.** Математическая модель теплопереноса в сферопластике // Математика и математическое моделирование. 2016. № 4. С. 42–58. <https://doi.org/10.7463/mathm.0416.0846276>
10. **Чухланов В. Ю., Селиванов О. Г.** Исследование диэлектрических свойств синтактических пен на основе кремнийорганического связующего // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 8-1. С. 26–29. EDN: SFWCBV.
11. Сферопластики как термоизолирующие защитные материалы промышленного назначения / **Т. В. Яковенко, Г. К. Яруллина, И. В. Гарустович и др.** // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 8 (177). С. 71–73. EDN: XEBLUF.

12. **Бардушкин В. В., Сорокин А. И., Сычев А. П.** Моделирование эксплуатационных упругих свойств полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 43–47. EDN: VWRWPH.
13. **Milton G. W.** The theory of composites. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. 748 p.
14. **Максвелл Дж. К.** Трактат об электричестве и магнетизме: в 2 т. М.: Наука, 1989. Т. 1. 416 с.
15. **Rayleigh J. W. S.** LVI. On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium // London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1892. Vol. 34. Iss. 211. P. 481–502. <https://doi.org/10.1080/14786449208620364>
16. **Карцев В. П.** Максвелл. 2-е изд., испр. М.: Молодая гвардия, 1976. 333 с.
17. **Garnett J. C. M.** XII. Colours in metal glasses and in metallic films // Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1904. Vol. 203. P. 385–420. <https://doi.org/10.1098/rsta.1904.0024>
18. **Wiener O.** Die Mittelwertsätze für Kraft, Polarisation und Energie // Die Theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Strömung. 1. Abh. Leipzig: Teubner, 1912. S. 509–604.
19. **Фокин А. Г.** Макроскопическая проводимость случайно-неоднородных сред. Методы расчета // УФН. 1996. Т. 166. № 10. С. 1069–1093. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199610d.1069>
20. **Bruggeman D. A. G.** Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen // Ann. Phys. 1935. Bd. 416. S. 636–664. <https://doi.org/10.1002/andp.19354160705>
21. **Keller J. B.** A theorem on the conductivity of a composite medium // J. Math. Phys. 1964. Vol. 5. Iss. 4. P. 548–549. <https://doi.org/10.1063/1.1704146>
22. **Дыхне А. М.** Проводимость двумерной двухфазной системы // ЖЭТФ. 1970. Т. 59. Вып. 7. С. 110–115.
23. **Bergman D. J.** The dielectric constant of a composite material – A problem in classical physics // Phys. Rep. 1978. Vol. 43. Iss. 9. P. 377–407. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(78\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0370-1573(78)90009-1)
24. **Шермергор Т. Д.** Теория упругости микронеднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
25. **Beran M.** Use of the vibrational approach to determine bounds for the effective permittivity in random media // Nuovo Cim. 1965. Vol. 38. Iss. 2. P. 771–782. <https://doi.org/10.1007/BF02748596>
26. **Fokin A. G.** Macroscopical dielectric permittivities of nonhomogeneous media // Phys. Stat. Sol. 1983. Vol. 119. P. 741–754. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221190237>
27. **Hashin Z., Shtrikman S.** A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials // J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33. Iss. 10. P. 3125–3131. <https://doi.org/10.1063/1.1728579>
28. **Ландау Л. Д., Lifshits E. M.** Теоретическая физика: в 10 т. Т. 8: Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1992. 651 с.
29. **Топтыгин И. Н.** Современная электродинамика. Ч. 2: Теория электромагнитных явлений в веществе. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. 848 с.
30. **Stroud D.** Generalized effective-medium approach to the conductivity of an inhomogeneous material // Phys. Rev. B. 1975. Vol. 12. Iss. 8. P. 3368–3373. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.12.3368>
31. **Spanoudaki A., Pelster R.** Effective dielectric properties of composite materials: The dependence on the particle size distribution // Phys. Rev. B. 2001. Vol. 64. Iss. 6. Art. No. 064205. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.064205>
32. **Fricke H.** A mathematical treatment of the electric conductivity and capacity of disperse systems. I. The electric conductivity of a suspension of homogeneous spheroids // Phys. Rev. 1924. Vol. 24. Iss. 5. P. 575–587. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.24.575>
33. **Bragg W. L., Pippard A. B.** The form birefringence of macromolecules // Acta Cryst. 1953. Vol. 6. No. 11–12. P. 865–867. <https://doi.org/10.1107/S0365110X53002519>
34. **Лавров И. В.** Диэлектрическая проницаемость композиционных материалов с текстурой: эллипсоидальные анизотропные кристаллиты // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2009. Т. 6. № 1. С. 52–58. EDN: KASCSL.
35. **Завгородняя М. И., Лавров И. В.** Эффективные диэлектрические характеристики двумерных регулярных матричных структур: сравнение модельных и сеточных расчетов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17. № 3. С. 668–672. EDN: YWNZLA.
36. Обобщенное приближение Максвелла Гарнетта для текстурированных матричных композитов с включениями в оболочке / **В. И. Колесников, И. В. Лавров, В. В. Бардушкин и др.** // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2021. Т. 498. № 1. С. 11–16. <https://doi.org/10.31857/S268674002103010X>
37. **Лавров И. В., Яковлев В. Б.** Анизотропное эллипсоидальное включение с анизотропной оболочкой в изотропной среде с приложенным однородным электрическим полем // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 7. С. 963–972. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.07.44663.1964>



38. **Böttcher C. J. F., Bordewijk P.** Theory of electric polarization. Vol. 2: Dielectrics in time-dependent fields. Amsterdam; Oxford; New York: Elsevier, 1978. 562 p.
39. **Stroud D.** The effective medium approximations: Some recent developments // Superlattices and Microstructures. 1998. Vol. 23. Iss. 3-4. P. 567–573. <https://doi.org/10.1006/spmi.1997.0524>
40. **Фокин А. Г.** Диэлектрическая проницаемость смесей // ЖТФ. 1971. Т. 41. № 6. С. 1073–1079.
41. **Лавров И. В.** Эффективная проводимость поликристаллической среды. Одноосная текстура и двуосные кристаллиты // Изв. вузов. Электроника. 2010. № 3 (83). С. 3–12. EDN: MNGZDF.
42. **Diaz-Guilera A., Tremblay A.-M. S.** Random mixtures with orientational order, and the anisotropic resistivity tensor of high- $T_c$  superconductors // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. Iss. 1. P. 379–383. <https://doi.org/10.1063/1.347725>
43. **Bergman D. J., Stroud D. G.** High-field magnetotransport in composite conductors: Effective-medium approximation // Phys. Rev. B. 2000. Vol. 62. Iss. 10. P. 6603–6613. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.6603>
44. Об объединении методов оценки эффективных диэлектрических характеристик гетерогенных сред на основе обобщенного сингулярного приближения / **В. И. Колесников, В. Б. Яковлев, В. В. Бардушкин и др.** // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452. № 1. С. 27–31. <https://doi.org/10.7868/S0869565213260083>
45. **Фокин А. Г.** О границах для эффективной диэлектрической проницаемости неоднородных материалов // ЖТФ. 1973. Т. 43. № 1. С. 71–77.
46. **Гельфанд И. М., Шилов Г. Е.** Обобщенные функции и действия над ними. М.: Гос. изд-во физ.-матем. лит., 1958. 440 с.
47. **Бардушкин В. В., Лавров И. В., Яковлев В. Б., Яковлева Е. Н.** Моделирование диэлектрических свойств поликристаллов и композитов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2013. № 1 (117). С. 58–65. EDN: PXIFWB.
48. **Колесников В. И., Яковлев В. Б., Бардушкин В. В., Сычев А. П.** О прогнозировании распределений локальных упругих полей в неоднородных средах на основе обобщенного сингулярного приближения // Вестник Южного научного центра РАН. 2015. Т. 11. № 3. С. 11–17. EDN: UHJSZF.
49. Метод оценки распределений локальных температурных полей в многокомпонентных композициях / **В. И. Колесников, И. В. Лавров, В. В. Бардушкин и др.** // Наука юга России. 2017. Т. 13. № 2. С. 13–20. <https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-13-2-13-20>
50. **Березин И. С., Жидков Н. П.** Методы вычислений. 2-е изд., стер. М.: Физматгиз, 1962. Т. 2. 640 с.
51. **Лавров И. В., Бардушкин В. В., Яковлев В. Б.** Обобщенное приближение эффективного поля для неоднородной среды с включениями в многослойной оболочке // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 11. С. 1632–1642. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.11.53435.133-22>
52. **Shivola A., Lindell I. V.** Solution for the effective permittivity of mixtures with multilayer scatterers by transmission line approach // 1988 IEEE AP-S International Symposium, Antennas and Propagation. Syracuse: IEEE, 1988. Vol. 1. P. 388–391. <https://doi.org/10.1109/APS.1988.94086>
53. **Giordano S., Palla P. L.** Dielectric behavior of anisotropic inhomogeneities: Interior and exterior point Eshelby tensors // J. Phys. A: Math. Theor. 2008. Vol. 41. No. 41. Art. No. 415205. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/41/41/415205>
54. **Гельфанд И. М., Минлос Р. А., Шапиро З. Я.** Представления группы вращений и группы Лоренца, их применения. М.: Физматгиз, 1958. 368 с.
55. **Валиев К. А., Эскин Л. Д.** О вращательной диффузии молекул и рассеянии света в жидкостях // Оптика и спектроскопия. 1962. Т. 12. Вып. 6. С. 758–764.
56. **Валиев К. А., Иванов Е. Н.** Вращательное броуновское движение // УФН. 1973. Т. 109. Вып. 1. С. 31–64. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0109.197301b.0031>
57. **Иванов Е. Н., Лавров И. В.** Теория диэлектрической проницаемости композиционных материалов с текстурой. Ч. 1 // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2007. № 1. С. 73–78. EDN: KAMCZZ.
58. **Боровков М. В., Савелова Т. И.** Нормальные распределения на SO(3). М.: МИФИ, 2002. 93 с.
59. **Савёлова Т. И., Иванова Т. М., Сыпченко М. В.** Применение нормальных распределений на группе SO(3) в текстурном анализе. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 104 с.
60. **Завгородняя М. И., Лавров И. В.** Методы учета случайности формы включений при вычислении эффективных диэлектрических характеристик гетерогенных текстурированных материалов // Изв. вузов. Электроника. 2015. Т. 20. № 6. С. 565–575. EDN: VAYMMP.

Обзор поступил в редакцию 20.02.2023 г.; одобрен после рецензирования 29.03.2023 г.;  
принят к публикации 31.05.2023 г.

**Информация об авторе**

**Лавров Игорь Викторович** – кандидат физико-математических наук, доцент Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), iglavr@mail.ru

**References**

1. Bohren C. F., Huffman D. R. *Absorption and scattering of light by small particles*. Weinheim, Wiley-VCH Publ., 1998. 544 p.
2. Sarychev A. K., Shalaev V. M. *Electrodynamics of metamaterials*. New Jersey, London, Singapore, World Scientific Publ., 2007. 260 p.
3. Astapenko V. A. *Electromagnetic processes in medium, nanoplasmonics and metamaterials*. Dolgoprudnyi, Intellect Publ., 2012. 584 p. (In Russian).
4. Zaimidoroga O. A., Samoilov V. N., Protsenko I. E. The problem of realization of high refractive index and optical properties of heterogeneous media. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra = Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei*, 2002, vol. 33, no. 1, pp. 99–157. (In Russian).
5. Moiseev S. G., Pashinina E. A., Sukhov S. V. On the problems of transparency of metal–dielectric composite media with dissipative and amplifying components. *Quantum Electron.*, 2007, vol. 37, no. 5, pp. 446–452. <https://doi.org/10.1070/QE2007v037n05ABEH013294>
6. Agranovich V. M., Shen Y. R., Baughman R. H., Zakhidov A. A. Linear and nonlinear wave propagation in negative refraction metamaterials. *Phys. Rev. B*, 2004, vol. 69, iss. 16, art. no. 165112. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.165112>
7. Zavgorodnyaya M. I., Lavrov I. V. Modelling of optical filter based on textured film nanocomposite. *Nanomaterialy i nanostruktury – XXI vek = Nanomaterials and Nanostructures – XXI Century*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 3–7. (In Russian). EDN: TUFBDB.
8. Trofimov A. N. *High-tech epoxy binders, polymer composites and innovative technologies for the production of special-purpose radio-transparent products from structural fiberglass*, diss. for the Dr. Sci. (Eng.). Moscow, 2018. 304 p. (In Russian).
9. Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N., Savelyeva I. Yu. A mathematical model of heat transfer in spheroplastic. *Matematika i matematicheskoe modelirovanie = Mathematics and Mathematical Modeling*, 2016, no. 4, pp. 42–58. (In Russian). <https://doi.org/10.7463/mathm.0416.0846276>
10. Chukhlanov V. Y., Selivanov O. G. The dielectric properties of syntactic foams based on silicon binder. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2014, no. 8-1, pp. 26–29. (In Russian). EDN: SFWCBB.
11. Yakovenko T. V., Yarullina G. K., Garustovich I. V., Shishilov O. N., Mel'nikov N. O. Spheroplastics as thermal insulating protective materials for industrial applications. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2016, vol. 30, no. 8 (177), pp. 71–73. (In Russian). EDN: XEBLUF.
12. Bardushkin V. V., Sorokin A. I., Sychev A. P. Modeling of performance elastic properties of polymer-based composites with lubricated spherical microcapsules and dispersed inclusions of e-glass. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh*, 2015, no. 10, pp. 43–47. (In Russian). EDN: VWRWPH.
13. Milton G. W. *The theory of composites*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2002. 748 p.
14. Maxwell J. C. *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford, Clarendon Press, 1873. Vol. 1. xx, 431 p.
15. Rayleigh J. W. S. LVI. On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium. *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1892, vol. 34, iss. 211, pp. 481–502. <https://doi.org/10.1080/14786449208620364>
16. Kartsev V. P. *Maxwell*. 2nd ed., rev. Moscow, Molodaya gvardiya Publ., 1976. 333 p. (In Russian).
17. Garnett J. C. M. XII. Colours in metal glasses and in metallic films. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1904, vol. 203, pp. 385–420. <https://doi.org/10.1098/rsta.1904.0024>
18. Wiener O. Die Mittelwertsätze für Kraft, Polarisation und Energie. *Die Theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Strömung*. 1. Abh. Leipzig, Teubner, 1912, S. 509–604.
19. Fokin A. G. Macroscopic conductivity of random inhomogeneous media. Calculation methods. *Phys.-Usp.*, 1996. vol. 39, no. 10, pp. 1009–1032. <https://doi.org/10.1070/PU1996v039n10ABEH000173>

20. Bruggeman D. A. G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Ann. Phys.*, 1935, Bd. 416, S. 636–664. <https://doi.org/10.1002/andp.19354160705>
21. Keller J. B. A theorem on the conductivity of a composite medium. *J. Math. Phys.*, 1964, vol. 5, iss. 4, pp. 548–549. <https://doi.org/10.1063/1.1704146>
22. Dykhne A. M., Shepherd P. J. (transl.). Conductivity of a two-dimensional two-phase system. *Sov. Phys. JETP*, 1971, vol. 32, iss. 1, pp. 63–65.
23. Bergman D. J. The dielectric constant of a composite material – A problem in classical physics. *Phys. Rep.*, 1978, vol. 43, iss. 9, pp. 377–407. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(78\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0370-1573(78)90009-1)
24. Shermergor T. D. *Micromechanics of inhomogeneous medium*. Moscow, Nauka Publ., 1977. 399 p. (In Russian).
25. Beran M. Use of the vibrational approach to determine bounds for the effective permittivity in random media. *Nuovo Cim.*, 1965, vol. 38, iss. 2, pp. 771–782. <https://doi.org/10.1007/BF02748596>
26. Fokin A. G. Macroscopical dielectric permittivities of nonhomogeneous media. *Phys. Stat. Sol.*, 1983, vol. 119, pp. 741–754. <https://doi.org/10.1002/pspb.2221190237>
27. Hashin Z., Shtrikman S. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. *J. Appl. Phys.*, 1962, vol. 33, iss. 10, pp. 3125–3131. <https://doi.org/10.1063/1.1728579>
28. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Theoretical physics*, in 8 vol. Vol. 8: *Electrodynamics of continuous media*. Moscow, Nauka Publ., 1992. 651 p. (In Russian).
29. Toptygin I. N. *Modern electrodynamics. Part 2: Theory of electromagnetic phenomena in materials*. Moscow, Izhevsk, Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika Publ., 2005. 848 p. (In Russian).
30. Stroud D. Generalized effective-medium approach to the conductivity of an inhomogeneous material. *Phys. Rev. B*, 1975, vol. 12, iss. 8, pp. 3368–3373. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.12.3368>
31. Spanoudaki A., Pelster R. Effective dielectric properties of composite materials: The dependence on the particle size distribution. *Phys. Rev. B*, 2001, vol. 64, iss. 6, art. no. 064205. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.064205>
32. Fricke H. A mathematical treatment of the electric conductivity and capacity of disperse systems. I. The electric conductivity of a suspension of homogeneous spheroids. *Phys. Rev.*, 1924, vol. 24, iss. 5, pp. 575–587. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.24.575>
33. Bragg W. L., Pippard A. B. The form birefringence of macromolecules. *Acta Cryst.*, 1953, vol. 6, no. 11–12, pp. 865–867. <https://doi.org/10.1107/S0365110X53002519>
34. Lavrov I. V. Permittivity of composite materials with texture: Ellipsoidal anisotropic inclusions. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2009, vol. 6, no. 1, pp. 52–58. (In Russian).  
EDN: KASCSL.
35. Zavgorodnyaya M. I., Lavrov I. V. Effective dielectric characteristics of two-dimensional regular matrix structures: Comparison of model and finite-difference calculations. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 668–672. (In Russian). EDN: YWNZLA.
36. Kolesnikov V. I., Lavrov I. V., Bardushkin V. V., Sychev A. P., Yakovlev V. B. The generalized Maxwell Garnett approximation for textured matrix composites with coated inclusions. *Dokl. Phys.*, 2021, vol. 66, iss. 5, pp. 123–128. <https://doi.org/10.1134/S1028335821050049>
37. Lavrov I. V., Yakovlev V. B. Anisotropic ellipsoidal inclusion with an anisotropic shell in an isotropic medium subjected to a uniform electric field. *Tech. Phys.*, 2017, vol. 62, iss. 7, pp. 979–988. <https://doi.org/10.1134/S106378421707009X>
38. Böttcher C. J. F., Bordewijk P. *Theory of electric polarization. Vol. 2: Dielectrics in time-dependent fields*. Amsterdam, Oxford, New York, Elsevier, 1978. 562 p.
39. Stroud D. The effective medium approximations: Some recent developments. *Superlattices and Microstructures*, 1998, vol. 23, iss. 3-4, pp. 567–573. <https://doi.org/10.1006/spmi.1997.0524>
40. Fokin A. G. Permittivity of mixtures. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1971, vol. 16, pp. 849–855.
41. Lavrov I. V. Effective conductivity of a polycrystalline medium. Uniaxial texture and biaxial crystals. *Semiconductors*, 2011, vol. 45, iss. 13, pp. 1621–1627. <https://doi.org/10.1134/S106378261113015X>
42. Diaz-Guilera A., Tremblay A.-M. S. Random mixtures with orientational order, and the anisotropic resistivity tensor of high- $T_c$  superconductors. *J. Appl. Phys.*, 1991, vol. 69, iss. 1, pp. 379–383. <https://doi.org/10.1063/1.347725>
43. Bergman D. J., Stroud D. G. High-field magnetotransport in composite conductors: Effective-medium approximation. *Phys. Rev. B*, 2000, vol. 62, iss. 10, pp. 6603–6613. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.62.6603>

44. Kolesnikov V. I., Yakovlev V. B., Bardushkin V. V., Lavrov I. V., Sychev A. P., Yakovleva E. N. Association of evaluation methods of the effective permittivity of heterogeneous media on the basis of a generalized singular approximation. *Dokl. Phys.*, 2013, vol. 58, iss. 9, pp. 379–383. <https://doi.org/10.1134/S1028335813090012>
45. Fokin A. G. On bounds for the effective permittivity of inhomogeneous materials. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1973, vol. 18, p. 44.
46. Gel'fand I. M., Shilov G. E. *Generalized functions and operations on them*. Moscow, Gos. izd-vo fiz.-matem. lit. Publ., 1958. 440 p. (In Russian).
47. Bardushkin V. V., Lavrov I. V., Yakovlev V. B., Yakovleva E. N. Simulation of dielectric properties of polycrystals and composites. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*, 2013, no. 1 (117), pp. 58–65. (In Russian). EDN: PXIFWB.
48. Kolesnikov V. I., Yakovlev V. B., Bardushkin V. V., Sychev A. P. On the prediction of local elastic fields' distributions in non-uniform media on the basis of a generalized singular approximation. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 11–17. (In Russian). EDN: UHJSZF.
49. Kolesnikov V. I., Lavrov I. V., Bardushkin V. V., Sychev A. P., Yakovlev V. B. A method of the estimation of the local thermal fields distribution in multicomponent composites. *Nauka yuga Rossii = Science in the South of Russia*, 2017, vol. 13, no. 2, pp. 13–20. (In Russian). <https://doi.org/10.23885/2500-0640-2017-13-2-13-20>
50. Berezin I. S., Zhidkov N. P. *Calculation methods*. 2nd ed., stereotype. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. Vol. 2. 640 p. (In Russian).
51. Lavrov I. V., Bardushkin V. V., Yakovlev V. B. Generalized effective-field approximation for inhomogeneous medium with inclusions in multilayered shell. *Tech. Phys.*, 2022, vol. 67, iss. 11, pp. 1405–1415. <http://dx.doi.org/10.21883/TP.2022.11.55169.133-22>
52. Shivola A., Lindell I. V. Solution for the effective permittivity of mixtures with multilayer scatterers by transmission line approach. *1988 IEEE AP-S International Symposium, Antennas and Propagation*. Syracuse, IEEE, 1988, vol. 1, pp. 388–391. <https://doi.org/10.1109/APS.1988.94086>
53. Giordano S., Palla P. L. Dielectric behavior of anisotropic inhomogeneities: interior and exterior point Eshelby tensors. *J. Phys. A: Math. Theor.*, 2008, vol. 41, no. 41, art. no. 415205. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/41/41/415205>
54. Gel'fand I. M., Minlos R. A., Shapiro Z. Ya. *Representations of the rotations' group and Lorenz group, their applications*. Moscow, Fizmatgiz, 1958. 368 p. (In Russian).
55. Valiev K. A., Eskin L. D. On a rotational diffusion of molecules and scattering of light in liquids. *Optika i spektroskopiya = Optics and Spectroscopy*, 1962, vol. 12, iss. 6, pp. 758–764. (In Russian).
56. Valiev K. A., Ivanov E. N. Rotational Brownian motion. *Sov. Phys. Usp.*, 1973, vol. 16, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1070/PU1973v016n01ABEH005145>
57. Ivanov E. N., Lavrov I. V. Theory of permittivity of composites with texture. Part 1. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii = Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*, 2007, no. 1, pp. 73–78. (In Russian). EDN: KAMCZZ.
58. Borovkov M. V., Savelova T. I. *Normal distributions on SO(3)*. Moscow, MEPhI, 2002. 93 p. (In Russian).
59. Savyolova T. I., Ivanova T. M., Sypchenko M. V. *Applications of the normal distributions on SO(3) group in the texture analysis*. Moscow, NRNU MEPhI, 2010. 104 p. (In Russian).
60. Zavgorodnyaya M. I., Lavrov I. V. Methods of accounting for inclusion-shape randomness in calculating the effective dielectric characteristics of heterogeneous textured materials. *Semiconductors*, 2016, vol. 50, iss. 13, pp. 1708–1715. <https://doi.org/10.1134/S1063782616130121>

The review was submitted 20.02.2023; approved after reviewing 29.03.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

#### **Information about the author**

**Igor V. Lavrov** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Institute of Physics and Applied Mathematics, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [iglavr@mail.ru](mailto:iglavr@mail.ru)

# ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ INTEGRATED ELECTRONICS ELEMENTS

Научная статья  
УДК 621.38: 538.935  
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-4-431-440  
EDN: PXYHBP

## Оптимизация параметров преобразователя излучения на основе кремниевого $p-i-n$ -диода

*М. А. Сауров*

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

*michael15-52@mail.ru*

**Аннотация.** Для проектирования фотодетекторов с высокой эффективностью преобразования энергии излучения следует иметь четкое представление о связи конструктивных особенностей фотодиода с природой и параметрами излучения, которое необходимо преобразовать. В работе представлены функциональные зависимости, позволяющие оптимизировать параметры конструкции  $p-i-n$ -диода, связав коэффициент преобразования регистрируемых потоков излучений в фототок с параметрами конструкций фотоприемника и с характеристиками источника излучений. В приближении преобладания ионизационных потерь в приемной области детектора энергии бета-электронами получены выражения для расчета оптимальных толщин приемных слоев преобразователей. На примере конкретных источников бета-излучений определены коэффициенты полезного действия детекторов для применений в бета-вольтаических источниках питания и построены зависимости коэффициента полезного действия от энергии бета-электронов и ширины приемной области  $p-i-n$ -диода. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании преобразователей излучений, а также для оценки эффективности преобразователей входных каскадов реальных метрологических устройств.

**Ключевые слова:** преобразователь излучения,  $p-i-n$ -диод, оптимизация конструкции  $p-i-n$ -диода, бета-вольтаические источники питания

**Финансирование работы:** работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FNRМ-2022-0008).

**Для цитирования:** Сауров М. А. Оптимизация параметров преобразователя излучения на основе кремниевого  $p-i-n$ -диода // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 431–440. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-431-440>. – EDN: PXYHBP.

## Optimization of energy converter parameters based on silicon $p-i-n$ diode

*M. A. Saurov*

*SMC “Technological Centre”, Moscow, Russia*

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

*michael15-52@mail.ru*

**Abstract.** To design photodetectors with a high efficiency of radiation energy conversion, it is necessary to have a clear understanding of the relationship between the design features of a photodiode and the nature and parameters of the radiation to be converted. In this work, functional dependencies are presented that allow optimizing the design parameters of a  $p-i-n$  diode by relating the conversion coefficient of the registered radiation fluxes into photocurrent with the parameters of the photodetector designs and with the characteristics of the radiation source. In the approximation of the dominance of ionization losses in the receiving region of the energy detector by beta electrons (Bethe, non-relativistic case), expressions have been obtained for calculating the optimal thicknesses of the intrinsic layers of the radiation energy converters. On the example of specific sources of beta radiation, the efficiency of detectors for applications in betavoltaic power supplies was determined, and the dependences of the efficiency on the energy of beta electrons and the width of the  $p-i-n$  diode receiving region were plotted. The results obtained can be useful for radiation energy converters designing and for input cascade converter performance evaluation in real metrological devices.

**Keywords:** energy conversion,  $p-i-n$  photodiode,  $p-i-n$  diode design optimization, betavoltaic power supplies

**Funding:** the work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FNRМ-2022-0008).

**For citation:** Saurov M. A. Optimization of energy converter parameters based on silicon  $p-i-n$  diode. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 431–440. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-431-440>. – EDN: PXYHBP.

**Введение.** Фотодетекторы на основе  $p-i-n$ -диодов используются в качестве детекторов ионизирующего излучения, в приемо-передающих узлах волоконно-оптических линий, а также для обнаружения и преобразования оптических сигналов. Работа  $p-i-n$ -диода основана на интеграции ряда физических эффектов, связанных как с взаимодействием первичного излучения (квантов оптического диапазона, тяжелых и легких частиц высоких энергий) с веществом приемной области детектора, так и с процессами считывания продукта этого взаимодействия (неравновесных носителей заряда), во внешнюю цепь. Механизмы этих взаимодействий могут быть различными, например: внутренний фотоэффект, потери энергии частицей по ионизационному механизму, тормозные потери и др. Понимание механизма первичного преобразования излучения является необходимым для создания корректной модели функциональной связи конструктивных параметров  $p-i-n$ -диодов с их рабочими характеристиками.

В результате исследований  $p-i-n$ -диодов разными научными группами [1–7] установлены основные функциональные связи между их конструкционными характеристиками и рядом электрофизических параметров (спектральная фоточувствительность, пороговая чувствительность). В работах [4, 7] смоделирована зависимость максимума спектральной чувствительности от конструктивных особенностей фотодиода, но не получена математическая зависимость эффективности преобразования излучения в электрическую энергию.

При проектировании оптимизированных по коэффициенту преобразования  $p-i-n$ -детекторов для конкретных технических систем необходимо иметь детализированные представления о связи конструктивных особенностей  $p-i-n$ -диода и природы регистрируемого излучения. Цель настоящей работы – получение явной функциональной зависимости коэффициента преобразования энергии первичного источника излучения в ток неравновесных носителей и численных значений коэффициента эффективности преобразования для конкретных типов первичных источников излучения.

**КПД  $p-i-n$ -фотодиода под действием излучения.** Согласно работе [2] частицы высоких энергий вызывают образование электронно-дырочных пар в  $i$ -области. Это приводит к появлению градиента концентрации носителей заряда, а следовательно, и диффузионного тока по направлению к поверхности полупроводника. В процессе диффузии носители заряда рекомбинируют в толще полупроводника.

Для расчета КПД  $p-i-n$ -фотодиода под действием излучения необходимо найти напряжение холостого хода. Определим граничные условия. Во-первых, ввиду отсутствия проникновения неосновных носителей заряда в сильнолегированные  $p$ - и  $n$ -области можно пренебречь рекомбинацией неосновных носителей заряда. Во-вторых, в  $i$ -области выполняются условия  $n \gg n_i$ ,  $p \gg n_i$ . Корректным представляется допущение пренебрежимо малого падения напряжения на контактных  $p$ - и  $n$ -областях  $p-i-n$ -диода и реализации в  $i$ -области условия  $n(x) \approx p(x)$ .

Для расчета ВАХ  $p-i-n$ -диода при регистрации излучений используем уравнения для полных плотностей токов электронов и дырок [8]:

$$J_p = e\mu_p pF - eD_p \frac{dp}{dx}, \quad J_n = e\mu_n pF - eD_n \frac{dp}{dx}, \quad (1)$$

где  $J_p$  – плотность тока дырок;  $\mu_p$  – подвижность дырок;  $F$  – фактор заполнения;  $D_p$  – коэффициент диффузии дырок в кремнии;  $J_n$  – плотность тока электронов;  $\mu_n$  – подвижность электронов;  $D_n$  – коэффициент диффузии электронов в кремнии.

После подстановки уравнений (1) в уравнения непрерывности для стационарного случая

$$-\frac{1}{e} \frac{dJ_p}{dx} - \frac{(p-n_i)}{\tau} + G(x) = 0, \quad \frac{1}{e} \frac{dJ_n}{dx} - \frac{(p-n_i)}{\tau} + G(x) = 0$$

получим уравнение амбиполярной диффузии:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{p-n_i}{L_a^2} + D_a^{-1} G(x) = 0.$$

Здесь  $n_i$  – концентрация собственных носителей заряда;  $\tau$  – амбиполярное время жизни;  $L_a$  – амбиполярная диффузионная длина;  $D_a$  – коэффициент амбиполярной диффузии.

Коэффициенты амбиполярной диффузии и амбиполярной диффузионной длины имеют вид

$$D_a = \frac{D_p \mu_n + D_n \mu_p}{\mu_p + \mu_n}, \quad L_a = \sqrt{D_a \tau}.$$

Для граничных условий корректны следующие представления:

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{J}{2eD_p}, \quad \left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=W} = -\frac{J}{2eD_n}, \quad (2)$$

где  $W$  – ширина  $i$ -области.

Функцию генерации зададим выражением

$$G(x) = A(-dE/dx)_{Ni} = G_0 \exp(-kx),$$

где  $k^{-1}$  – глубина проникновения падающего излучения.

Решение уравнения амбиполярной диффузии для нахождения концентрации дырок для заданных граничных условий (2) имеет вид [1]

$$p(x) = n_i + \frac{JL_a}{2e \sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ D_n^{-1} \cosh\left(\frac{x}{L_a}\right) + D_p^{-1} \cosh\left(\frac{W-x}{L_a}\right) \right] + \\ + \frac{L_a}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ \beta \cosh\left(\frac{x}{L_a}\right) - \alpha \cosh\left(\frac{W-x}{L_a}\right) \right] + \frac{L_a^2 A}{D_a (1 - L_a^2 k^2)} \exp(-kx),$$

где коэффициент  $\alpha$  равен:

$$\alpha = \frac{kL_a^2 A}{D_a (1 - L_a^2 k^2)}.$$

Здесь  $A$  – интенсивность источника излучения.

Выражения для концентраций на границах  $i$ -области имеют следующий вид:

$$p(0) = n_i + \frac{JL_a}{2e \sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ D_n^{-1} + D_p^{-1} \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right] + \\ + \frac{\alpha L_a}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ \exp(-kW) - \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right] + \frac{L_a^2 A}{D_a (1 - L_a^2 k^2)}, \quad (3)$$



$$p(W) = n_i + \frac{JL_a}{2e \sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ D_n^{-1} \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) + D_p^{-1} \right] +$$

$$+ \frac{\alpha L_a}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ \exp(-kW) \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) - 1 \right] + \frac{L_a^2 A}{D_a (1 - L_a^2 k^2)} \exp(-kW). \quad (4)$$

Преобразуем выражения (3), (4):

$$p(0) = J\gamma_0 + N_0, \quad p(W) = J\gamma_w + N_w, \quad (5)$$

где коэффициенты  $\gamma_0, \gamma_w, N_0, N_w$  равны:

$$\gamma_0 = \frac{L_a}{2e \sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ D_n^{-1} + D_p^{-1} \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right],$$

$$\gamma_w = \frac{L_a}{2e \sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ D_n^{-1} \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) + D_p^{-1} \right],$$

$$N_0 = n_i + \alpha \left[ \frac{L_a \left[ \exp(-kW) - \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right]}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} + k^{-1} \right],$$

$$N_w = n_i + \alpha \exp(-kW) \left[ \frac{L_a \left[ \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) - \exp(kW) \right]}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} + k^{-1} \right].$$

Используем для нахождения связи тока с напряжением выражение из работы [8] и соотношения (5):

$$p(0)p(W) = n_i^2 \exp\left(\frac{e(U - U_i)}{kT}\right) = J^2 \gamma_0 \gamma_w + J(\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0) + N_0 N_w. \quad (6)$$

Последнее равенство в (6) эквивалентно квадратному уравнению относительно плотности тока:

$$J^2 \gamma_0 \gamma_w + J(\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0) + N_0 N_w - n_i^2 \exp\left(\frac{e(U - U_i)}{kT}\right) = 0,$$

решение которого приводит к получению выражения для ВАХ  $p-i-n$ -диода:

$$J = \frac{-(\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0) + \sqrt{(\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0)^2 - 4\gamma_0 \gamma_w [N_0 N_w - n_i^2 \exp(e(U - U_i)kT)]}}{2\gamma_0 \gamma_w},$$

где  $U_i = \frac{D_n - D_p}{\mu_n + \mu_p} \ln \frac{N_0}{N_w}$ .

Ток короткого замыкания равен:

$$J_{sc} = \frac{-(\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0) + \sqrt{(\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0)^2 - 4\gamma_0 \gamma_w [N_0 N_w - n_i^2 \exp(-e U_i kT)]}}{2\gamma_0 \gamma_w}. \quad (7)$$

**Вывод зависимости КПД фотодетектора.** Для невысоких напряжений формула (7) может быть преобразована в выражение

$$J = \frac{n_i^2}{\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0} \left[ \exp\left(\frac{e(U - U_i)}{kT}\right) - 1 \right] + \frac{n_i^2 - N_0 N_w}{\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0},$$

которое можно представить в форме уравнения Шокли:

$$J = J_0 \left[ \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] + J_{sc},$$

где

$$J_0 = \frac{n_i^2}{\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0}, \quad J_{sc} = \frac{n_i^2 - N_0 N_w}{\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0}.$$

Подставим коэффициенты  $N_0$ ,  $N_w$  из формулы (5) в следующее выражение:

$$N_0 N_w = n_i^2 + \alpha n_i \left[ k^{-1} (1 + e^{-kW}) - \frac{L_a \left[ 1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right]}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} (1 - e^{-kW}) \right] +$$

$$+ \alpha^2 \left[ \frac{L_a \left[ e^{-kW} - \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right]}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} + k^{-1} \right] \left[ \frac{L_a \left[ \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) e^{-kW} - 1 \right]}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} + k^{-1} e^{-kW} \right].$$

Для небольших напряжений коэффициент  $\alpha$  достаточно мал, поэтому слагаемым с  $\alpha^2$  можно пренебречь. Тогда

$$n_i^2 - N_0 N_w \approx \alpha n_i \left[ \frac{L_a \left[ 1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right]}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} (1 - e^{-kW}) - k^{-1} (1 + e^{-kW}) \right].$$

Кроме того, в силу малости  $\alpha$ , имеем  $N_0 \approx N_w \approx n_i$ . Следовательно, корректным будет следующее преобразование:

$$\gamma_0 N_w + \gamma_w N_0 \approx n_i (\gamma_0 + \gamma_w) = \frac{n_i L_a (D_n + D_p)}{2eD_n D_p} \frac{1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)}.$$

Выражение для тока короткого замыкания будет иметь вид

$$J_{sc} \approx \alpha \frac{2eD_n D_p}{L_a (D_n + D_p)} \frac{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)}{1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ \frac{L_a \left[ 1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right]}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} (1 - e^{-kW}) - k^{-1} (1 + e^{-kW}) \right].$$

Выражение для напряжения холостого хода следующее:

$$V_{oc} = U_i + \frac{k_B T}{e} \ln \left\{ 1 + \frac{\alpha}{n_i} (1 - e^{-kW}) \left[ k^{-1} \coth\left(\frac{kW}{2}\right) - \frac{L_a \left[ 1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right]}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \right] \right\},$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $k^{-1}$  – глубина проникновения падающего излучения. КПД фотодетектора равно:

$$\eta = \frac{J_{sc} V_{oc}}{A \epsilon_{av}} F. \quad (8)$$

Темновой обратный ток рассчитывается по формуле

$$J_0 = \frac{2eD_n D_p n_i}{L_a (D_n + D_p)} \frac{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)}{1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right)}.$$

Ток короткого замыкания равен:

$$J_{sc} = \alpha \left[ \frac{2eD_n D_p}{D_n + D_p} (1 - e^{-kW}) - \frac{J_0}{kn_i} (1 + e^{-kW}) \right].$$

В приближении малых интенсивностей при  $U_i \approx 0$  напряжение холостого хода имеет вид

$$V_{oc} \approx \frac{\alpha k_B T}{en_i} (1 - e^{-kW}) \left[ k^{-1} \coth\left(\frac{kW}{2}\right) - \frac{L_a \left[ 1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right) \right]}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \right].$$

В результате из формулы (8) для КПД получаем выражение

$$\eta = \alpha^2 \frac{(2eD_n)k_B TF}{A\varepsilon_{av} n_i L_a (D_n + D_p)} (1 - e^{-kW})^2 \frac{1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ L_a - k^{-1} \frac{\coth\left(\frac{kW}{2}\right) \sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)}{1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \right]^2,$$

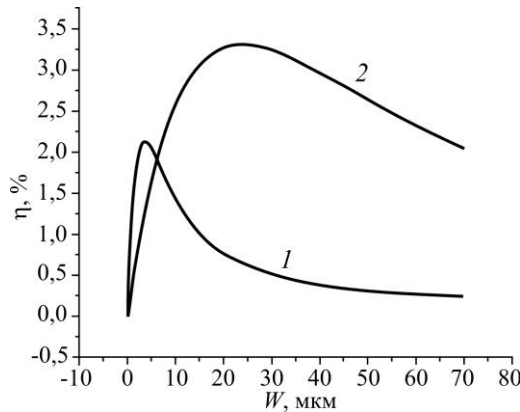
или

$$\eta = \alpha^2 \frac{2eD_n D_p k_B T}{A\varepsilon_{av} n_i (D_n + D_p)} \Omega(W, k, L_a), \quad (9)$$

где

$$\Omega(W, k, L_a) = L_a^{-1} (1 - e^{-kW})^2 \frac{1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \left[ L_a - k^{-1} \frac{\coth\left(\frac{kW}{2}\right) \sinh\left(\frac{W}{L_a}\right)}{1 + \cosh\left(\frac{W}{L_a}\right)} \right]^2. \quad (10)$$

На рисунке представлена зависимость КПД фотодиода (9) от ширины  $i$ -области для никеля-63 и прометия-137.



Зависимость КПД фотодиода от ширины  $i$ -области для никеля-63 (кривая 1) и прометия-137 (кривая 2)  
The dependence of the photodiode efficiency on various  $i$ -region widths for nickel-63 (curve 1) and promethium-137 (curve 2)

Выражение (10) представляет собой функцию ширины  $i$ -области, параметры которой – это глубина проникновения излучения  $k^{-1}$  и диффузионная длина носителей  $L_a$ .

Приведем основные технологические параметры моделируемых  $p$ - $i$ - $n$ -диодов, использованные для расчетов:

Коэффициент диффузии электронов в кремнии $D_n$ .....	37,8 см <sup>2</sup> /с
Коэффициент диффузии дырок в кремнии $D_p$ .....	12,6 см <sup>2</sup> /с
Коэффициент амбиполярной диффузии $D$ .....	19,4 см <sup>2</sup> /с
Амбиполярная диффузионная длина $L_a$ .....	66 мкм
Энергия генерации электронно-дырочной пары $E_{ion}$ .....	3,66 эВ
Температура $T$ .....	300 К
Концентрация собственных носителей $n_i$ .....	$1,02 \cdot 10^{10}$ см <sup>-3</sup>

Параметры источников излучения для функции генерации приведены в таблице.

**Параметры функции генерации**  
**Parameters of the generation function**

Параметр	Никель-63	Прометий-137
Поверхностная активность $A$	3,0 мКи/см <sup>2</sup>	3,0 мКи/см <sup>2</sup>
Средняя энергия частиц $E_{av}$	17 600 эВ	62 000 эВ
Предэкспоненциальный множитель в $G(x)$ $\alpha_1$	38 МэВ/см	34,5 МэВ/см
Обратное значение глубины потерь $k^{-1}$	3420 см <sup>-1</sup>	510 см <sup>-1</sup>

Результаты расчета показали, что КПД бета-вольтаической ячейки на основе кремниевое  $p-i-n$ -диода существенно зависит от ширины  $i$ -области диода и имеет ярко выраженный максимум. Следовательно, для достижения наибольшего КПД необходимо подбирать параметры фотодиода под конкретный тип источника излучения.

**Заключение.** Полученные выражения для расчета оптимальных толщин приемных слоев преобразователей позволяют рассчитать КПД  $p-i-n$ -детектора как функцию его конструктивных параметров и вещества приемной области в привязке к характеристикам регистрируемых излучений (тип, мощность). Это дает возможность оптимизировать толщину слоя приемной области ( $i$ -слоя) в зависимости от характеристик регистрируемого излучения.

Полученные функциональные зависимости включают в себя базовые концентрационные параметры детектора и основные характеристики регистрируемых излучений, что делает их полезными при проектировании преобразователей излучений и для оценки эффективности преобразователей входных каскадов реальных метрологических устройств.

### Литература

1. Физика полупроводниковых преобразователей / *А. Н. Сауров, С. В. Булярский, Н. С. Грушко и др.* М.: РАН, 2018. 276 с.
2. Оптимизация параметров источников питания, возбуждаемых  $\beta$ -излучением / *С. В. Булярский, А. В. Лакалин, И. Е. Абанин и др.* // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 1. С. 68–74. EDN: YJYJNZ.
3. *Bulyarskiy S. V., Abanin I. E., Lakalin A. V.* Efficiency beta batteries with direct energy conversion // Characterization and Application of Nanomaterials. 2018. Vol. 1. Iss. 2. Art. ID: 529. <https://doi.org/10.24294/can.v1i2.529>
4. *Cappelletti M. A., Cédola A. P., Peltzer y Blancá E. L.* Simulation of silicon PIN photodiodes for use in space-radiation environments // Semicond. Sci. Technol. 2008. Vol. 23. No. 2. Art. No. 025007. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/23/2/025007>
5. Optimization of energy conversion efficiency betavoltaic element based on silicon / *A. A. Krasnov, S. A. Legotin, Yu. K. Omel'chenko et al.* // Journal of Nano- and Electronic Physics. 2015. Vol. 7. No. 4. Art. No. 04004.
6. Fabrication of SiC p-i-n betavoltaic cell with <sup>63</sup>Ni irradiation source / *H. Guo, Y. Shi, Y. Zhang et al.* // 2011 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits. Tianjin: IEEE, 2011. P. 1–2. <https://doi.org/10.1109/EDSSC.2011.6117636>
7. Direct conversion of high energy protons to electricity using a solid-state pin junction diode / *D. R. Boris, M. Zhenqiang, Y. Hao-Chih et al.* // Fusion Science and Technology. 2007. Vol. 52. Iss. 4. P. 1066–1069. <https://doi.org/10.13182/FST07-A1637>
8. *Гаман В. И.* Физика полупроводниковых приборов. 2-е изд., доп. и перераб. Томск: Изд-во науч.-техн. лит., 2000. 425 с.

Статья поступила в редакцию 03.02.2023 г.; одобрена после рецензирования 13.02.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

**Информация об авторе**

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

**References**

1. Saurov A. N., Bulyarskiy S. V., Grushko N. S. et al. *Physics of semiconductor converters*. Moscow, RAS, 2018. 276 p. (In Russian).
2. Bulyarskiy S. V., Lakalin A. V., Abanin I. E., Amelichev V. V., Svetuhin V. V. Optimization of the parameters of power sources excited by  $\beta$ -radiation. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, iss. 1, pp. 66–72. <https://doi.org/10.1134/S1063782617010055>
3. Bulyarskiy S. V., Abanin I. E., Lakalin A. V. Efficiency beta batteries with direct energy conversion. *Characterization and Application of Nanomaterials*, 2018, vol. 1, iss. 2, art. ID: 529. <https://doi.org/10.24294/can.v1i2.529>
4. Cappelletti M. A., Cédola A. P., Peltzer y Blancá E. L. Simulation of silicon PIN photodiodes for use in space-radiation environments. *Semicond. Sci. Technol.*, 2008, vol. 23, no. 2, art. no. 025007. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/23/2/025007>
5. Krasnov A. A., Legotin S. A., Omel'chenko Yu. K., Didenko S. I., Murashev V. N., Rabinovich O. I., Yurchuk S. Yu., Yaromsky V. P., Popkova A. V. Optimization of energy conversion efficiency betavoltaic element based on silicon. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2015, vol. 7, no. 4, art. no. 04004.
6. Guo H., Shi Y., Zhang Yum., Zhang Yuj., Han J. Fabrication of SiC p-i-n betavoltaic cell with  $^{63}\text{Ni}$  irradiation source. *2011 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits*. Tianjin, IEEE, 2011, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/EDSSC.2011.6117636>
7. Boris D. R., Zhenqiang M., Hao-Chih Y., Ashley R. P., Santarius J. F., Kulcinski G. L., Dickerson C., Allen T. Direct conversion of high energy protons to electricity using a solid-state pin junction diode. *Fusion Science and Technology*, 2007, vol. 52, iss. 4, pp. 1066–1069. <https://doi.org/10.13182/FST07-A1637>
8. Gaman V. I. *Physics of semiconductor devices*. 2nd ed., upd. and rev. Tomsk, Izd-vo nauch.-tekhn. lit., 2000. 425 p. (In Russian).

The article was submitted 03.02.2023; approved after reviewing 13.02.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

**Information about the author**

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

**Уважаемые авторы!**

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

# СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

Научная статья  
УДК 004.052  
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-4-441-451  
EDN: NULBAQ

## Программно-аппаратный комплекс для ускорения функциональной верификации систем на кристалле

*А. П. Солодовников, А. Л. Переверзев, А. М. Силантьев*

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

*pal@olvs.miee.ru*

**Аннотация.** Для решения задачи ускорения процесса верификации цифровых устройств ведущие разработчики САПР создают специализированные программно-аппаратные комплексы – эмуляторы, позволяющие воспроизводить функционал RTL-описания аппаратуры со скоростью симуляции единицы мегагерц. Такая скорость обеспечивает на несколько порядков меньшее время выполнения тестов по сравнению с логической симуляцией. Однако в связи с высокой стоимостью эмуляторы могут использовать только крупные компании. В работе предложена структура и прототип технической реализации программно-аппаратного комплекса для ускорения функциональной верификации сложнофункциональных блоков и систем на кристалле на основе доступных для разработчиков средств проектирования, что позволит снизить стоимость решений для ускорения верификации и упростить их применение. Ускорение достигнуто за счет переноса вычислений результатов воздействий тестируемого устройства из симулятора в эмулируемое в ПЛИС устройство и взаимодействия симулятора и тестируемого устройства посредством программного интерфейса. С использованием предложенной структуры программно-аппаратного комплекса реализован прототип, оценка производительности которого показала восьмикратное сокращение времени моделирования. Полученный результат свидетельствует о перспективности продолжения исследований в данном направлении.

**Ключевые слова:** верификация, эмуляция, система на кристалле, ПЛИС, SystemVerilog, интерфейс DPI

**Для цитирования:** Солодовников А. П., Переверзев А. Л., Силантьев А. М. Программно-аппаратный комплекс для ускорения функциональной верификации систем на кристалле // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 441–451. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-441-451>. – EDN: NULBAQ.

Original article

## **Software-hardware complex for system on chip design verification acceleration**

*A. P. Solodovnikov, A. L. Pereverzev, A. M. Silantyev*

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

*pal@olvs.miee.ru*

**Abstract.** Speeding up the process of verification of digital devices is a relevant task, which is being tackled by leading CAD developers who create specialized software-hardware complexes – emulators that can reproduce the functionality of RTL hardware descriptions at simulation speeds in the megahertz range. Such speed provides several orders of magnitude faster test execution times compared to logical simulation. However, due to high cost of emulators they can only be used by large companies. In this work, a structure and a prototype of a software-hardware complex have been proposed for accelerating functional verification of complex functional IP blocks and systems on chip based on available design tools, which will reduce the cost of verification acceleration solutions and simplify their use. The acceleration is achieved by transferring the calculations of the results of the device under test's actions from the simulator to the emulated device in the FPGA and by interacting between the simulator and the device under test through a software interface. A prototype has been implemented based on the proposed structure, and its performance evaluation has shown an eight-fold reduction in simulation time. The obtained result indicates the prospects of further research in this line of study.

**Keywords:** verification, emulation, system on chip, SoC, FPGA, SystemVerilog, DPI

**For citation:** Solodovnikov A. P., Pereverzev A. L., Silantyev A. M. Software-hardware complex for system on chip design verification acceleration. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 441–451. [https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2023-28-4-441-451](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-441-451). – EDN: NULBAQ.

**Введение.** Увеличение степени интеграции систем на кристалле и усложнение сложнофункциональных блоков обеспечили значительный рост производительности и расширение функциональных возможностей конечных систем. В то же время это привело к трудностям при их проектировании и при этом затраты на верификацию являются основной частью от общих затрат на разработку систем на кристалле. Согласно результатам исследований компании Mentor Graphics [1], верификация занимает до 53 % времени проектирования.

На протяжении многих лет сложность создаваемых устройств растет по крайней мере на 58 % в год. Однако совершенствование средств верификации позволяет верифицировать с прежней скоростью проекты, усложнившиеся на 21 % в год [2]. Таким образом, имеется значительный разрыв между ростом сложности устройств и возможностями инструментов верификации.

В настоящей работе проводится сравнение способов функциональной верификации, описывается предложенная структура программно-аппаратного комплекса для ускорения верификации, дается оценка обеспечиваемой им производительности и его



применимости в зависимости от сложности тестируемого устройства. Для сравнения эффективности разных способов функциональной верификации используется величина  $F_m$ , равная отношению общего числа промоделированных синхроимпульсов к реальному времени, затраченному на моделирование.

**Способы функциональной верификации. Симуляция.** Логическая симуляция – процесс программного моделирования разрабатываемого устройства, который может вестись на поведенческом уровне, уровнях межрегистровых передач и логических вентилей. Выделяют симуляцию, основанную на событиях (event based simulation), и потактовую симуляцию (cycle accurate simulation). Потактовая симуляция позволяет моделировать поведение устройства с точностью до тактового синхроимпульса и не может предоставить информацию о переходных процессах между ними. Симуляция, основанная на событиях, может предоставить более детальную информацию о поведении моделируемого устройства с точки зрения временных задержек. Тем не менее симуляция, основанная на событиях, не может заменить статический временной анализ.

Современные симуляторы используют механизм, основанный на событиях, работают с программной моделью верифицируемого устройства, построенной по его HDL-описанию, и выполняют следующие задачи:

- построение программной модели моделируемого устройства;
- генерация тестовых воздействий посредством верификационного окружения;
- отображение внутренних и внешних сигналов моделируемого устройства на временной диаграмме;
- сравнение сигналов моделируемого устройства с результатами эталонной модели (golden reference model).

К преимуществам данного способа верификации можно отнести относительно низкую стоимость ( $10^3$ – $10^4$  долл., здесь и далее приведен приблизительный порядок цен) программных средств и простоту создания верификационной инфраструктуры, которая в минимальной конфигурации состоит из рабочей станции, оснащенной симулятором. Современными симуляторами, используемыми в индустрии, являются Cadence Xcelium, Synopsys VCS, Siemens Questa. Отметим, что существуют бесплатные симуляторы с открытым исходным кодом, например Icarus Verilog. Основным недостатком использования программной модели при логической симуляции является экспоненциальный рост времени симуляции по мере увеличения количества логических элементов в верифицируемом устройстве.

**Эмуляция.** Недостатки симуляции могут быть устранены посредством эмуляции – процесса построения модели устройства в специальном программно-аппаратном комплексе (эмуляторе). Современными эмуляторами, используемыми в индустрии, являются Cadence Palladium, Synopsys Zebu, Siemens Veloce.

Преимущество эмуляции – на несколько порядков более высокое значение  $F_m$ , которое может достигать единиц мегагерц [3]. При этом сохраняется возможность использования функционала симулятора: генерация тестовых воздействий, отображение временной диаграммы, сравнение результатов модели с эталоном. Важно отметить, что эмулятор не способен воспроизвести временные задержки моделируемого устройства, поэтому эмуляция позволяет вести моделирование только с точностью до тактов (даже при использовании симулятора, основанного на событиях). Кроме того, эмуляторы – это специализированные аппаратно-программные комплексы, имеющие высокую стоимость ( $10^6$ – $10^7$  долл.).

**Прототипирование на ПЛИС.** При функциональной верификации устройства применяется прототипирование на ПЛИС – аппаратный способ ускорения моделирования. Однако в отличие от эмуляции этот способ не предполагает использования симулятора. Тестовые воздействия подаются на модель, воспроизведенную в ПЛИС по физическим интерфейсам.

Преимущество данного способа заключается в относительно низкой стоимости, которая в основном определяется ценой отладочной платы с одной или несколькими ПЛИС, на которой будет вестись прототипирование ( $10^4$ – $10^5$  долл.). Такой прототип работает на частотах ПЛИС, поэтому частота подобного моделирования может достигать десятков и сотен мегагерц [4]. К недостаткам прототипирования можно отнести необходимость адаптации RTL-описания устройства под реализацию в ПЛИС, проектирование тестового окружения с физическими интерфейсами, интеграцию прототипа с физическими устройствами, например с SATA-диском, датчиком изображения и т. д. Решение этих задач требует много времени, что может свести на нет выигрыш в скорости проверки устройства [4]. Кроме того, прототипирование на ПЛИС имеет ограниченные ресурсы по отладке верифицируемого устройства [5] ввиду невозможности отображения внутреннего состояния устройства и ограничений по логированию внешних сигналов. Например, невозможно сохранить подробный trace-лог работы кластера процессорных ядер при запуске операционной системы Linux.

По сравнению с логической симуляцией эмуляция и прототипирование в ПЛИС сокращают время моделирования при верификации цифровых устройств. Однако эмуляторы имеют высокую стоимость, в настоящее время затруднена их техническая поддержка и лицензирование, а прототипирование на ПЛИС требует больших трудозатрат на создание прототипа и тестового окружения и ограничивает возможности по отладке устройства.

Таким образом, ускорение процесса моделирования является актуальной задачей. Кроме того, важно создание отечественных аппаратно-программных комплексов, что обеспечит развитие технологически независимых средств проектирования.

**Разработка программно-аппаратного комплекса.** При предлагаемом способе аппаратное ускорение симуляции происходит за счет переноса вычислений результатов воздействий на тестируемое устройство из симулятора в реальную либо эмулируемую в ПЛИС аппаратуру посредством программного интерфейса. Это обеспечивает значительное сокращение времени моделирования при относительно низкой стоимости средств верификации. Идея ускорения моделирования посредством эмуляции в ПЛИС не нова. Однако в результате анализа литературных источников не обнаружены данные о конкретных способах реализации аппаратного ускорителя моделирования, по оценке производительности и применимости в зависимости от сложности тестируемого устройства (количества логических вентилях). При этом в индустрии отсутствуют open-source-аналоги эмуляторов от коммерческих компаний.

В процессе разработки программно-аппаратного комплекса для ускорения функциональной верификации необходимо решить следующие задачи:

- имитация верифицируемого устройства (DUT) специальным нефункциональным модулем, соединенным с эмулируемым устройством;
- реализация способа обмена данными между хостом (рабочая станция, оснащенная симулятором) и эмулируемым устройством;
- реализация модуля контроллера эмулируемого устройства, подающего принятые из теста входные воздействия и отправляющие обратно выходные сигналы с эмулируемого устройства.

Кроме того, необходимо реализовать вспомогательный программный компонент, отвечающий за подсчет реального времени, затраченного на выполнение симуляции, и количество смоделированных тактовых синхроимпульсов для оценки производительности комплекса. На рис. 1 представлена предлагаемая структура программно-аппаратного комплекса, которая состоит из двух устройств: рабочей станции, на которой запускается симулятор, и отладочной платы с ПЛИС, подключенного к компьютеру через высокоскоростной интерфейс.

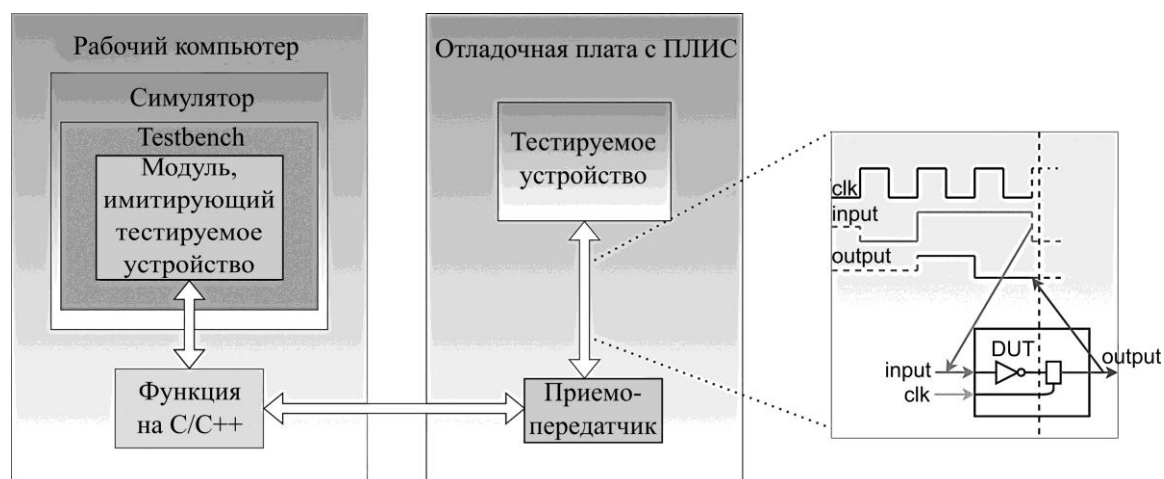


Рис. 1. Структура программно-аппаратного комплекса  
Fig. 1. Structure of the software-hardware complex

Для передачи данных по интерфейсу используются программные и аппаратные компоненты. Формирование тестовых воздействий и отображение результатов функционирования верифицируемого устройства осуществляются стандартными средствами симулятора. Для обмена информацией с симулятором используется интерфейс DPI (Direct Programming Interface), что налагает ограничения на применяемые симуляторы, в частности DPI поддерживают симуляторы QuestaSim, Xcelium, VCS. Данный интерфейс позволяет подключить к симулятору библиотеки, написанные на языке Си. При вызове функций из этих библиотек типы передаваемых аргументов языка SystemVerilog интерпретируются как стандартные типы языка Си. Кроме того, при вызове функции можно использовать и статические массивы, передаваемые через указатель [6]. Подключенные к симулятору библиотеки могут содержать функции, производящие обмен данными через какой-либо физический интерфейс между компьютером и отладочной платой с ПЛИС. Таким образом, подобные функции могут стать посредником в обмене данными между симулятором и ПЛИС.

Ускорение симуляции достигается за счет замены вычисления состояний проверяемого устройства эмуляцией этого устройства в ПЛИС. Верификационное окружение полностью реализовано в симуляторе и взаимодействует с несинтезируемым модулем, имитирующим тестируемое устройство. По каждому такту синхроимпульса этот модуль будет передавать в ПЛИС входные воздействия посредством вызова программы через DPI, а по завершении этого вызова выставлять принятые от отладочной платы с ПЛИС данные на выходных сигналах устройства в верификационном окружении.

Для того чтобы на время обмена данными между отладочной платой и симулятором эмулируемое устройство оставалось в неизменном состоянии, подаваемый на него тактовый сигнал отключается до прихода очередного набора входных воздействий.

После выставления данных на входах устройства на него подается один тактовый синхроимпульс, после чего тактовый сигнал снова отключается до следующей порции входных воздействий. Управление тактовым синхроимпульсом проверяемого устройства, а также задача приема данных от симулятора и формирование из них входных воздействий на управляемое устройство возлагаются на специальный модуль – приемопередатчик (см. рис. 1).

**Реализация прототипа программно-аппаратного комплекса.** В основе прототипа – отладочная плата Zynq ZC702 на базе системы на кристалле Zynq 7000, содержащей два домена: процессорную систему и программируемую логику (рис. 2). Прием и передача данных реализованы в домене процессорной системы, которая имеет доступ к интерфейсу Ethernet. Передача данных из домена процессорной системы в домен программной логики происходит через память DDR3, подключенную к домену программной логики через интерконнект на основе интерфейса AXI4.

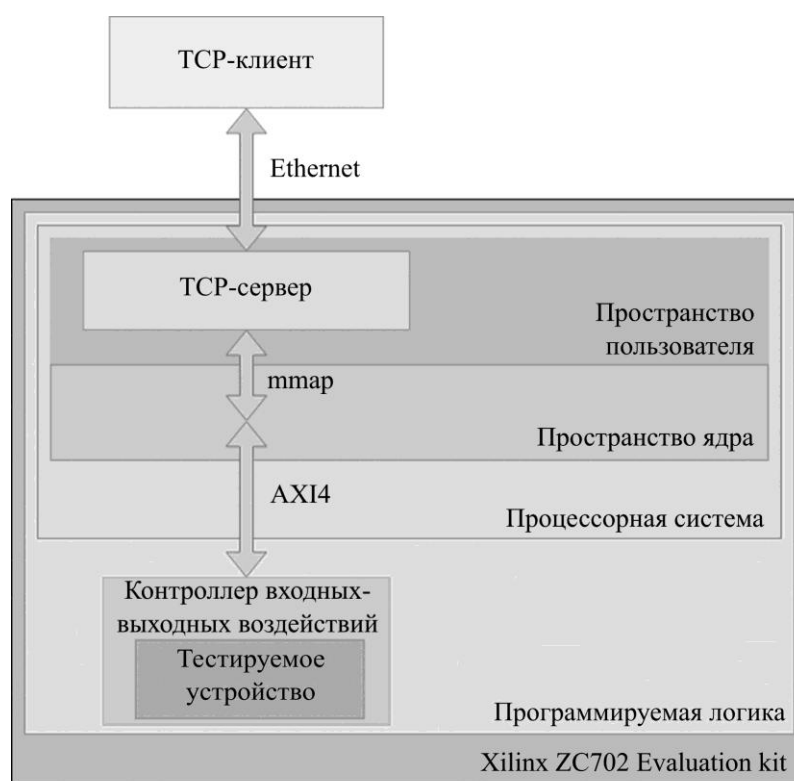


Рис. 2. Структурная схема прототипа программно-аппаратного комплекса  
Fig. 2. Block diagram of the software-hardware complex prototype

Внутри процессорной системы на плате Zynq ZC702 запущено ядро Linux, на котором работает tcp-сервер. После старта симуляции на очередном тактовом синхроимпульсе входные воздействия, сгенерированные верификационным окружением, передаются через программный интерфейс DPI внутрь библиотеки на языке C++, реализующей tcp-клиент. Последний упаковывает данные и передает их tcp-серверу через интерфейс Ethernet. На стороне платы Zynq ZC702 tcp-сервер распаковывает данные и записывает в память по адресам, к которым в домене программируемой логики через интерконнект AXI4 обращается IP-блок, отвечающий за выставление входных воздействий на верифицируемое устройство, генерацию тактового синхроимпульса, снятие и

запись в память выходных сигналов. После этого выходные сигналы устройства возвращаются в симулятор тем же маршрутом.

В ходе исследования прототипа программно-аппаратного комплекса определено, что среднее время передачи данных от симулятора до тестируемого устройства и обратно составляет около 300 мс. Это означает, что в данной реализации программно-аппаратный комплекс может моделировать порядка 3,3 тыс. тактовых синхроимпульсов в секунду. Ограничением при передаче данных в первую очередь является память DDR3, на обмен через которую требуется половина всего времени передачи. Кроме того, установлено, что производительность существенно зависит от задержки при передаче сигнала по физическому интерфейсу. Иными словами, при выборе интерфейса важнее не пропускная способность интерфейса, а то, сколько времени необходимо, чтобы единичный пакет данных дошел от отправителя к получателю.

**Улучшение структуры программно-аппаратного комплекса. Применение интерфейса PCI-E.** Для улучшения общей производительности комплекса необходимо сократить время задержки передачи данных (latency) и исключить из канала передачи лишние обращения к памяти. Сокращение времени задержки сигнала предлагается реализовать за счет перехода на доступный в рабочих станциях интерфейс общего пользования – PCI-E. В отладочной плате контроллер PCI-E реализован в виде сложнофункционального блока ПЛИС [7] с программными библиотеками драйвера (XDMA) [8]. В связи с этим нет необходимости в использовании домена процессорной системы и передачи данных через память DDR3.

Библиотека XDMA предоставляет модуль ядра Linux, реализующий программный драйвер PCI-E, а также примеры программного обеспечения, использующие этот драйвер из пространства пользователя. Схема взаимодействия представлена на рис. 3.

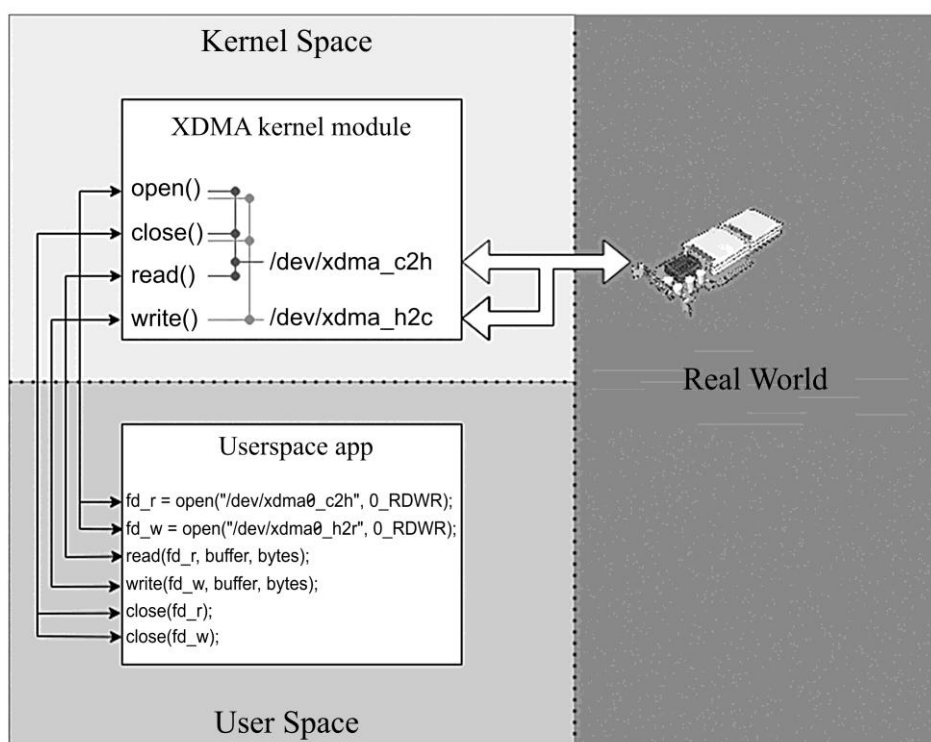


Рис. 3. Связь интерфейса PCI-E с пользовательским приложением через XDMA  
 Fig. 3. PCI-E to host application connection via XDMA

**Контроль утечек дескрипторов.** Важно отметить, что конечная точка PCI-E (node) может применяться только в монопольном режиме. Это значит, что открытое устройство может быть использовано только по дескриптору, возвращенному при открытии. Устройство не сможет быть повторно открыто, пока не будет освобожден предыдущий дескриптор. Поэтому крайне важно избегать утечки дескрипторов при работе прикладного программного обеспечения, в противном случае возникнет необходимость в перезагрузке компьютера либо принудительном закрытии дескриптора средствами операционной системы (если таковые имеются). Для решения данной проблемы следует воспользоваться концепцией RAII (Resource Acquisition Is Initialization – получение ресурса есть инициализация).

Концепция RAII подразумевает, что получение ресурса какого-либо объекта (область памяти, файл или устройство) должно быть неразрывно связано с инициализацией объекта (дескриптора), а освобождение ресурса – с уничтожением этого объекта [9]. Иными словами, создание дескриптора обязательно совмещается с получением доступа к ресурсу, и если этот дескриптор будет уничтожен (по причине выхода программы за пределы области видимости этого объекта либо завершения, исключения или сигнала прерывания программы), то в момент уничтожения объекта должна быть проведена процедура освобождения ресурса. В языке C++ данная задача может быть решена с помощью конструкторов / деструкторов.

**Оптимизация многократных вызовов.** Работа комплекса подразумевает десятки (сотни) тысяч вызовов функции отправки и приема транзакций по PCI-E. В самом простом случае эта функция может быть реализована по следующему алгоритму:

*Шаг 1.* Создание дескриптора.

*Шаг 2.* Получение доступа к устройству PCI-E.

*Шаг 3.* Создание указателя на выровненную область памяти.

*Шаг 4.* Выделение выровненной области памяти.

*Шаг 5.* Перемещение отправляемых данных в выровненную область памяти.

*Шаг 6.* Отправка транзакции по PCI-E.

*Шаг 7.* Прием транзакции по PCI-E.

*Шаг 8.* Перемещение принятых данных из выровненной области памяти.

*Шаг 9.* Освобождение выровненной области памяти.

*Шаг 10.* Возвращение доступа к устройству PCI-E.

*Шаг 11.* Автоматическое уничтожение объектов указателей и дескрипторов по выходу из функции.

Шаги 1 и 2, 3 и 4, 9–11 могут быть совмещены благодаря принципу RAII, но это не ускорит работу программы, так как операции будут инкапсулированы. Проблемой является многократное получение и освобождение ресурсов. Поскольку программа подключается к симулятору в виде скомпилированной библиотеки, данная проблема может быть решена с помощью статических переменных библиотеки. В момент загрузки библиотеки будут созданы статические переменные дескрипторов устройств и указателей на выровненные участки памяти. В момент создания этих переменных произойдет получение доступа к соответствующим ресурсам (в соответствии с RAII). Эти переменные будут доступны всем функциям библиотеки на протяжении всего времени работы программы. По завершении программы перед выгрузкой библиотеки статические переменные будут автоматически уничтожены, что приведет к освобождению ресурсов.

Таким образом, получение и освобождение ресурсов будет связано лишь с загрузкой-выгрузкой программной библиотеки, что происходит единожды за симуляцию.

**Методика оценки производительности программно-аппаратного комплекса.**

Для оценки производительности комплекса предложено использовать количество моделируемых в секунду тактовых синхроимпульсов:

$$F_m = \frac{N_{clk}}{T_r} = \frac{T_m / T_{clk}}{T_r},$$

где  $N_{clk}$  – количество промоделированных тактовых синхроимпульсов;  $T_r$  – реальное время, затраченное на моделирование;  $T_m$  – время моделирования;  $T_{clk}$  – период тактового синхроимпульса, который задается в верификационном окружении.

Время моделирования  $T_m$  может быть получено верификационным окружением в конце моделирования путем вызова системной функции \$realtime. Для измерения времени  $T_r$  в верификационном окружении вызывается функция, написанная на языке C++, которая возвращает текущее время рабочей станции и вычисляет разность времени на момент начала и конца моделирования. Погрешность измерения времени  $T_r$ , обеспечиваемая рабочими станциями, не превышает одной десятой секунды. Существуют руководства по измерению времени на Linux-системах с точностью до микросекунд [10]. Для снижения времени вклада  $T_r$  в результат измерений время моделирования увеличено.

Для оценки производительности комплекса разработан синтетический тест с конвейеризируемым устройством, сложностью (количеством эквивалентных логических вентилях) которого можно управлять с помощью параметризации количества стадий конвейера.

В ходе экспериментов измеряли время моделирования посредством симуляции, использующей программную модель устройства на поведенческом уровне, а также модель, воспроизведенную в комплексе для устройств с различным количеством вентилях. Результаты сравнения представлены на рис. 4. Применение программно-аппаратного комплекса на основе интерфейса PCI-E по сравнению с использованием интерфейса Ethernet дает восьмикратное увеличение параметра  $F_m$ . Кроме того, применение комплекса становится эффективнее логической симуляции для устройств, состоящих из 100 тыс. логических вентилях и больше.

**Заключение.** Предложенные структура и вариант технической реализации программно-аппаратного комплекса позволяют ускорить функциональную верификацию, функционирование и производительность которых проверены на двух прототипах. Результаты измерения производительности прототипов комплекса по сравнению с логической симуляцией показали восьмикратное ускорение моделирования для устройств, состоящих из 550 тыс. логических вентилях, и на порядок быстрее моделирование устройств, состоящих из десятков миллионов логических вентилях.

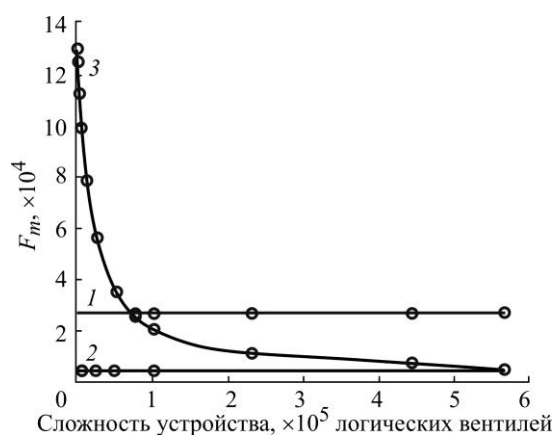


Рис. 4. Сравнение параметра  $F_m$  для логической симуляции и моделирования с помощью эмуляции, использующей разные высокоскоростные интерфейсы: 1 – эмуляция с PCI-E; 2 – эмуляция с Ethernet; 3 – симуляция

Fig. 4.  $F_m$  parameter comparison between program modeling and emulation using different high-speed interfaces: 1 – emulation with PCI-E; 2 – emulation with Ethernet; 3 – simulation

Полученные результаты свидетельствуют о возможности создания отечественных программно-аппаратных комплексов для ускорения функциональной верификации, для чего потребуется решить ряд научно-технических задач. В частности, необходимо разработать способ моделирования метастабильных состояний в устройствах с несколькими тактовыми доменами, способы деления проектов на изолированные части для эмуляции устройств с использованием нескольких ПЛИС, исследовать возможность усовершенствования комплекса путем более тесной интеграции с САПР с открытым исходным кодом и создаваемом на его основе отечественном маршрутом проектирования цифровых СБИС.

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

### **Литература**

1. **Foster H.** The weather report: 2018 study on IC/ASIC verification trends // Semiconductor Engineering [Электронный ресурс]. 11.04.2019. URL: <https://semiengineering.com/the-weather-report-2018-study-on-ic-asic-verification-trends> (дата обращения: 22.05.2023).
2. **Farooq U., Mehrez H.** Pre-silicon verification using multi-FPGA platforms: A review // J. Electron. Test. 2021. Vol. 37. Iss. 1. P. 7–24. <https://doi.org/10.1007/s10836-021-05929-1>
3. Cadence Palladium Z1 enterprise emulation platform // Cadence [Электронный ресурс]. URL: [https://www.cadence.com/content/dam/cadence-www/global/en\\_US/documents/tools/system-design-verification/palladium-z1-ds.pdf](https://www.cadence.com/content/dam/cadence-www/global/en_US/documents/tools/system-design-verification/palladium-z1-ds.pdf) (дата обращения: 20.10.2022).
4. **Юрлин С. В., Бычков И. Н.** Прототипирование на основе ПЛИС для верификации многоядерных микропроцессоров // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС). 2014. № 4. С. 45–50. EDN: SSZKGN.
5. **Singhal M.** What is emulation? // Universal Verification Methodology [Электронный ресурс]. 31.10.2016. URL: <https://learnuvmverification.com/index.php/2016/10/31/what-is-emulation> (дата обращения: 22.05.2023).
6. **Zhang K.** VPI and DPI // SystemVerilog: RTL Modeling, Simulation and Verification [Электронный ресурс]. URL: <https://systemverilog.dev/9.html#9.2> (дата обращения: 22.05.2023).
7. DMA/Bridge subsystem for PCI Express v4.1: product guide // Xilinx [Электронный ресурс]. 16.11.2022. URL: [https://www.xilinx.com/content/dam/xilinx/support/documents/ip\\_documentation/xdma/v4\\_1/pg195-pcie-dma.pdf](https://www.xilinx.com/content/dam/xilinx/support/documents/ip_documentation/xdma/v4_1/pg195-pcie-dma.pdf) (дата обращения: 22.05.2023).
8. Xilinx DMA IP Reference drivers // GitHub [Электронный ресурс]. URL: [https://github.com/Xilinx/dma\\_ip\\_drivers](https://github.com/Xilinx/dma_ip_drivers) (дата обращения: 22.05.2023).
9. Получение ресурса есть инициализация // CardinalPeak [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cardinalpeak.com/blog/raii-introduction> (дата обращения: 22.05.2023).
10. Gettimeofday speedup // RedHat Enterprise MRG [Электронный ресурс]. URL: [https://web.archive.org/web/20160812215344/https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red\\_Hat\\_Enterprise\\_MRG/1.3/html/Realtime\\_Tuning\\_Guide/sect-Realtime\\_Tuning\\_Guide-General\\_System\\_Tuning-gettimeofday\\_speedup.html](https://web.archive.org/web/20160812215344/https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_MRG/1.3/html/Realtime_Tuning_Guide/sect-Realtime_Tuning_Guide-General_System_Tuning-gettimeofday_speedup.html) (дата обращения: 22.05.2023).

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 04.05.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

### **Информация об авторах**

**Солодовников Андрей Павлович** – аспирант Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [heroh@org.miet.ru](mailto:heroh@org.miet.ru)

**Переверзев Алексей Леонидович** – доктор технических наук, доцент, директор Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина, проректор по инновационному развитию Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [pal@olvs.miee.ru](mailto:pal@olvs.miee.ru)



**Силантьев Александр Михайлович** – начальник научно-исследовательской лаборатории «Энергоэффективные системы на кристалле» Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), silantiev@org.miet.ru

### References

1. Foster H. The weather report: 2018 study on IC/ASIC verification trends. *Semiconductor Engineering*. 11.04.2019. Available at: <https://semiengineering.com/the-weather-report-2018-study-on-ic-asic-verification-trends> (accessed: 22.05.2023).
2. Farooq U., Mehrez H. Pre-silicon verification using multi-FPGA platforms: A review. *J. Electron. Test.*, 2021, vol. 37, iss. 1, pp. 7–24. <https://doi.org/10.1007/s10836-021-05929-1>
3. Cadence Palladium Z1 enterprise emulation platform. *Cadence*. Available at: [https://www.cadence.com/content/dam/cadence-www/global/en\\_US/documents/tools/system-design-verification/palladium-z1-ds.pdf](https://www.cadence.com/content/dam/cadence-www/global/en_US/documents/tools/system-design-verification/palladium-z1-ds.pdf) (accessed: 20.10.2022).
4. Yurlin S. V., Bychkov I. N. FPGA prototyping for functional verification of multi-core processors. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES) = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (MES)*, 2014, no. 4, pp. 45–50. (In Russian). EDN: SSZKGH.
5. Singhal M. What is emulation? *Universal Verification Methodology*. 31.10.2016. Available at: <https://learnvmverification.com/index.php/2016/10/31/what-is-emulation> (accessed: 22.05.2023).
6. Zhang K. VPI and DPI. *SystemVerilog: RTL Modeling, Simulation and Verification*. Available at: <https://systemverilog.dev/9.html#9.2> (accessed: 22.05.2023).
7. DMA/Bridge subsystem for PCI Express v4.1: product guide. *Xilinx*. 16.11.2022. Available at: [https://www.xilinx.com/content/dam/xilinx/support/documents/ip\\_documentation/xdma/v4\\_1/pg195-pcie-dma.pdf](https://www.xilinx.com/content/dam/xilinx/support/documents/ip_documentation/xdma/v4_1/pg195-pcie-dma.pdf) (accessed: 22.05.2023).
8. Xilinx DMA IP Reference drivers. *GitHub*. Available at: [https://github.com/Xilinx/dma\\_ip\\_drivers](https://github.com/Xilinx/dma_ip_drivers) (accessed: 22.05.2023).
9. Resource acquisition is initialization. *CardinalPeak*. Available at: <https://www.cardinalpeak.com/blog/raii-introduction> (accessed: 22.05.2023). (in Russian).
10. Gettimeofday speedup. *RedHat Enterprise MRG*. Available at: [https://web.archive.org/web/20160812215344/https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red\\_Hat\\_Enterprise\\_MRG/1.3/html/Realtime\\_Tuning\\_Guide/sect-Realtime\\_Tuning\\_Guide-General\\_System\\_Tuning-gettimeofday\\_speedup.html](https://web.archive.org/web/20160812215344/https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_MRG/1.3/html/Realtime_Tuning_Guide/sect-Realtime_Tuning_Guide-General_System_Tuning-gettimeofday_speedup.html) (accessed: 22.05.2023).

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 04.05.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

### Information about the authors

**Andrey P. Solodovnikov** – PhD student of the Institute of Micro-Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), hepoh@org.miet.ru

**Alexey L. Pereverzev** – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Director of the Institute of Micro-Devices and Control Systems, Vice-Rector for Innovative Development, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), pal@olvs.miee.ru

**Alexander M. Silantiev** – Head of the Research Laboratory “Energy-efficient systems on a chip”, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), silantiev@org.miet.ru

Научная статья  
УДК 681.586  
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-4-452-460  
EDN: LWHTER

## Моделирование и оптимизация емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа

*Пайн Со Хту, В. В. Калугин, Е. С. Кочурина*

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

*kochurinaes@gmail.com*

**Аннотация.** Емкостные МЭМС-датчики ускорения измеряют ускорение в широком диапазоне и характеризуются сравнительно простой конструкцией, значительной стабильностью, низким уровнем энергопотребления, высокой чувствительностью по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . В работе представлены результаты процессов моделирования и оптимизации чувствительного элемента емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа. Исследованы деформация, резонансные частоты и изменения емкости чувствительного элемента МЭМС-датчика с толщиной кремниевой пластины 30 мкм с использованием программного обеспечения Ansys и Ansys Maxwell на основе метода конечных элементов. Изучена деформация чувствительного элемента по осям  $X$  и  $Y$ , которая играет важную роль для измерения емкости конструкции МЭМС-датчика при воздействии ускорения в диапазоне 100–500  $g$ . В результате моделирования МЭМС-датчика с различным количеством гребенок получены изменения емкости между гребенками. Установлено, что конструкция емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа с 20 парами электродов оптимальна по чувствительности и массогабаритным параметрам.

**Ключевые слова:** МЭМС-датчик ускорения гребенчатого типа, изменение емкости, чувствительный элемент, линейное ускорение

**Для цитирования:** Пайн Со Хту, Калугин В. В., Кочурина Е. С. Моделирование и оптимизация емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 452–460. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-452-460>. – EDN: LWHTER.

Original article

## Modeling and optimization of MEMS comb type capacitive acceleration sensor

Paing Soe Thu, V. V. Kalugin, E. S. Kochurina

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

kochurinaes@gmail.com

**Abstract.** The MEMS capacitive acceleration sensors measure acceleration in wide frequency range and are characteristic of simple construction, considerable stability, low energy consumption and high X-, Y-, and Z-direction sensitivity. In this work, the results of modeling and optimization of the sensing element of a MEMS comb type capacitive acceleration sensor are presented. The deformation, resonant frequencies, and capacitance changes in MEMS comb type capacitive acceleration sensor with 30  $\mu\text{m}$  silicon wafer are examined using the Ansys and Ansys Maxwell simulation software based on the finite element method. The sensing element deformation along the X and Y axes was studied, as it plays a critical role in measuring the capacitance of the structure of MEMS comb type acceleration sensor on exposure to accelerations in the range 100–500 g. As a result of modeling a MEMS sensor with a different number of combs, changes in the capacitance between the combs were obtained. It has been established that the design of MEMS comb type capacitive acceleration sensor with 20 pairs of electrodes is optimal in terms of sensitivity, weight and size parameters.

**Keywords:** MEMS comb type acceleration sensor, capacitance changes, sensitive element, linear acceleration

**For citation:** Paing Soe Thu, Kalugin V. V., Kochurina E. S. Modeling and optimization of MEMS comb type capacitive acceleration sensor. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 452–460. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-452-460>. – EDN: LWHTER.

**Введение.** МЭМС объединяют электронные и механические компоненты в единую конструкцию устройства с геометрическими размерами от микрометров до миллиметров. МЭМС-приборы изготавливаются методами групповой обработки в основном с применением стандартных микроэлектронных процессов. Емкостные МЭМС-датчики ускорения измеряют ускорение в широком диапазоне, характеризуются значительной стабильностью, сравнительно простой конструкцией, малыми габаритами и весом, низким уровнем энергопотребления, высокой чувствительностью по осям X, Y и Z, низкой стоимостью в серийном производстве. Благодаря перечисленным свойствам емкостные МЭМС-датчики ускорения представляют интерес для разработчиков и потребителей изделий на основе МЭМС [1–3].

Цель настоящей работы – исследование деформации по осям X и Y при воздействии ускорения на конструкцию чувствительного элемента (ЧЭ) емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа, резонансных частот и изменения емкости между гребенками с применением программ Ansys и Ansys Maxwell на основе метода конечных элементов.

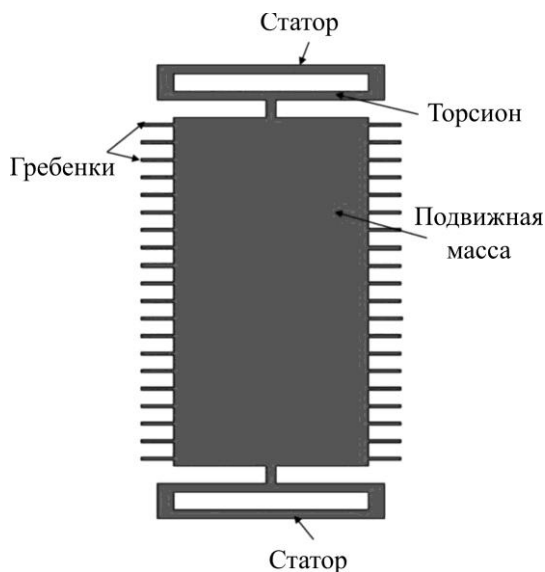


Рис. 1. Конструкция ЧЭ емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа  
 Fig. 1. The design of the sensitive element of comb-type capacitive acceleration MEMS sensor

**Конструкция чувствительного элемента.** ЧЭ емкостного МЭМС-датчика ускорения гребенчатого типа выполнен из кремния и состоит из подвижной массы с гребенками, статора с гребенками, которые соединены торсионами (рис. 1). Электроды гребенок соединены с подвижной массой и смещаются в зависимости от ее положения, меняя емкость относительно неподвижных электродов гребенок.

Емкостные МЭМС-датчики ускорения определяют изменение емкости между зазорами электродов, когда подвижная масса перемещается из исходного положения под действием внешней силы или внешнего ускорения. Ускорение может быть вызвано гравитацией или внешними факторами (движением, вибрацией и т. д.) [4]. При приложении ускорения вдоль оси чувствительности ЧЭ смещается, при этом смещаются

также гребенки емкостной системы съема сигнала, значения емкостей при этом изменяются. Смещение гребенки электродов можно измерить по изменению емкости  $C$  между гребенками и неподвижными электродами, которая определяется выражением

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d},$$

где  $\epsilon_0$  – относительная диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала;  $A$  – площадь перекрытия гребенок;  $d$  – расстояние между гребенками [5].

Схематичное изображение элементов емкостного МЭМС-датчика ускорения с одной гребенкой показано на рис. 2. Толщина кремниевых элементов подвижной массы и гребенок 30 мкм.

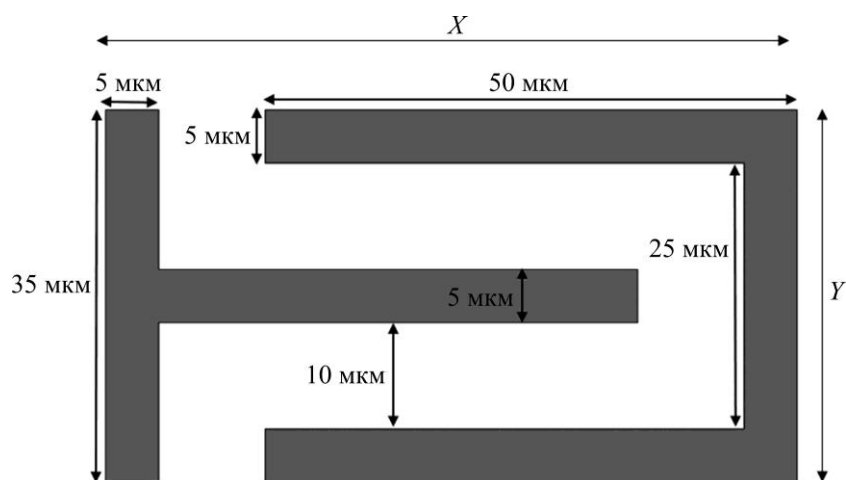


Рис. 2. Схематичное изображение элемента емкостного МЭМС-датчика ускорения с одной гребенкой  
 Fig. 2. Schematic diagram of capacitive acceleration MEMS sensor with single comb-drive element

Для исследования на основе анализа доступных для реализации изделия технологических процессов выбраны следующие размеры структуры ЧЭ емкостного датчика ускорения:

Подвижная масса .....	600 × 400 × 30 мкм
Длина торсиона.....	350 мкм
Ширина торсиона .....	60 мкм
Толщина торсиона .....	30 мкм
Гребенка .....	50 × 5 × 30 мкм
Зазор между подвижными электродами.....	10 мкм

**Моделирование деформации чувствительного элемента.** При появлении линейного ускорения происходит деформация торсионов ЧЭ емкостного МЭМС-датчика ускорения. Изменение деформации по осям  $X$  и  $Y$  позволяет рассчитать изменение геометрии торсиона при воздействии линейного ускорения и определить чувствительность МЭМС-датчика. Моделирование деформации ЧЭ проводили при воздействии линейных ускорений в диапазоне 100–500  $g$  по измерительным осям  $X$  и  $Y$ . Изменение деформации ЧЭ показано на рис. 3. Максимальные и минимальные результаты деформации предлагаемой конструкции ЧЭ по осям  $X$  и  $Y$  в результате многократного воздействия ускорений приведены на рис. 4. Конструкция МЭМС-датчика разработана таким образом, чтобы ЧЭ максимально смещался при воздействии ускорения вдоль оси чувствительности. Из рис. 3 и 4 видно, что при воздействии ускорения 500  $g$  смещение по оси  $Y$  больше, чем по оси  $X$ , т. е. влияние воздействий по перекрестным осям меньше.

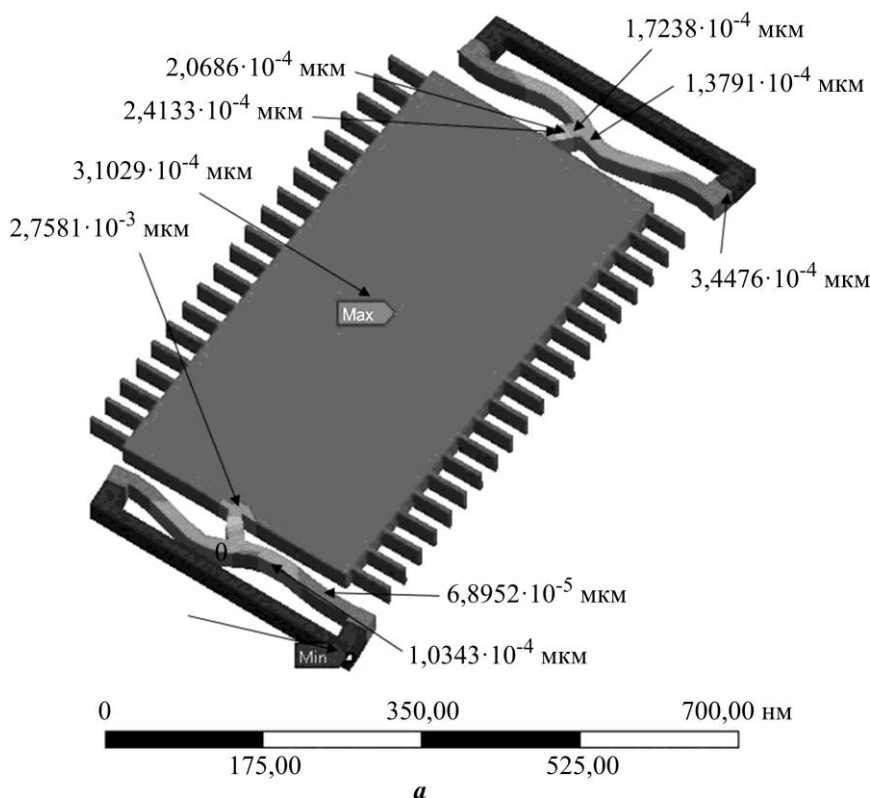


Рис. 3. Деформация ЧЭ емкостного МЭМС-датчика ускорения при ускорении 500  $g$  по оси  $X$  (а)

Fig. 3. Deformation of the sensitive element of capacitive acceleration MEMS sensor under the acceleration range of 500  $g$  along the axis  $X$  (a)

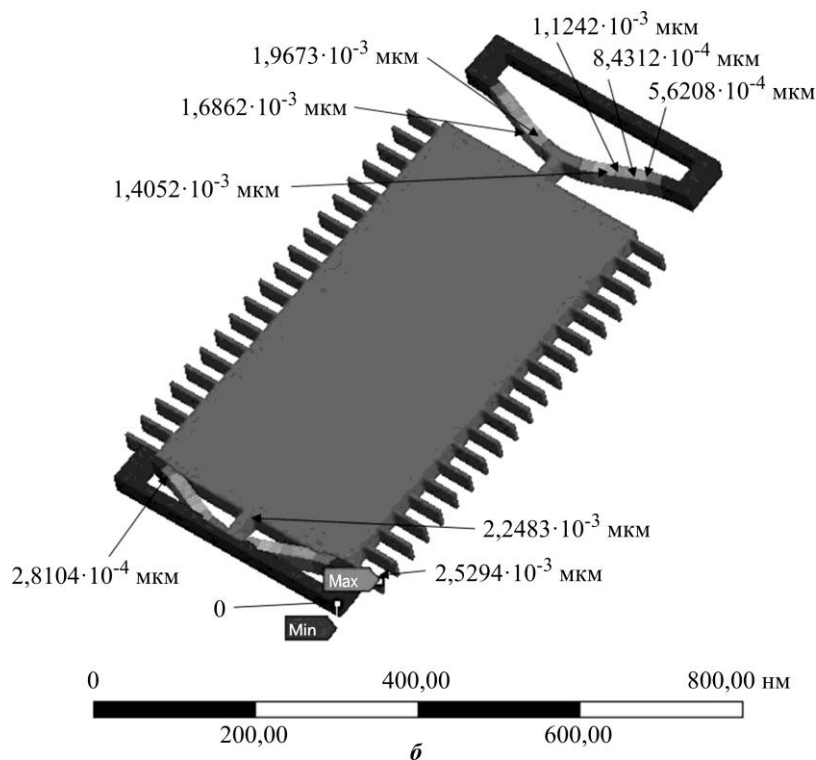


Рис. 3. Деформация ЧЭ емкостного МЭМС-датчика ускорения при ускорении 500 g по оси Y (б)

Fig. 3. Deformation of the sensitive element of capacitive acceleration MEMS sensor under the acceleration range of 500 g along the axis Y (b)

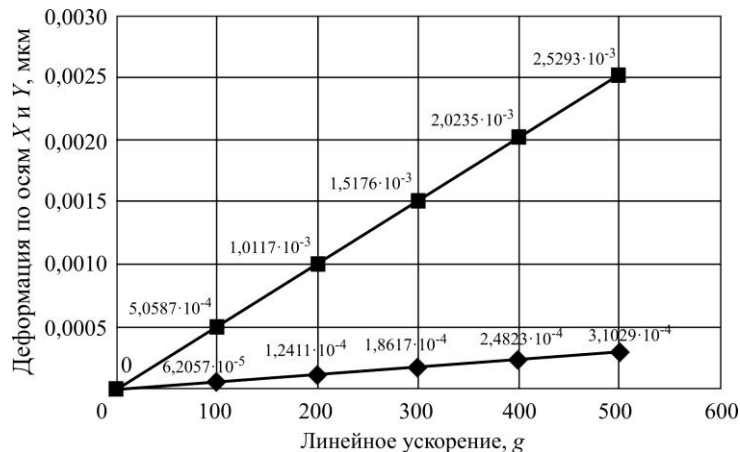
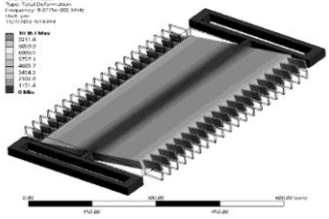
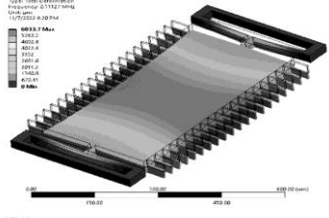
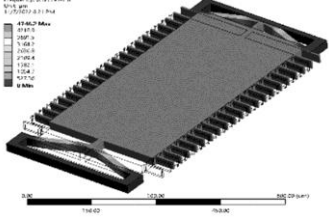
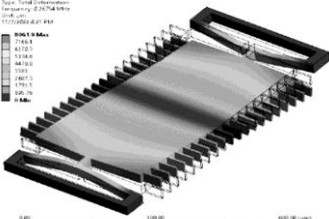
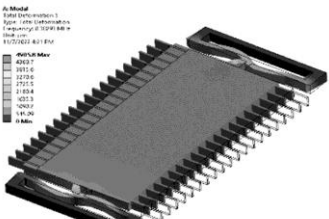
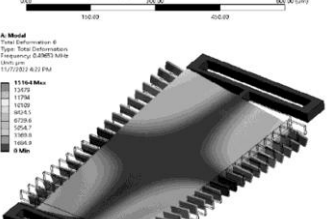


Рис. 4. Изменение деформации торсиона в результате воздействия линейных ускорений по осям X (—◆—) и Y (—■—)

Fig. 4. Deformation changes of torsion as a result of the influence of linear accelerations along the axes X (—◆—) and Y (—■—)

**Анализ частотных колебаний чувствительного элемента.** Для определения ускорения ЧЭ емкостного МЭМС-датчика ускорения находится в рабочем режиме определенной частоты колебаний. Частота, на которой система имеет тенденцию колебаться в отсутствие какой-либо движущей силы, называется собственной. Изменение собственной частоты зависит от толщины ЧЭ датчика. Измеряемое ускорение зависит от толщины торсиона и деформации центра подвижной массы, причем наибольшее влияние оказывает изменение толщины торсиона.

**Результаты модального анализа частотных колебаний ЧЭ емкостного МЭМС-датчика ускорения**  
**Modal analysis results of frequency vibration of sensitive element of the capacitive MEMS acceleration sensor**

Рабочий режим	Форма колебаний резонатора	Частота колебаний ЧЭ, Гц
Мода 1		90 775
Мода 2		111 270
Мода 3		127 390
Мода 4		267 540
Мода 5		382 930
Мода 6		496 530

Собственные частоты колебаний ЧЭ определим с использованием САПР для решения задач механики деформируемого твердого тела и механики конструкций. Модальный анализ позволяет определить собственные и другие частоты. Паразитные сигналы имеют более высокие резонансные частоты, поэтому практически не влияют на общую деформацию подвеса ЧЭ, а их вклад в движение ЧЭ минимален. Высокие значения резонансных частот гарантируют отсутствие резонансных эффектов при типичных внешних воздействиях. С уменьшением собственной частоты уменьшается полоса пропускания датчика. Результаты модального анализа частотных колебаний ЧЭ емкостного МЭМС-датчика ускорения приведены в таблице. Минимальное значение частоты колебаний составляет 90 775 Гц, что позволяет исключить возникновение резонанса ЧЭ при внешних воздействиях.

**Моделирование изменения емкости между гребенками.** Емкость между парой гребенчатых электродов создается вертикальными поверхностями гребенок в области перекрытия. Таким образом, суммарная емкость – это комбинация емкостей, вносимых соседними гребенками.

Изменение емкости одной гребенки ЧЭ емкостного МЭМС-датчика моделировали с использованием программного обеспечения Ansys Maxwell. Электрическое напряжение подавали на U-образную гребенку, заземление – на T-образную гребенку. Результаты моделирования приведены на рис. 5. Суммарные изменения емкости в зависимости от количества гребенок (от 1 до 20) по оси Y показаны на рис. 6.

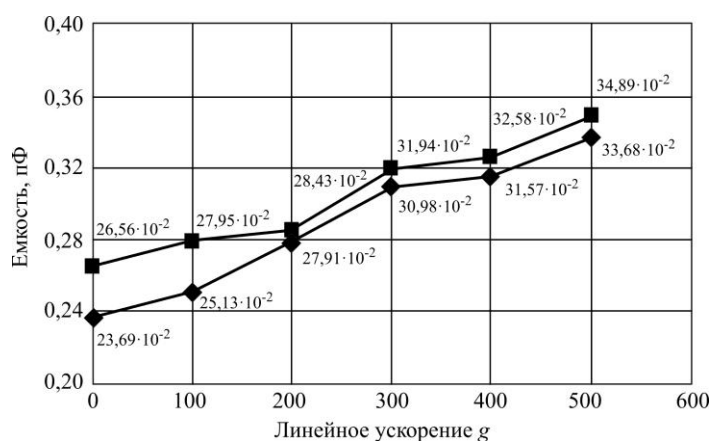


Рис. 5. Изменение емкости между гребенками в результате воздействий линейных ускорений по осям X (—◆—) и Y (—■—)

Fig. 5. The change in the capacity between the combs as a result of the effects of linear accelerations along the axes X (—◆—) and Y (—■—)

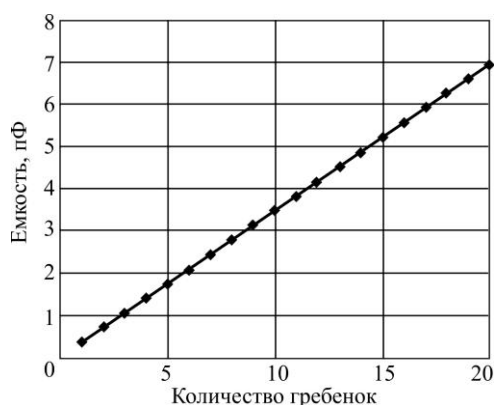


Рис. 6. Изменение емкости между гребенками при ускорении 500 g в зависимости от количества гребенок

Fig. 6. Capacity change between combs at 500 g acceleration depending on the number of combs



**Заключение.** При моделировании с помощью специализированного программного обеспечения воздействия на ЧЭ ускорений в диапазоне 100–500 g получены значения изменения емкости между гребенками  $3,489 \cdot 10^{-11}$  и  $6,978 \cdot 10^{-10}$  Ф с количеством гребенок от 1 до 20. Результаты исследования позволили выявить необходимое количество гребенок для максимальной чувствительности МЭМС-датчика. С помощью модального анализа установлено, что паразитные колебания имеют высокие резонансные частоты и поэтому практически не влияют на суммарную деформацию подвеса ЧЭ, а их вклад в движение ЧЭ минимален.

### Литература

1. Research and development of the deep plasma-chemical silicon etching process for the creation of a silicon element with a vertical profile / *V. V. Kalugin, E. S. Kochurina, N. M. Zariankin et al.* // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2020. P. 2144–2148. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038991>
2. Проектирование и изготовление чувствительного элемента МЭМС-акселерометра / *С. П. Тимошенко, С. А. Анчутин, Н. М. Зарянкин и др.* // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23. № 2. С. 63–67. <https://doi.org/10.17587/nmst.23.63-67>
3. *Mansoorzare H., Todi A., Moradian S., Abdolvand R.* A piezo-capacitive high-frequency resonant accelerometer // 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). Las Vegas: IEEE, 2020. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IUS46767.2020.9251353>
4. Design and simulation of MEMS differential capacitive accelerometer / *S. Sinha, S. Shakya, R. Mukhiya et al.* // 7th ISSS International Conference on Smart Materials, Structures and Systems (ISSS-2014). Bangalore: ISSS, 2014. P. 1–8. <https://doi.org/10.13140/2.1.1074.8809>
5. *Hanasi P., Sheeparamatti B. G., Abbigeri V., Meti N.* Study of capacitance in electrostatic comb-drive actuators // Proceedings of the 2015 COMSOL Conference [Электронный ресурс]. URL: <https://www.comsol.com/paper/study-of-capacitance-in-electrostatic-comb-drive-actuators-27091> (дата обращения: 22.05.2023).

Статья поступила в редакцию 30.01.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.03.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

### Информация об авторах

**Пайн Со Хту** – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [paingsthu7@gmail.com](mailto:paingsthu7@gmail.com)

**Калугин Виктор Владимирович** – доктор технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [viktor118@mail.ru](mailto:viktor118@mail.ru)

**Кочурин Елена Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [kochurinaes@gmail.com](mailto:kochurinaes@gmail.com)

### References

1. Kalugin V. V., Kochurina E. S., Zariankin M. N., Anchutin A. S., Nyan Linn Phyoo. Research and development of the deep plasma-chemical silicon etching process for the creation of a silicon element with a vertical profile. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2020, pp. 2144–2148. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038991>

2. Timoshenkov S. P., Anchutin S. A., Zarjankin N. M., Kalugin V. V., Kochurina E. S., Timoshenkov A. S., Boev L. R. Research and development of MEMS accelerometer's sensor. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 63–67. (In Russian). <https://doi.org/10.17587/nmst.23.63-67>

3. Mansoorzare H., Todi A., Moradian S., Abdolvand R. A piezo-capacitive high-frequency resonant accelerometer. *2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. Las Vegas, IEEE, 2020, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IUS46767.2020.9251353>

4. Sinha S., Shakya S., Mukhiya R., Gopal R., Pant B. Design and simulation of MEMS differential capacitive accelerometer. *7th ISSS International Conference on Smart Materials, Structures and Systems (ISSS-2014)*. Bangalore, ISSS, 2014, pp. 1–8. <https://doi.org/10.13140/2.1.1074.8809>

5. Hanasi P., Sheeparamatti B. G., Abbigeri V., Meti N. Study of capacitance in electrostatic comb-drive actuators. *Proceedings of the 2015 COMSOL Conference*. Available at: <https://www.comsol.com/paper/study-of-capacitance-in-electrostatic-comb-drive-actuators-27091> (accessed: 22.05.2023).

The article was submitted 30.01.2023; approved after reviewing 29.03.2023; accepted for publication 31.05.2023.

#### *Information about the authors*

**Paing Soe Thu** – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), paingsthu7@gmail.com

**Viktor V. Kalugin** – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), viktor118@mail.ru

**Elena S. Kochurina** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kochurinaes@gmail.com

### **Вниманию читателей журнала**

#### **«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

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

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

## Технология герметизации МЭМС на уровне пластины на базе SLID-структур, выращенных из электролитов на основе металлоорганических комплексов Cu-Sn

А. Б. Грабов, Д. Д. Рискин, С. Ю. Суздальцев,  
Д. Ю. Обижаев, С. А. Жукова

Центральный научно-исследовательский институт химии  
и механики, г. Москва, Россия

*mail@cniim.ru*

**Аннотация.** В настоящее время для герметизации МЭМС- и НЭМС-приборов используется технология корпусирования на пластине. Наиболее перспективным методом герметизации, применяемым в данной технологии, является твердожидкостное взаимодиффузионное соединение (Solid-Liquid Inter-Diffusion, SLID). В работе рассмотрен технологический процесс герметизации МЭМС-структур на уровне пластины. Предложен метод гальванического формирования SLID-структуры Cu-Sn пониженной шероховатости из металлоорганических комплексных соединений – глицината меди и метансульфоната олова. Проведена экспериментальная отработка температурного профиля процесса герметизации МЭМС-структур. Результаты исследования герметизированных кристаллов МЭМС получены с помощью сканирующей электронной микроскопии и сканирующей акустической микроскопии. Отработан технологический режим соединения пластин, обеспечивающий выход годных кристаллов более 80 %.

**Ключевые слова:** МЭМС, корпусирование на пластине, гальваническое осаждение, бондинг, сканирующая акустическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия

**Для цитирования:** Технология герметизации МЭМС на уровне пластины на базе SLID-структур, выращенных из электролитов на основе металлоорганических комплексов Cu-Sn / А. Б. Грабов, Д. Д. Рискин, С. Ю. Суздальцев и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 461–470. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-461-470>. – EDN: IALLZI.

Original article

## The MEMS wafer-level sealing technology based on SLID structures grown from Cu-Sn organometallic complexes electrolytes

A. B. Grabov, D. D. Riskin, S. Yu. Suzdaltsev,  
D. Yu. Obizhaev, S. A. Zhukova

Central Scientific-Research Institute of Chemistry and Mechanics,  
Moscow, Russia

mail@cniihm.ru

**Abstract.** Nowadays, wafer-level packaging technology is used for sealing MEMS- and NEMS-based devices. The most advanced sealing method in this technology is solid-liquid inter-diffusion (SLID). In this work, procedure specification of MEMS wafer-level sealing is described. A method of galvanic formation of low roughness Cu-Sn SLID structures from organometallic complexes – copper glycinate and tin methanesulphonate – is proposed. An experimental testing of temperature profile of MEMS structures sealing process was conducted. The results of sealed MEMS crystals studies were obtained by scanning electronic microscopy and scanning acoustic microscopy. The technological mode of wafer bonding that provides the 80 % dice yield has been worked out.

**Keywords:** MEMS, wafer-level packaging, WLP, galvanic deposition, bonding, scanning acoustic microscopy, scanning electronic microscopy

**For citation:** Grabov A. B., Riskin D. D., Suzdaltsev S. Yu., Obizhaev D. Yu., Zhukova S. A. The MEMS wafer-level sealing technology based on SLID structures grown from Cu-Sn organometallic complexes electrolytes. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 461–470. [https://doi.org/ 10.24151/1561-5405-2023-28-4-461-470](https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-461-470). – EDN: IALLZI.

**Введение.** Проблема надежной герметизации МЭМС- и НЭМС-приборов в последние десятилетия активно решается путем внедрения технологий корпусирования на пластине (Wafer Level Packaging, WLP). На сегодняшний день наиболее перспективным методом герметизации, применяемым в технологии корпусирования на пластине, является твердожидкостное взаимодиффузионное соединение (Solid-Liquid Inter-Diffusion, SLID) [1, с. 1–39]. SLID-соединение – эвтектический сплав в двухкомпонентных металлических системах [1]. Первый компонент SLID-системы  $M_L$ , как правило, это металл с относительно низкой температурой плавления (In или Sn). Второй компонент  $M_H$  – более тугоплавкий металл (Cu, Ag, Ni, Au). SLID-систему наносят на область контакта двух соединяемых пластин таким образом, чтобы герметизируемый прибор находился внутри замкнутого контура из компонентов SLID-системы. SLID-соединение образуется при температуре плавления  $M_L$ , но в результате получается интерметаллическое соединение с гораздо более высокой температурой плавления (от 650 до 900 °C). При этом слой  $M_L$  должен полностью перейти в интерметаллическое соединение, а слой  $M_H$  должен сохраниться с обеих сторон от SLID-соединения.

В настоящей работе рассматриваются проблемы технологии формирования многослойной SLID-системы для герметизации МЭМС-структур, в которой в качестве  $M_L$  используется олово (Sn), а в качестве  $M_H$  – медь (Cu) [2].

**Формирование SLID-соединения.** Согласно фазовой диаграмме [1] в начале процесса при комнатной температуре существуют две чистые фазы – Cu и Sn (рис. 1). При нагревании Sn растворяется в Cu до насыщения, вследствие чего с поверхности Cu начинается рост тугоплавкой интерметаллидной фазы. Процесс заканчивается, когда все олово прореагирует с образованием стабильной фазы. Для системы Cu-Sn установлено последовательное существование двух интерметаллических соединений:  $Cu_6Sn_5$  ( $\eta$ -фаза) и  $Cu_3Sn$  ( $\varepsilon$ -фаза). Поэтому в конце процесса образования SLID-соединения остается  $\varepsilon$ -фаза и чистая медь с двух сторон.

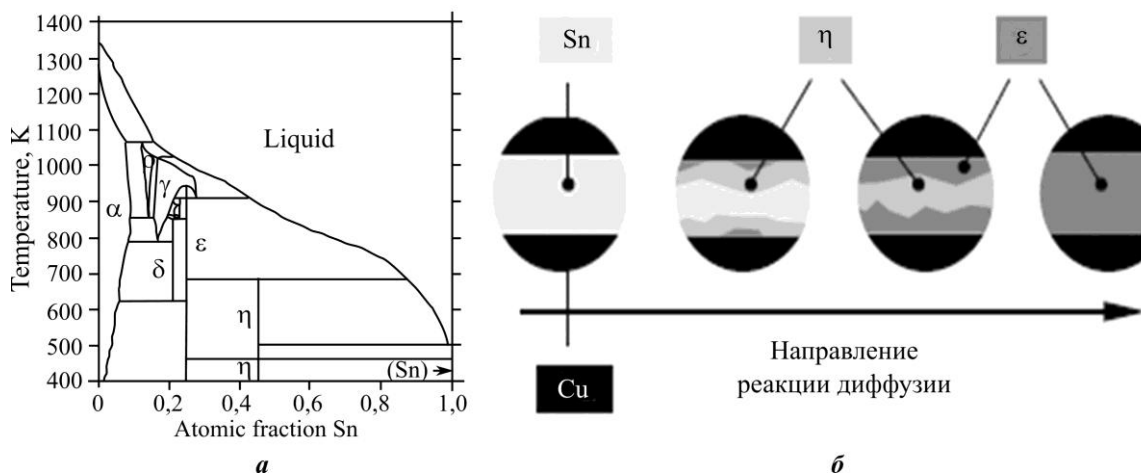


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы Cu-Sn (а) и схематичное изображение процесса трансформации фаз при формировании SLID-соединения (б) [1]

Fig. 1. Phase diagram of Cu-Sn system (a) and scheme of phases transformation process at SLID junction (b) [1]

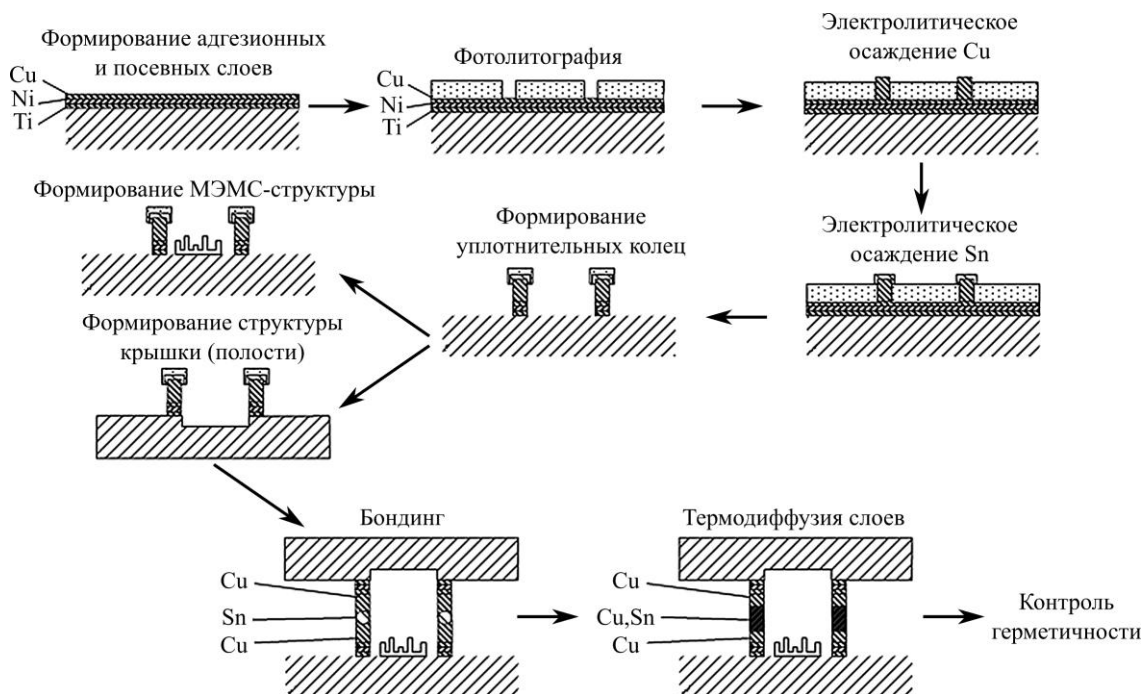


Рис. 2. Схема технологического процесса герметизации МЭМС-структур на уровне пластины

Fig. 2. Scheme of the MEMS structures sealing at wafer-level technology process

Разработанный технологический процесс изготовления герметизированной МЭМС-структуры включает в себя следующие операции (рис. 2):

- формирование адгезионных и посевных слоев Ti, Ni, Cu;
- фотолитографию химически стойким резистом;
- гальваническое наращивание Cu на открытых участках посевного слоя;
- гальваническое наращивание слоя Sn поверх Cu;
- удаление непокрытых участков медного подслоя и формирование уплотнительных колец;
- формирование внутри уплотнительных колец МЭМС-структуры или полости крышки;
- бондинг;
- термодиффузию и последующие контрольные операции.

**Исследование процесса гальванического наращивания Cu.** Проведенные работы [3] с использованием сернокислых и фторборатных электролитов показали, что для успешного проведения операции гальванического наращивания Cu важна химическая

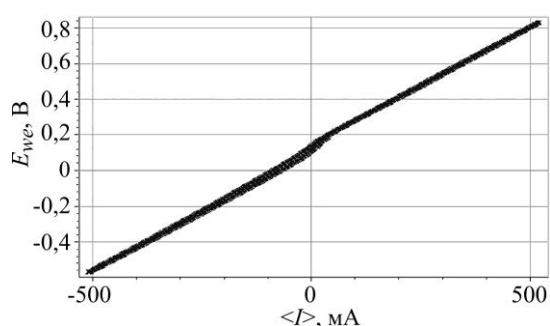


Рис. 3. Циклическая вольтамперограмма оптимизированного электролита на основе глицината меди

Fig. 3. Cyclic voltammogram of the optimized electrolyte based on Cu glycinate

стойкость фоторезиста, применяемого на этапе фотолитографии. Возможным решением этой проблемы может быть применение менее агрессивных, например рН-нейтральных, электролитов меднения. Как вариант рН-нейтрального электролита исследован электролит на основе комплексного металлоорганического соединения – глицината меди  $\text{Cu}(\text{gly})_2$ .

В ходе исследования нескольких составов электролита установлено, что наилучшее соотношение низкая химическая агрессивность / высокое качество осадка получается при буферизации электролита слабой лимонной кислотой до  $\text{pH} \approx 3,0$ .

Циклическая вольтамперограмма буферизованного глицинатного электролита меднения приведена на рис. 3.

Оптимизированный электролит имеет следующий состав [4]: 16–32 г/л  $\text{CuSO}_4$ ; 30–40 г/л глицина; 30–40 г/л лимонной кислоты. Отметим, что каждый из ингредиентов данного электролита в отдельности применяется в технологии микроэлектроники, они коммерчески доступны, даже с квалификацией «ОСЧ», в том числе и отечественного производства. Соответственно, использование глицинатного электролита в микроэлектронной технологии имеет большие перспективы.

Гальваническое осаждение слоя Cu проводили при постоянном токе в потенциостатическом режиме. Плотность тока  $j \approx 2 \text{ mA/cm}^2$ . Длительность наращивания слоя Cu толщиной 6 мкм составляет 60 мин. Результаты исследования глицинатного электролита с помощью электронного микроскопа (СЭМ) приведены на рис. 4.

При исследовании глицинатного электролита обнаружен эффект управления текстурой осадка при изменении потенциала перенапряжения на подложке. Если осаждение проводится при потенциале менее 200 мВ, то текстура осадка имеет выраженный полиэдрический габитус. Характеристический размер кристаллита в этом случае составляет 400 нм. При увеличении потенциала более 220 мВ текстура приобретает характерный мелкоигльчатый габитус. При этом характеристическая длина кристаллита уменьшается до 300 нм, ширина становится порядка 40 нм, осажденный слой меди приобретает блеск и более светлый оттенок. Эффект изменения габитуса осадка требует дополнительного исследования.

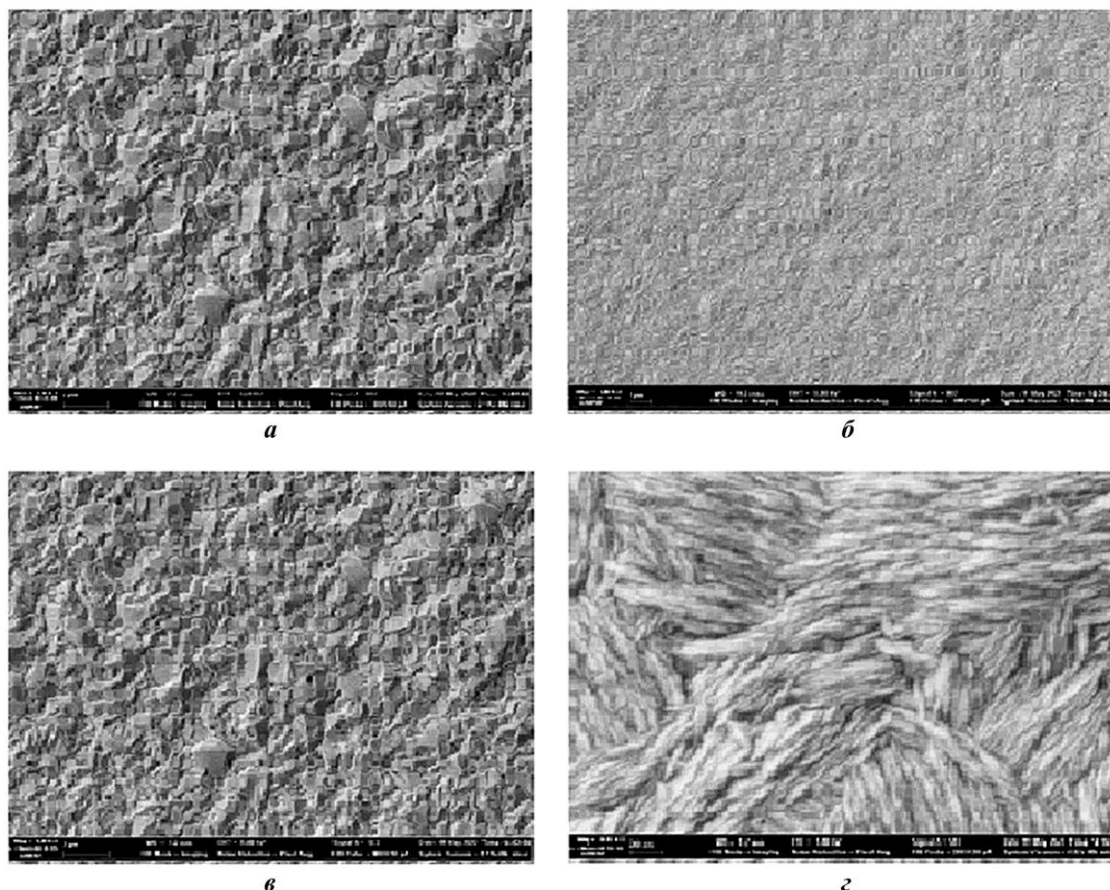


Рис. 4. СЭМ-изображения осадка Cu из глицинатного электролита: а –  $\eta < 0,175$  В (увеличение 5000  $\times$ ); б –  $\eta < 0,175$  В (увеличение 10 000  $\times$ ); в –  $\eta > 0,290$  В (увеличение 5000  $\times$ ); г –  $\eta > 0,290$  В (увеличение 35 000  $\times$ )

Fig. 4. SEM images of Cu deposition from glycinate electrolyte: а –  $\eta < 0.175$  V (magnification 5000  $\times$ ); б –  $\eta < 0.175$  V (magnification 10 000  $\times$ ); в –  $\eta > 0.290$  V (magnification 5000  $\times$ ); г –  $\eta > 0.290$  V (magnification 35 000  $\times$ )

**Осаждение Sn.** Гальваническое осаждение Sn – основная сложность в SLID-технологии [5]. Осадок Sn, как правило, матовый с высокой шероховатостью. Блестящие осадки Sn в одностадийном процессе до сих пор никем не получены. Sn – плохой комплексообразователь. При этом водные растворы солей Sn подвержены гидролизу, вследствие чего сложно добиться воспроизводимости процесса гальванического осаждения. Все оловянные электролиты на основе солей имеют очень плохую рассеивающую способность, из-за чего на пластине наблюдается значительная разновысотность осадка. Гальваническое олово образует дендриты. Согласно литературным данным наилучшее качество осадка Sn демонстрируют щелочные электролиты на основе станнатов  $[\text{Sn}(\text{OH})_4]^{2-}$ . Однако щелочные электролиты растворяют позитивные фоторезисты и, следовательно, несовместимы с процессом фотолитографии.

В ряде источников [6] рекомендуются для применения в микроэлектронике метансульфонатные процессы лужения. В этих процессах Sn находится в форме соли метансульфоновой кислоты  $\text{Sn}(\text{CH}_3\text{SO}_3)_2$ , а в качестве фоновое вещества применяется метансульфоновая кислота  $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$ . Основные преимущества метансульфоновых электролитов по сравнению, например, с сульфатными – это в семь раз меньшая плотность тока обмена и меньшая склонность к гидролизу.

Для формирования слоя Sn использовали электролит с рабочим наименованием «электролит метансульфонатно-тиокарбамидный для оловянирования» (ЭМСТО) следующего состава: 0,02 М 50%-ного водного раствора метансульфоната олова (II) (Sigma-Aldrich, США); 1 М 99,9%-ного раствора метансульфоновой кислоты (MSA) (Sigma-Aldrich); 0,02 М тиокарбамида (ХЧ). Кроме того, в электролит вводили добавки: 10 мл/л поверхностно-активного вещества Chemeta-D6; 3 г/л желатина; 0,005 мкМ/л полиэтиленгликоля. Циклическая вольтамперограмма ЭМСТО приведена на рис. 5.

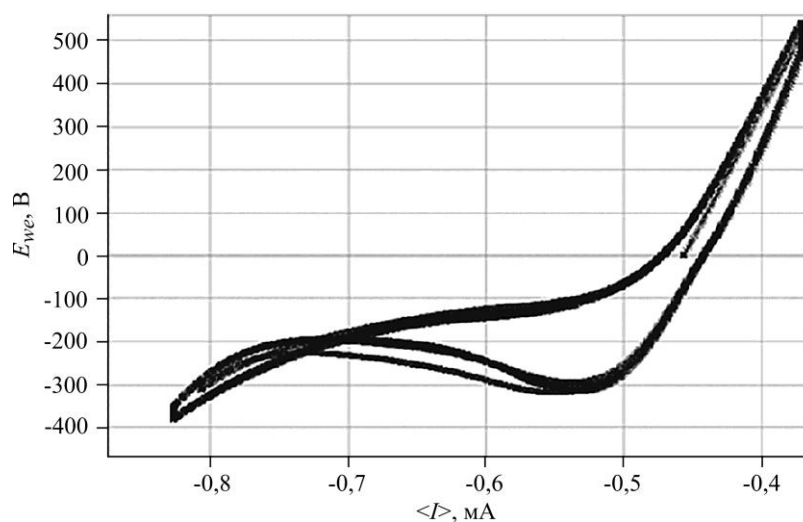


Рис. 5. Циклическая вольтамперограмма метансульфонатного электролита лужения  
Fig. 5. Cyclic voltammogram of Sn methanesulphonate electrolyte

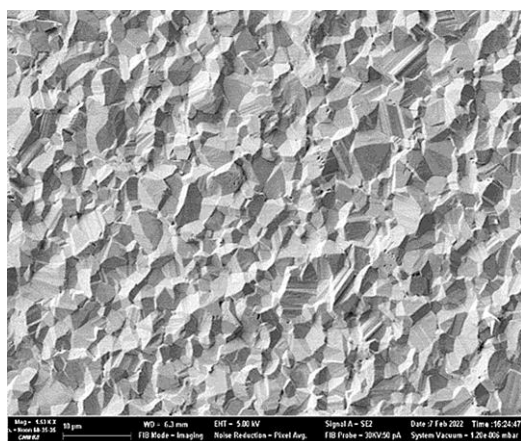


Рис. 6. СЭМ-изображение осадка Sn при увеличении 5000 ×  
Fig. 6. SEM image of Sn deposition with magnification 5000 ×

В ходе работы выполнено 18 процессов гальванического лужения на кремниевую пластину диаметром 100 мм со сформированной WLP-структурой. Толщину слоя Sn варьировали от 2,05 до 8,6 мкм. Время процесса при этом составляло от 85 до 285 мин. ЭМСТО обеспечивает удовлетворительное качество осадка Sn. Осадок получается плотный, беспористый, матовый, характеристический размер кристаллита  $d \approx 2,74$  мкм. Адгезия к подслою Cu хорошая. Микроскопическое изображение слоя Sn приведено на рис. 6.

**SLID-соединение пластин.** Формирование SLID-соединения пластин осуществляли в два этапа: совмещение и соединение; термодиффузия. Совмещение и соединение пластин проводили с помощью полуавтоматического

бондера. Метод совмещения – по меткам и сквозным отверстиям в пластине-крышке. Контроль совмещения осуществляли с помощью инфракрасного микроскопа IDONUS. Вид совмещенных пластин в микроскопе показан на рис. 7.



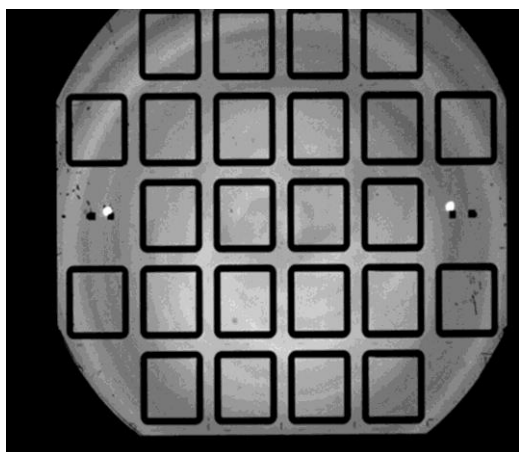


Рис. 7. Изображение совмещенных пластин в инфракрасном микроскопе IDONUS  
Fig. 7. An IR microscopic (IDONUS) image of conjugated wafers

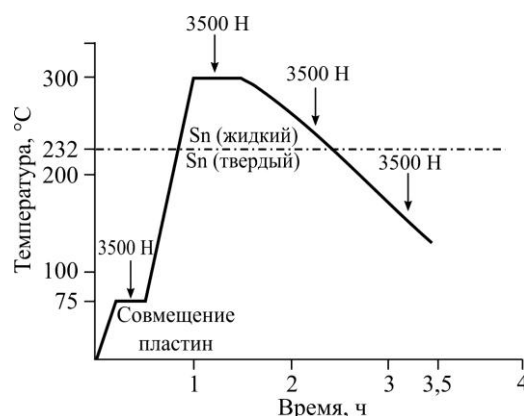


Рис. 8. Температурный профиль соединения пластин  
Fig. 8. Temperature profile of wafers junction

Совмещение проводили после выдержки пластин в вакууме ( $10^{-4}$  мм рт. ст.) в течение 10 мин при температуре 75 °С. К совмещенным пластинам прикладывали усилие 3500 Н, после чего температуру повышали до 280–300 °С и выдерживали пластины при данной температуре в течение 20 мин. По окончании выдержки без включения охлаждения бондера температуру снижали до 120 °С. Температурный профиль процесса показан на рис. 8. Общее время процесса совмещения и соединения пластин составляет 3–3,5 ч. На стадии соединения слои Sn с обеих пластин сливаются и на границе Cu-Sn образуются колоколообразные очаги η-фазы  $Cu_6Sn_5$ .

Термодиффузию проводили в камере повышенной температуры при температуре 220 °С в течение 48 ч. В ходе термодиффузии остаток Sn реагирует, заполняя весь объем промежутка η-фазой, после чего начинается относительно медленный рост ε-фазы  $Cu_3Sn$ . После полного проращивания ε-фазы дальнейшие реакции в SLID-системе прекращаются и образуется механически прочное вакуум-плотное соединение. СЭМ-изображение области сформированного соединения показано на рис. 9.

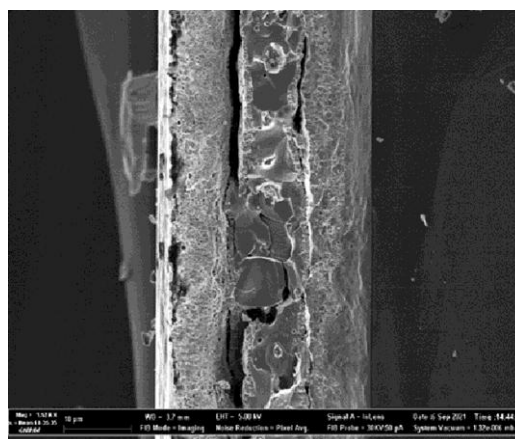


Рис. 9. СЭМ-изображение области SLID-соединения пластин  
Fig. 9. SEM image of the wafers SLID junction region

**Методы контроля SLID-соединения.** Для контроля герметичности SLID-соединения после разделения пластин на кристаллы можно применять такие стандартные методы, как пузырьковый тест и масс-спектрометрия. Из одной соединенной пары пластин получено 16 кристаллов, которые протестированы данными методами. При пузырьковом методе обнаружены четыре отказа, а при масс-спектрометрии – один отказ, одиннадцать соединенных кристаллов признаны годными. Все годные кристаллы и один отбракованный исследовали методом сканирующей акустической микроскопии.

Ультразвуковой сканирующий акустический микроскоп (САМ) работает следующим образом: исследуемый объект погружается в иммерсионную жидкость и с помощью

ультразвукового преобразователя, состоящего из излучателя и приемника, подвергается воздействию ультразвука. Отраженные от поверхностей объекта волны фиксируются приемником, детектирующим их частоту, амплитуду и фазу. Сигнал приемника обрабатывается специализированным программным обеспечением, с помощью которого выделяются слои, единообразные по свойствам отраженных волн. Информация о геометрической форме и взаимном расположении слоев преобразуется в восстановленное изображение внутренней структуры исследуемого объекта.

Исследование проводили с помощью ультразвукового САМ при следующих параметрах: усиление 27 дБ; иммерсионная жидкость – вода; частота индуктора 75 МГц; скорость сканирования 100 мм/с; пространственное разрешение 20 мкм. В результате в исследованных образцах обнаружены 14 слоев, которые отличаются по характеристикам акустического отражения в них. Область SLID-соединения наблюдается с 6-го по 14-й слой, считая с верхнего слоя. Восстановленное САМ-изображение слоя 8 приведено на рис. 10. Во всех исследованных кристаллах в месте SLID-соединения наблюдаются замкнутые области более светлого цвета, свидетельствующие об отсутствии в данном локусе вещества, отражающего ультразвуковую волну.

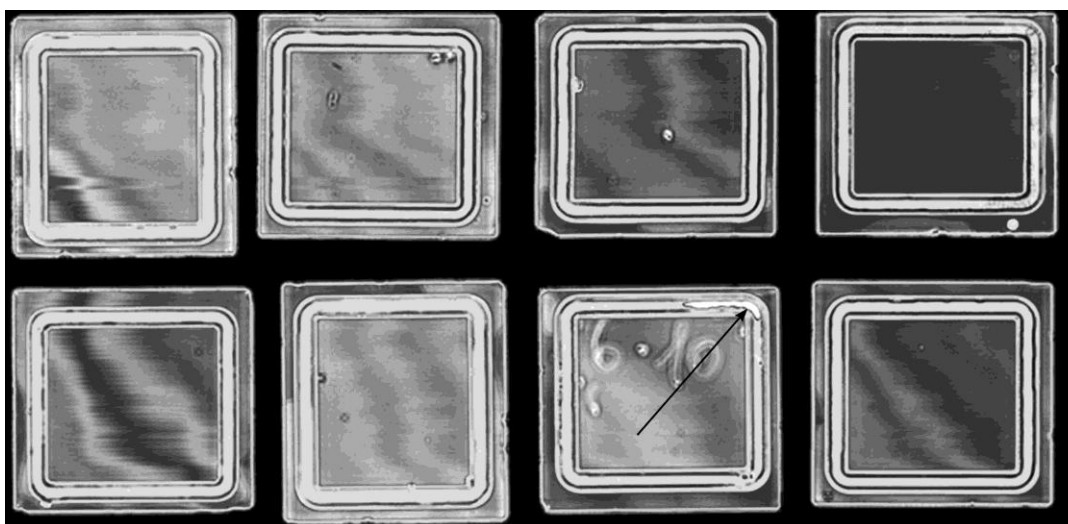


Рис. 10. САМ-изображение кристаллов со сформированным SLID-соединением (участок высветления соответствует области течи кристалла)

Fig. 10. Scanning acoustic microscope image of chips with formed SLID junctions (the whitened region is corresponded with the chip's leakage region)

Образец, идентифицированный на масс-спектрометре как имеющий течь  $1,5 \cdot 10^{-5}$  л/(Па·с), отличается от других кристаллов наличием двух высветлений. Первое имеет характеристический размер более 4 мм и занимает всю ширину дорожки уплотнительного кольца. Второе высветление также занимает всю ширину дорожки, но имеет меньшую длину. Оба высветления наблюдаются с 7-го по 14-й слой, что приводит к выводу: данное высветление является полостью, не заполненной металлом.

**Заключение.** Разработанный технологический процесс герметизации МЭМС на уровне пластины на базе SLID-структур, выращенных из электролитов на основе металлоорганических комплексов Cu-Sn, продемонстрировал свою надежность. Применение технологии герметизации на уровне пластины обеспечивает выход годных кристаллов более 80 %.

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

### Литература

1. Wafer level 3-D ICs process technology / eds **Ch. S. Tan, R. J. Gutmann, L. R. Reif**. New York: Springer, 2008. XII, 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76534-1>
2. **Thi Thuy Luu**. Solid liquid interdiffusion wafer-level bonding for MEMS packaging: diss. for the PhD. (Eng.). Horten: Buskerud and Vestfold Univ. College, 2015. 108 p.
3. Технология формирования многослойной структуры Cu-Sn для герметизации МЭМС на уровне пластины / **А. В. Грабов, С. Ю. Суздальцев, Д. Д. Рискин и др.** // Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № S7. С. 506–507. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.506.507>
4. А. с. 389169 СССР. Электролит блестящего меднения / **Л. П. Шандалова, И. Б. Обухова, В. Н. Зайцев**; заявл. 23.02.1971; опубл. 05.07.1973, Бюл. № 29. 2 с.
5. **Hilton A., Temple D. S.** Wafer-level vacuum packaging of smart sensors // *Sensors*. 2016. Vol. 16. Iss. 11. Art. No. 1819. <https://doi.org/10.3390/s16111819>
6. **Zhang Z.** Nucleation and growth kinetics of tin and tin–silver alloy during initial stages of electrodeposition: diss. for the Dr. Sci. (Chem. Eng.). Durham, NH: Univ. of New Hampshire, 2004. 140 p.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 26.04.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

### Информация об авторах

**Грабов Алексей Борисович** – ведущий инженер Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а), [mail@cniihm.ru](mailto:mail@cniihm.ru)

**Рискин Дмитрий Дмитриевич** – ведущий инженер Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а), [mail@cniihm.ru](mailto:mail@cniihm.ru)

**Суздальцев Сергей Юрьевич** – кандидат технических наук, начальник лаборатории Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а), [mail@cniihm.ru](mailto:mail@cniihm.ru)

**Обижаев Денис Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а), [mail@cniihm.ru](mailto:mail@cniihm.ru)

**Жукова Светлана Александровна** – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника научно-исследовательского центра Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а), [mail@cniihm.ru](mailto:mail@cniihm.ru)

### References

1. Tan Ch. S., Gutmann R. J., Reif L. R. (eds). *Wafer level 3-D ICs process technology*. New York, Springer, 2008. xii, 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76534-1>
2. Thi Thuy Luu. *Solid liquid interdiffusion wafer-level bonding for MEMS packaging*, diss. for the PhD. (Eng.). Horten, Buskerud and Vestfold Univ. College, 2015. 108 p.
3. Grabov A. V., Suzdal'tsev S. Yu., Riskin D. D., Obizhayev D. Yu., Turkov V. Ye., Zhukova S. A. The forming technology for a Cu-Sn multilayer structure for sealing MEMS at the plate level. *Nanoidustriya = Nanoindustry*, 2021, vol. 14, no. S7, pp. 506–507. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.7s.506.507>. (In Russian).
4. Shandalova L. P., Obukhova I. B., Zaytsev V. N. *Electrolyte of bright copper plating*. Inventor's certificate 389169 USSR, publ. 05.07.1973, Bul. no. 29. 2 p. (In Russian).
5. Hilton A., Temple D. S. Wafer-level vacuum packaging of smart sensors. *Sensors*, 2016, vol. 16, iss. 11, art. no. 1819. <https://doi.org/10.3390/s16111819>
6. Zhang Z. *Nucleation and growth kinetics of tin and tin–silver alloy during initial stages of electrodeposition*, diss. for the Dr. Sci. (Chem. Eng.). Durham, NH, Univ. of New Hampshire, 2004. 140 p.

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 26.04.2023; accepted for publication 31.05.2023.

**Information about the authors**

**Alexey B. Grabov** – Senior Engineer, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a), mail@cniihm.ru

**Dmitry D. Riskin** – Senior Engineer, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a), mail@cniihm.ru

**Sergey Yu. Suzdaltsev** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a), mail@cniihm.ru

**Denis Yu. Obizhaev** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of Department, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a), mail@cniihm.ru

**Svetlana A. Zhukova** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Deputy Head of the Research Center, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a), mail@cniihm.ru

**Уважаемые авторы и читатели!**

Вышли в свет журналы

**RUSSIAN MICROELECTRONICS**

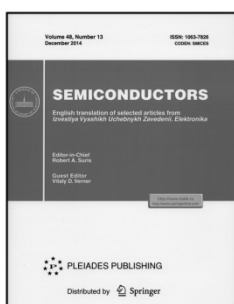
Vol. 51, No. 7, 2022. - ISSN PRINT: 1063-7397,  
ISSN ONLINE: 1608-3415,

**SEMICONDUCTORS**

Vol. 56, No. 13, 2022. - ISSN PRINT: 1063-7826,  
ISSN ONLINE: 1090-6479,

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

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



## Особенности проектирования и технологии изготовления трехмерной микросистемы с торцевой коммутацией

*И. А. Беляков, Д. В. Вертянов, М. Д. Кочергин, С. П. Тимошенко*

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

*vdv.vertyanov@gmail.com*

**Аннотация.** Трехмерные микросборки с торцевой коммутацией перспективны для применения в электронике промышленного и аэрокосмического назначения благодаря высокой плотности вертикальных соединений и стойкости к внешним воздействиям. При проектировании таких трехмерных структур возникают трудности, связанные с обозначением в САПР вертикальных дорожек, отделяемой тестовой части и заданием расположения компонентов внутри сборки. При изготовлении – проблемы связаны с процессами и материалами для герметизации трехмерных модулей, совмещением уровней, совмещением вертикальной коммутации с торцевыми контактами и формированием торцевой металлизации. В работе рассмотрены два типа микросборок с торцевой коммутацией. В области проектирования приведены решения по использованию стандартных инструментов САПР электроники для обозначения нестандартных структур. В области технологии рассмотрены способы и материалы герметизацииборок, приведены результаты исследования температурного коэффициента линейного расширения данных материалов методом дилатометрии. Указаны подходы к совмещению уровней и формированию вертикальных дорожек с шириной и зазором 50 мкм путем лазерной абляции осажденного металла с поверхности герметизирующего компаунда.

**Ключевые слова:** проектирование микросборок, корпусирование, система в корпусе, торцевая коммутация

**Финансирование работы:** работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание FSMR-2022-0002).

**Для цитирования:** Беляков И. А., Вертянов Д. В., Кочергин М. Д., Тимошенко С. П. Особенности проектирования и технологии изготовления трехмерной микросистемы с торцевой коммутацией // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 471–488. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-471-488>. – EDN: ЕННЮУ.

Original article

## Design and manufacturing features of a three-dimensional microsystem with side commutations

I. A. Belyakov, D. V. Vertyanov, M. D. Kochergin, S. P. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

*vdv.vertyanov@gmail.com*

**Abstract.** Three-dimensional microassemblies with side commutation are promising for industrial and aerospace electronics applications due to their high density of vertical connections and their environmental durability. However, in the design of such three-dimensional structures there are problems associated with designating vertical traces and separable test part in ECAD, and specifying the location of components within the assembly. In the fabrication, the problems are related to processes and materials for sealing three-dimensional modules, to levels alignment, vertical commutation alignment with side contacts and side metallization formation. In this work, two types of microassemblies with side commutation are considered. In the field of design, solutions for the use of standard electronics ECAD tools to designate non-standard structures are given. In the field of technology, the methods and materials of assemblies sealing are considered, and the results of research of thermal coefficient of linear expansion of these materials by dilatometry method are given. The approaches to alignment of levels and formation of vertical traces with width and clearance of 50  $\mu\text{m}$  by laser ablation of deposited metal from the surface of the sealing compound have been indicated.

**Keywords:** microassemblies design, packaging, system in package, side commutation

**Funding:** the work has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state task FSMR-2022-0002).

**For citation:** Belyakov I. A., Vertyanov D. V., Kochergin M. D., Timoshenkov S. P. Design and manufacturing features of a three-dimensional microsystem with side commutations. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 471–488. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-471-488>. – EDN: EHHJOY.

**Введение.** Преобразование двумерных печатных плат и микросборок в трехмерные структуры – эффективный способ миниатюризации, позволяющий с минимальными временными и материальными затратами улучшить массогабаритные параметры изделий. При этом положительный результат достигается не посредством уменьшения топологических норм коммутации, а путем более полного использования объема устройства. Это позволяет изготавливать трехмерные структуры с помощью технологий и оборудования того же уровня, что и исходное двумерное изделие. Например, микросборки корпус на корпусе могут быть изготовлены с помощью процессов корпусирования на уровне пластины, а микросборки со встроенными кристаллами – посредством технологий печатных плат. В результате для каждой группы технологий создания электронных устройств формируются подходы к изготовлению соответствующих трехмерных микросборок и области их применения [1]. Так, технологии трехмерной интегра-

ции с использованием кремниевых интерпозеров и микросхем с металлизированными отверстиями в кремнии используются в областях, где приоритетное значение имеет вычислительная мощность, например при анализе больших данных, построении серверов, а также в системах виртуальной реальности [2]. Микросборки корпус на корпусе широко применяются при производстве мобильных микропроцессоров (технология InFo) [3] и носимой электроники [4], а также в устройствах Интернета вещей [5] и телекоммуникационном оборудовании. В то же время сборки на основе встроенных кристаллов становятся все более востребованными в различных областях силовой электроники и СВЧ [6, 7].

Микросборки с торцевой коммутацией по плотности межсоединений уступают кремниевым трехмерным микросборкам, поскольку в отличие от последних основаны на уровнях, изготавливаемых по технологии печатных плат. Однако по той же причине микросборки с торцевой коммутацией проще и дешевле в изготовлении и позволяют более гибко регулировать состав изделия. Микросборки с торцевой коммутацией применяются в промышленной электронике и космической технике (технологии 3D Plus и Irvine Sensors) благодаря высокой механической прочности, высокой защищенности от радиационных воздействий [8, 9], а также относительно высокой плотности вертикальных соединений (до 100 мкм [9]), которая не зависит от высоты изделия, так как из-за применения торцевых дорожек нет проблемы ограниченного аспектного отношения.

Однако при преобразовании платы или корпуса в трехмерную микросборку с торцевой коммутацией возникают трудности, связанные с проектированием и технологией их изготовления, что требует применения оригинальных подходов в рамках технологического уровня и оборудования, используемых для двумерных структур.

В настоящей работе рассматриваются микросборки с торцевой коммутацией – класс трехмерныхборок, отличительной особенностью которых являются вертикальные связи, сформированные не с помощью переходных отверстий или шариковых выводов, как в большинстве других трехмерных структур, а посредством проходящих по торцевым граням коммутационных дорожек.

**Описание образцов.** Особенности проектирования и технологии изготовления микросборок с торцевой коммутацией рассмотрим на примере двух вариантов микросборок.

Первый вариант представляет собой тестовую микросборку, предназначенную для отработки базовых подходов к проектированию и изготовлению трехмерных структур с торцевой коммутацией. Данная микросборка состоит из четырех коммутационных плат уровней с выходящими на торцы проводниками, имеющими шаг 500 мкм. При этом верхние три платы микросборки одинаковые: на них сформированы идущие параллельно друг другу проводники (рис. 1, а). Нижняя плата (рис. 1, б, в) отличается от остальных, так как на ней присутствуют выходные контактные площадки в виде посадочного места с матрицей шариковых выводов – BGA (Ball Grid Array). Монтаж компонентов на уровне не предусматривается. Общее число выходных контактов равно 72.

Второй вариант микросборки с торцевой коммутацией представляет собой полноценное электронное изделие. Шаг торцевых выводов составляет 300 мкм, число выходных контактов микросборки – порядка 250 (рис. 2). Эти изделия служат для отработки процесса проектирования сложных микросборок с торцевыми выводами, а также для проверки эффективности подхода торцевой коммутации применительно к реальному изделию.

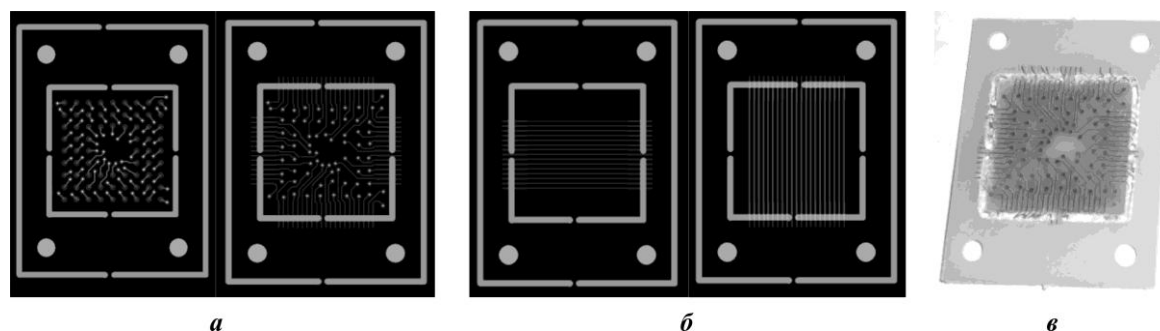


Рис. 1. Изображения плат уровней тестовой микросборки: а, б – типы применяемых плат в среде проектирования; в – изготовленная плата нижнего уровня  
Fig. 1. Images of test microassembly level boards: a, b – types of boards used in the design environment; c – manufactured lower level board

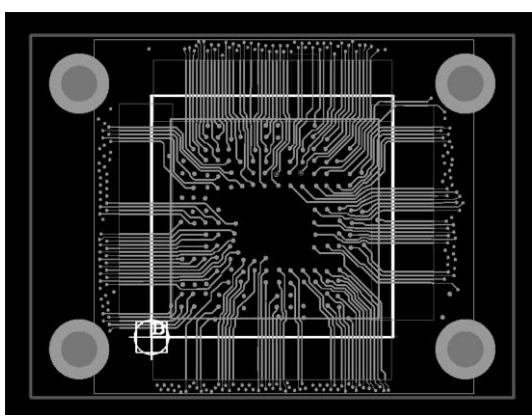


Рис. 2. Изображение платы нижнего уровня тестового варианта трехмерной микросборки  
Fig. 2. Image of the lower level board of the test version of a three-dimensional microassembly

Уровни обеих микросборок имеют одинаковые габариты и включают в себя рабочую и тестовую части. Габариты рабочей части (в центре уровня) составляют  $20 \times 20$  мм. Общие габариты плат каждого уровня с тестовой и технологической частями составляют  $30 \times 40$  мм. Высота уровней изделия первого варианта микросборки составляет 3, 4 и 5 мм. Для микросборки второго варианта высота уровня определяется исходя из высоты компонентов. При изготовлении высота задается с помощью специальных рамок с внутренними полостями под компоненты.

**Особенности проектирования микросборок с торцевой коммутацией.** Проектирование микросборок с торцевой коммутацией сопряжено с рядом трудностей из-за отсутствия для торцевых дорожек, а также для любых торцевых элементов специальных средств компьютерного представления в САПР электроники.

Так, даже такая распространенная структура, как торцевые полуотверстия, не поддерживается стандартными средствами проверки правил проектирования (DRC) многих САПР. В то же время для кремниевых интерпозеров и структур корпус на корпусе средства компьютерного представления есть. Например, множество таких средств имеется в специализированных САПР проектирования корпусов и подложек, таких как Package Designer и Substrate Integrator от Siemens EDA (Mentor Graphics). В частности, указанные программы имеют в арсенале специализированный набор средств для разработки микросборок по технологии InFo от TSMC [10, 11].

В случае структур с торцевой коммутацией необходимо подстраиваться под имеющиеся в САПР инструменты описания электронных элементов и компонентов. Однако некоторые существующие ограничения и правила не подходят для новой технологии, что не является поводом для отключения всех проверок DRC. В интересах разработчика максимальное число проверок для нового технологического процесса должно действовать. Это позволит исключить случаи, когда среди многообразия приемлемых ошибок может скрываться ошибка, нарушающая функциональность изделия, или когда из-за накопления слишком большого числа ошибок, принятых как допусти-



мые, вся САПР начинает функционировать неправильно – исчезают или неверно отображаются элементы, становится недопустимым перемещение некоторых объектов (ошибки начинают накапливаться и действовать друг на друга).

При проектировании изделий по экспериментальным технологиям следует уделять больше внимания созданию технологического поля изделия. В данном поле должны располагаться все необходимые тестовые и совместительные структуры, а тестовые элементы не должны препятствовать выполнению технологических операций и способствовать появлению неоднозначности при определении источника возникающих проблем. В настоящей работе используется минимально необходимое количество тестовых и совместительных элементов в технологическом поле. Так, с целью совмещения по углам тестовой части плат уровней формировали четыре базовых отверстия диаметром 3 мм для совмещения на штифтах. Габариты плат с тестовой частью 40 × 30 мм, без тестовой части 20 × 20 мм. Тестовую часть закладывали как часть уровней непосредственно в рабочем проекте микросборки, а не только в средстве подготовки к производству (рис. 3, а), поскольку на мультизаготовке платы должны формироваться вместе с ней для последующего тестирования и совмещения в единую структуру. Рамки, задающие расстояние между уровнями, также закладываются в проект как составная часть микросборки.

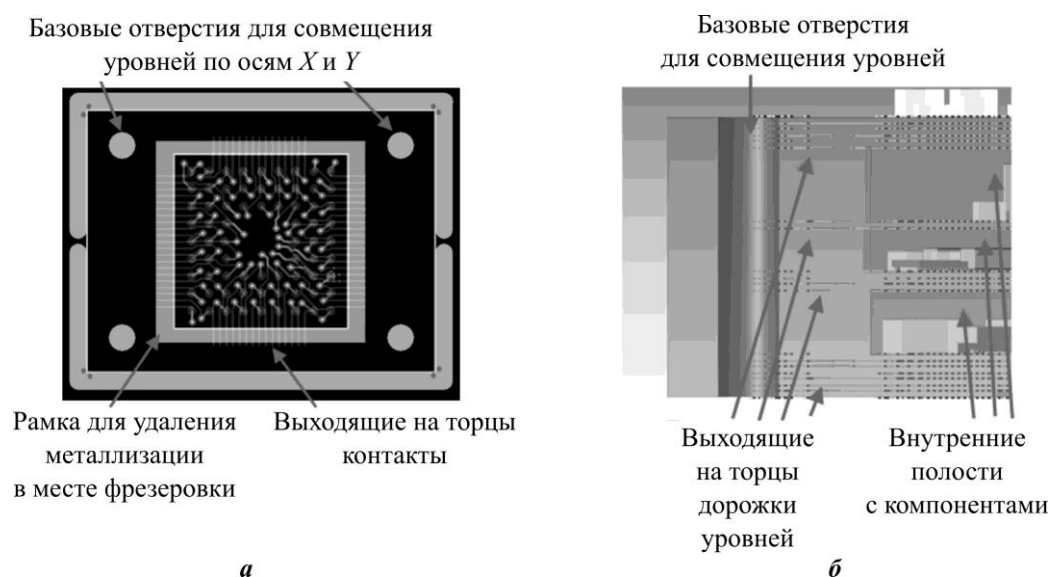


Рис. 3. Фрагменты проекта трехмерной микросборки с торцевой коммутацией в САПР электроники: *а* – нижний уровень тестовой микросборки с технологической частью; *б* – трехмерная микросборка с показанной технологической частью уровней и задающими высоту рамками (вертикальная коммутация показана с помощью отверстий)

Fig. 3. Fragments of the design of three-dimensional microassembly with side commutation in EPCAD: *a* – lower level of test microassembly with technological part, *b* – three-dimensional microassembly with shown technological part levels and height setting frames (vertical commutation is shown by means of holes)

Таким образом, в проекте САПР микросборка имеет вид как после герметизации и до отделения тестовой части (рис. 3, б), а не вид готового параллелепипеда с габаритами уровня 20 × 20 мм и торцевой коммутацией. Такое отображение позволяет создать цифровую версию изделия на этапе сборки. Однако отображение вертикальной коммутации проблематично. Именно с подобным представлением, а также с отсутствием

подходящих средств САПР для отображения торцевых межсоединений и связаны основные проблемы проектирования микросборок с торцевой коммутацией.

Торцевые выводы сборки на каждом уровне необходимо размещать так, чтобы контакты одной и той же цепи располагались строго друг над другом. Для этого в САПР все уровни микросборки должны быть объединены в едином проекте (едином файле топологии). Тогда связи между уровнями будут адекватно отображаться в окне топологического проектирования. В этом случае правильно расположить торцевые контакты, а также проверить полноту трассировки несложно. Помимо расположения строго друг над другом, торцевые выводы должны еще и подходить к границе внутреннего пространства микросборки строго перпендикулярно, без смещения (рис. 4, а). Иначе не удастся совместить топологию торцевых дорожек с выходящими на торец контактами в разных уровнях.

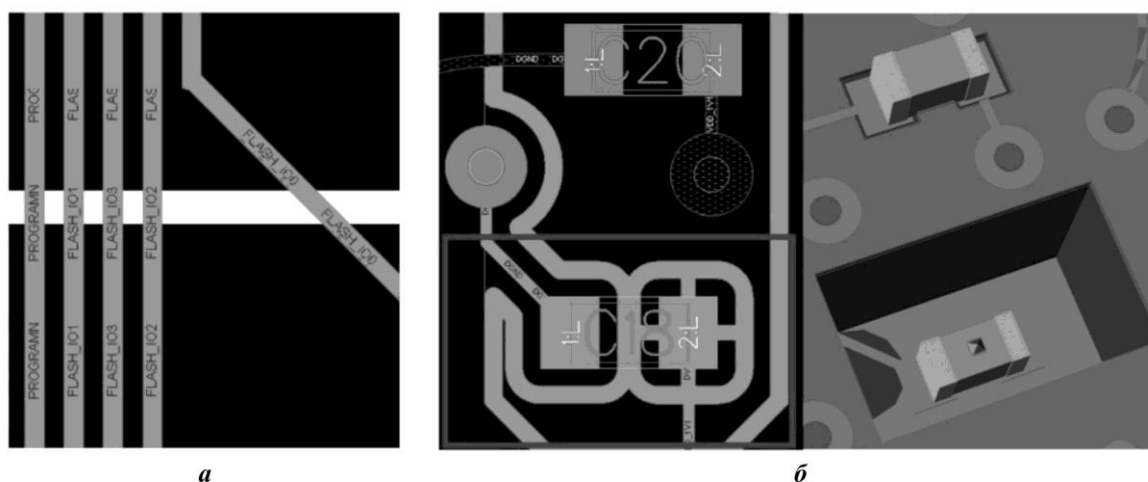


Рис. 4. Смещение дорожек при входе в рабочую область микросборки с торцевой коммутацией при задании торцевых контактов как дорожек коммутации (а) и размещение компонентов на внутренних уровнях сборки с помощью инструмента «полость» (б)

Fig. 4. Displacement of traces when entering the working area of the microassembly if the end contacts are defined as commutation traces (a) and problem solution of component placement on internal levels of the assembly – the “cavity” tool (b)

Следует отметить, что смещения могут возникать неумышленно. Например, если формировать торцевые выводы из незафиксированных трасс, то велика вероятность того, что при внесении изменений в топологию рабочей части трассы в пограничной области (между рабочей и тестовой частями) изменят свое положение. Следовательно, в проекте торцевые выводы на границе внешней и внутренней областей подложки должны представлять собой либо полностью зафиксированные трассы (что затрудняет изменение положения торцевых контактов), либо полигоны (в этом случае подключение к такому полигону может отображаться неадекватно), либо посадочные места условных компонентов.

Компоненты микросборок с торцевой коммутацией необходимо располагать на внутренних слоях изделия, а не на лицевой или оборотной стороне, как в стандартных печатных платах. Для этого у некоторых современных САПР есть инструмент «полость» (cavity) для создания встроенных в печатные платы компонентов. Он имеется, например, в САПР Xpedition Enterprise (рис. 4, б), PADS Professional и в системе Altium Designer. Полости позволяют размещать компоненты на любых внутренних слоях, а если у САПР есть система проверки правил проектирования в 3D, то в автома-

тическом режиме проверяется, можно ли без пересечений с вышележащими слоями поместить компонент в полость при заданной конструкции стека и высоте компонента.

В САПР отсутствуют специализированные инструменты описания торцевых дорожек. В САПР Xpedition и PADS пересечение любого элемента коммутации, например переходного отверстия с контуром платы, определяется системой онлайн-проверки правил проектирования как ошибка и автоматически предотвращается программой. Выполнить подобную операцию можно лишь при отключении онлайн-проверки или заданием особого разрешения для подобных элементов, но и в этом случае элемент останется отверстием, а не станет торцевым полуотверстием или торцевой дорожкой. Однако, даже если описание торцевых дорожек было бы предусмотрено САПР, оно бы не функционировало, поскольку торцевые выводы формируются после отделения тестовой части, а в проекте САПР сборка представлена в том виде, в каком она находится до отделения тестового поля – отсутствуют торцевые дорожки и соединения между уровнями.

Решением проблемы описания торцевых дорожек может быть формирование второго представления сборки уже с отделенным технологическим полем и сформированной коммутацией. Но это требует создания отдельного проекта, который не будет связан с основным. Можно также экспортировать трехмерную модель микросборки со всей топологией, компонентами и торцевыми выводами из проекта с тестовой частью в САПР трехмерного твердотельного моделирования, где вручную удалить тестовую часть и создать дорожки требуемой конфигурации. Полученная модель будет пригодна для экспорта в САПР инженерных расчетов, но не будет иметь полноценной связи с исходником (единственным вариантом реализации связи будет использование IDF-, IDX-форматов).

Возникает трудность при отображении вертикальной коммутации и в исходном проекте микросборки с тестовой частью, так как, хотя в реальности до отделения тестовой части вертикальных связей еще нет, они должны быть реализованы в САПР для проверки полноты трассировки. В противном случае велика вероятность ошибок – сохранившиеся до этапа подготовки к производству неоттрассированные цепи, нарушение правил по длине проводников и дифференциальным парам и т. д. Для условного отображения вертикальных дорожек используются переходные сквозные отверстия от каждого торцевого контакта (рис. 5, а). Это позволяет передавать не только вертикальную коммутацию в виде прямолинейных параллельных проводников, но и коммутацию в виде полноценной непрямолинейной торцевой топологии за счет использования системы глухих и скрытых отверстий между определенными уровнями.

Отметим, что переходные отверстия не являются частью торцевых площадок. Они могут смещаться вместе с ведущими к ним дорожками. Кроме того, связанные с ними контактные площадки или дорожки необходимо двигать отдельно в каждом уровне. Поэтому, если вертикальная коммутация представляет собой параллельные друг другу дорожки, идущие по торцам сборки, оптимальным вариантом может быть использование для отображения этих дорожек условных компонентов в виде прямоугольных площадок со сквозным отверстием под традиционный монтаж на конце (рис. 5, б). Такие условные компоненты при их размещении в топологическом редакторе формируют площадки сразу на всех слоях сборки. При перемещении таких компонентов площадки передвигаются вместе с ними на всех слоях одновременно. Если для отображения используются торцевые контакты площадок поверхностного монтажа, установленные в полости, то для передвижения каждой площадки необходимо открывать полость и двигать площадки на каждом уровне по отдельности.

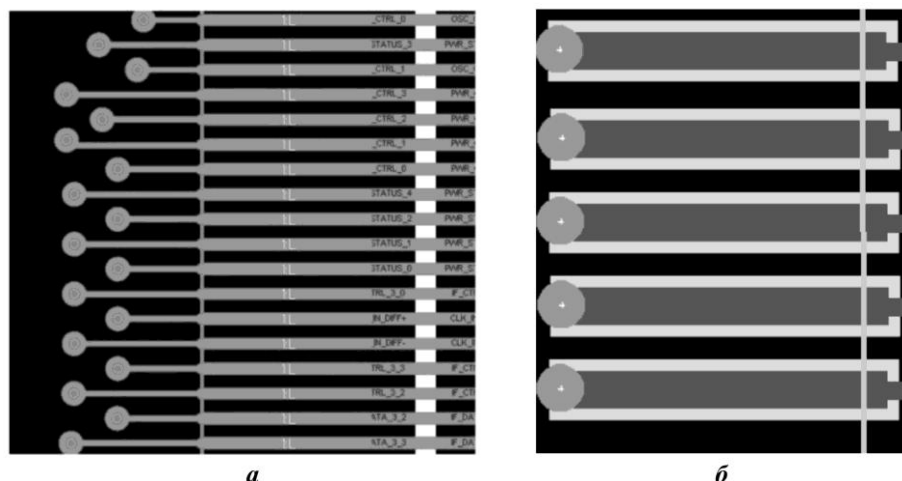


Рис. 5. Изображения вертикальной торцевой коммутации в проекте САПР: *a* – вертикальные дорожки в виде переходных отверстий; *б* – компонент с площадкой особой формы (прямоугольник с отверстием на конце)

Fig. 5. Images of vertical side commutation in ECAD project: *a* – vertical traces are represented as vias, *b* – side commutation is represented by a component with a platform of a special shape (rectangle with a hole at the end)

### Особенности технологии изготовления микросборок с торцевой коммутацией.

Процесс изготовления рассматриваемых вариантов микросборок с торцевой коммутацией включает в себя следующее:

- 1) изготовленные платы уровней устанавливаются друг над другом на штифты и объединяются посредством герметизирующего компаунда в монолитную структуру, формируя заготовку будущей микросборки;
- 2) после герметизации от заготовки отделяется тестовая часть;
- 3) полученная структура обрабатывается по торцам для вскрытия торцевых контактов;
- 4) заготовка направляется на металлизацию и формирование рисунка межсоединений.

Данный процесс по порядку и составу базовых операций аналогичен процессам изготовления известных микросборок с торцевой коммутацией, которые применяют фирмы 3D PLUS (Франция, США) и Irvine Sensors (США) [12]. Важное значение имеют способ реализации операций и используемые в них материалы. В этом рассматриваемая технология значительно отличается от технологии, предлагаемой фирмами 3D PLUS и Irvine Sensors.

При разработке технологии изготовления микросборок с торцевой коммутацией возникают следующие проблемы.

В стандартных технологиях корпусирования для герметизации двумерных структур чаще всего применяется термоопрессовка в двух вариантах – трансферная и компрессионная. Оба варианта требуют использования специализированных установок (mold chase) и материалов – эпоксидных монолитизирующих компаундов (Epoxy Mold Compound's, EMC). Последние при нормальных условиях обычно имеют условно-твердую форму (порошки, цилиндры, листы) и переходят в вязкотекучее состояние только при нагреве в процессе опрессовки. Однако в случае трехмерных микросборок применение термоопрессовки сопряжено с рядом сложностей. Во-первых, термоопрессовка не предназначена для герметизации трехмерных структур большой высоты, в которых компаунд должен пройти процесс отверждения в значительном замкнутом объеме внутри микросборки. Во-вторых, термоопрессовка является частью технологии корпусирования кристаллов на уровне пластины (Wafer Level Packaging, WLP), тогда

как платы уровней в микросборках с торцевой коммутацией изготавливаются с помощью технологического процесса печатных плат, т. е. необходимо сочетать операции и оборудование двух различных технологических уровней. Это ведет к усложнению и удорожанию технологического процесса, так как требуется дополнительное дорогостоящее оборудование – установки mold chase и системы скрайбирования после герметизации. Кроме того, в процессах разных уровней, как правило, применяются заготовки разной формы и размера, например пластины при корпусировании и прямоугольные заготовки в случае печатных плат.

В оригинальных технологиях проблема решается с помощью особых жидких компаундов для герметизации электронных средств, например HYSOL FP4450 в технологиях от 3D PLUS [14]. Однако в рамках работы решено применять собственные компаунды на основе термостойких эпоксидных смол. Основные их преимущества – меньшая стоимость, а также возможность получения на основе одной смолы композиций с разными свойствами за счет введения различных наполнителей и добавок (что целесообразно при использовании в рамках одной микросборки компаундов с разными свойствами [15, 16]). Также ввиду известной формулы смолы и отвердителя поведение композиции при введении наполнителей более предсказуемо, чем в случае модификации иностранных аналогов.

Микросборки с торцевой коммутацией не предусматривают наличия на уровнях припойных бампов в отличие от микросборок корпус на корпусе и других структур, где применяется монтаж на шариковые выводы. Поэтому самосовмещения уровней по осям  $X$  и  $Y$  не происходит. Следовательно, необходимо вносить в изделие дополнительные совместительные элементы. Сведения о способах решения этой проблемы в оригинальных технологиях Irvine Sensors и 3D PLUS отсутствуют.

Тестовая часть в микросборках с торцевой коммутацией служит для электрического тестирования уровней и для расположения в ней технологических элементов. Именно в тестовую часть ведут дорожки, которые в дальнейшем станут торцевыми контактами. Для этого тестовую часть необходимо отделить от микросборки, что проблематично, так как высота микросборки значительно больше, чем высота одиночной печатной платы или корпуса, и по торцу трехмерной структуры располагается область высоконаполненного компаунда, содержащая до 70 % и более абразивного материала в виде мелкодисперсного оксида кремния.

Первый способ решения данной проблемы – отделение тестовой части вместе со всеми вспомогательными элементами от рабочей после герметизации методом скрайбирования. Данный способ максимально прост, однако существует высокая вероятность повреждения приграничных областей по торцам сборки, быстрого износа инструмента, также необходима установка скрайбирования достаточной мощности и использование одноразовых прокладок. Второй способ – предварительное формирование сквозного фрезерованного контура вокруг рабочей области на каждом уровне с помощью стандартной установки фрезеровки, применяемой в технологии печатных плат (рабочая часть остается закрепленной на перемычках). На следующем этапе уровни с фрезерованными контурами герметизируются, а затем происходит отделение тестовой части каждого из уровней путем разрушения перемычек (вырубкой, фрезеровкой или лазерным скрайбированием). Преимущество данного способа – возможность использования многоразовых межуровневых прокладок, а также меньшая нагрузка на оборудование по сравнению с механическим скрайбированием сквозь все уровни и небольшие повреждения в ходе отделения тестовой части. Недостатки – сложности с автоматизацией процесса выламывания, возможность повреждения дорожек при фрезеровке,

а также необходимость в более длительной шлифовке граней для вскрытия торцевых контактов после герметизации.

Слой металлизации поверхности микросборок с торцевыми соединениями должен быть достаточно толстым для обеспечения электрического контакта уровней; металл должен быть пластичным, чтобы перенести деформацию микросборки из-за разницы температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) между компаундом и уровнями; металлизация должна характеризоваться достаточной адгезией к гладкой поверхности компаунда (поверхность должна быть максимально гладкой для получения малых топологических норм). В оригинальных технологиях торцевой коммутации, применяемых Irvine Sensors и 3D PLUS, проблема решается за счет вакуумно-плазменных процессов металлизации поверхности микросборки с последующим гальваническим доразвиванием [8, 9, 12]. Вакуумные процессы распыления позволяют получать высокую адгезию металла к диэлектрикам, но при этом они дорогостоящие и, как и в случае с термопрессовкой компаундом, не являются частью процесса производства печатных плат. Кроме того, для нанесения металла на неплоскостную поверхность вакуумные процессы необходимо проводить в специализированной оснастке, которая поворачивает заготовку в процессе распыления, либо требуется проведение операции распыления для каждой грани изделия в отдельности.

Помимо наращивания металла на торцевых гранях микросборок также необходимо сформировать рисунок межсоединений. Однако после металлизации грани покрыты металлом, и совместительные элементы на них отсутствуют. В результате совмещение топологии торцевых элементов и выходящих на торец контактов уровней затруднено. Решение этой задачи в оригинальных технологиях, разработанных 3D PLUS и Irvine Sensors, не приводится. Вероятнее всего, позиционирование происходит по границам сборки или каким-то неуказанным совместительным элементам на гранях. В процессе

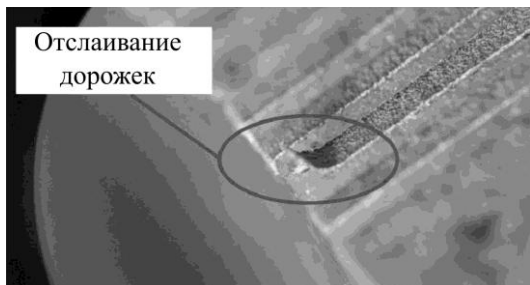


Рис. 6. Отслаивание дорожек при обработке лазером по контуру

Fig. 6. Track flaking during contour laser processing

формирования топологии из-за химических процессов или перегрева происходит отслаивание торцевых дорожек. В оригинальных технологических процессах для формирования торцевой коммутации используется лазерная абляция металла до диэлектрика по контуру дорожек. Но лазер может сильно нагреть материал сборки и вызвать локальный температурный удар. В результате коммутация со слишком малыми топологическими нормами сразу после изготовления может отслоиться от диэлектрика из-за разницы теплового расширения с компаундом (рис. 6).

**Эксперимент.** Обработку процессов изготовления микросборки с учетом рассмотренных проблем проводили для тестового варианта изделия. Особое внимание уделено процессам сборки, последующей герметизации уровней и формированию на их торцевых поверхностях металлизации с получением рисунка коммутации. Адгезия сформированной коммутации на отрыв при этом должна быть не менее  $1,6 \text{ Н/мм}^2$  (согласно ГОСТ Р МЭК 61249-2-7).

Для сборки уровней использовали оснастку, состоящую из стальных штырей и многогранной подложки основания из стеклопластика с четырьмя отверстиями, в которые вставлены штыри. Для разделения уровней и задания межуровневого пространства использовали прокладки из силикона на платиновом катализаторе с высокой твердо-

стью по Шорру (40 ед.) и высокой термостойкостью (до 250 °С) с низкой адгезией к компаунду. При этом они легко отделялись от сборки после заливки и отверждения материала герметизации. Также прокладки выдерживали температуру отверждения компаунда 170–180 °С на протяжении нескольких часов.

Сборку уровней в оснастку (рис. 7) выполняли в следующем порядке. В основание сборочной оснастки помещали базовые штыри и разделительный сплошной слой силикона, чтобы компаунд не прилип к многоразовому основанию. На штыри надевали плату первого уровня микросборки и на нее помещали разделительную прокладку толщиной 3–5 мм с полостью 20 × 20 мм. Далее в полость помещали компаунд, уровень с компаундом закрывали следующей платой.

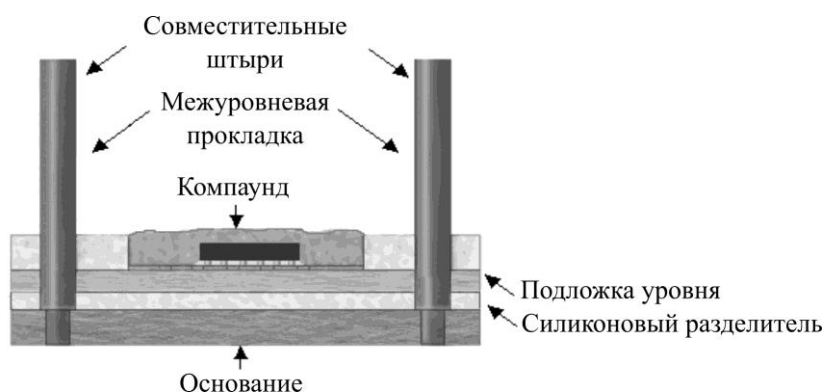


Рис. 7. Оснастка для сборки уровней микросборки после установки в нее первого уровня

Fig. 7. Fixture for assembling the microassembly levels after installing the first level

Отверждение композиции происходило в термощкафу под прижимом. Поскольку в качестве матрицы герметизирующего компаунда использовали термостойкие смолы (эпоксифосфазеновые и фенол-новолачные), температуру при их отверждении повышали в пределах 120–180 °С в течение 6 ч (на 20 °С каждый час). После отверждения компаунда сборку извлекали из оснастки послойно. Сначала снимали базовые штыри, затем отделяли тестовую часть верхнего уровня, закрепленную на перемычках. Далее снимали первую силиконовую прокладку, и процесс разбора повторяли для следующего уровня.

В процессе герметизации с указанной оснасткой отмечено несколько основных дефектов: небольшое смещение уровней по осям  $X$  и  $Y$ , связанное, вероятно, с недостаточно ровной установкой стальных базовых штырей при заливке, а также со слишком высокой пластичностью силиконовых прокладок; пористость компаунда, из-за которой торцевые поверхности получались неоднородными (поры препятствовали формированию коммутации, и в них не осаждалась металлизация) (рис. 8, а). Одна из возможных причин пористости – силиконовые прокладки, которые задерживают в себе воздух и имеют малую теплопроводность, что препятствует равномерному нагреву изделия при отверждении. Исследование процесса сборки уровней с использованием стальных прокладок (по примеру пресс-форм для герметизации корпусов) также не дало результатов. Прокладки не прилипали к эпоксидному компаунду ввиду малой шероховатости полированных поверхностей, но и не отделялись от сборки, поскольку не имеют достаточной пластичности. Однако при использовании стальной оснастки удалось получить полностью свободные от пор слои герметизации. В результате силиконовые и стальные прокладки были заменены на гибридные со стойками из стеклотекстолита заданной

толщины с обрамлением из пластичного термостойкого силикона, предварительно прошедшего дегазацию. Полученный после применения гибридных прокладок образец представлен на рис. 8, б.

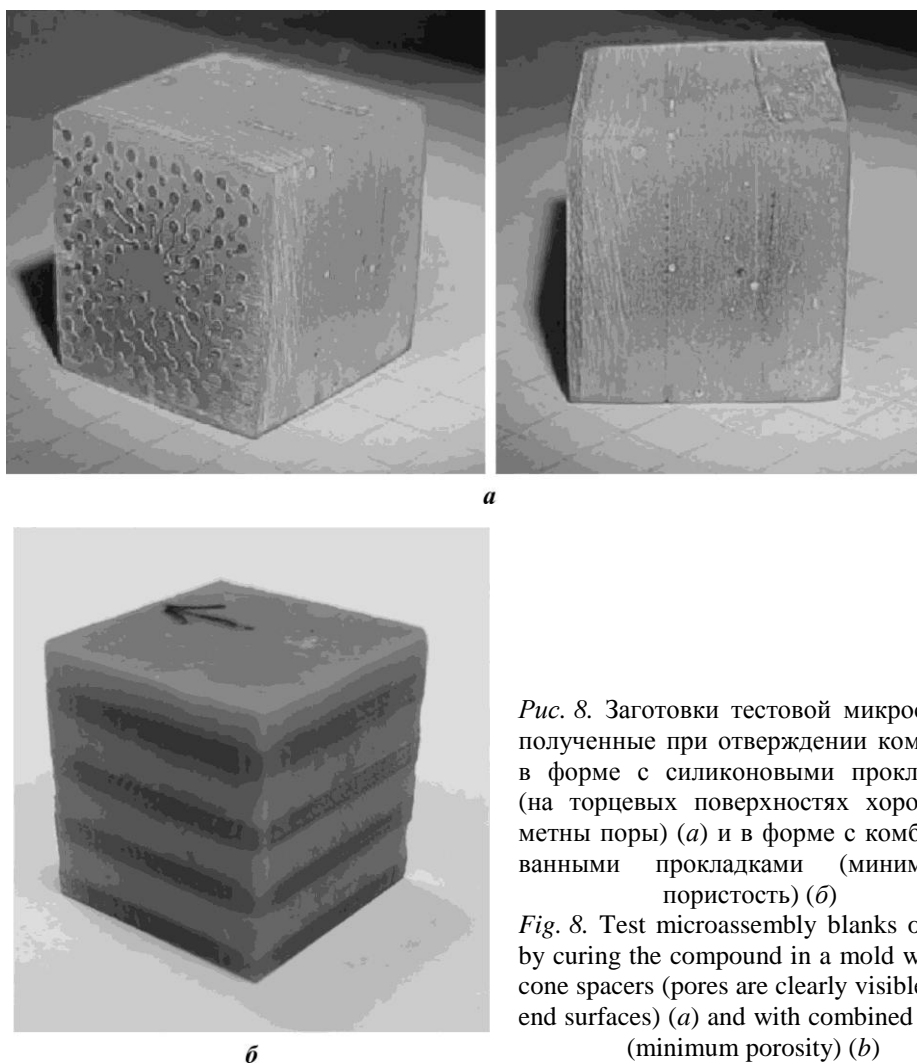


Рис. 8. Заготовки тестовой микросборки, полученные при отверждении компаунда в форме с силиконовыми прокладками (на торцевых поверхностях хорошо заметны поры) (а) и в форме с комбинированными прокладками (минимальная пористость) (б)

Fig. 8. Test microassembly blanks obtained by curing the compound in a mold with silicone spacers (pores are clearly visible on the end surfaces) (a) and with combined spacers (minimum porosity) (b)

В качестве компаундов для герметизации исследовали композиции из смол на основе тетраглицидилового эфира диаминодифенилметана, модифицированного фосфазеном бисфенола-А (компаунд 1) и фосфазеном бисфенола-F (компаунд 2). Отвердителями для данных смол служили 4,4-диаминодифенилсульфон, диэтилтолуолдиамин, изо-МТГФА, а также аминный отвердитель ХТ-488. В качестве наполнителей использовали оксид кремния фракции порядка 5–10 мкм, а также кубический нитрид бора (CBN), алмаз, карбонитрид титана, гексагональный нитрид бора. Наилучшую адгезию к меди и стеклопластику показали композиции 4,4-диаминодифенилсульфона и смолы на основе тетраглицидилового эфира, 4,4-диаминодифенилсульфона и модифицированного фосфазеном бисфенола А, а также на основе отвердителя ХТ-488 с тетраглицидиловым эфиром (во всех композициях в качестве наполнителя использовали оксид кремния). Последняя комбинация более пористая и в то же время имеет большую усадку. Композиции на основе модифицированного фосфазеном бисфенола-F также характеризуются высокой пористостью, хотя и имеют наименьший ТКЛР (рис. 9). Переход на графике для нитрида бора вызван, очевидно, неполным отверждением смолы.



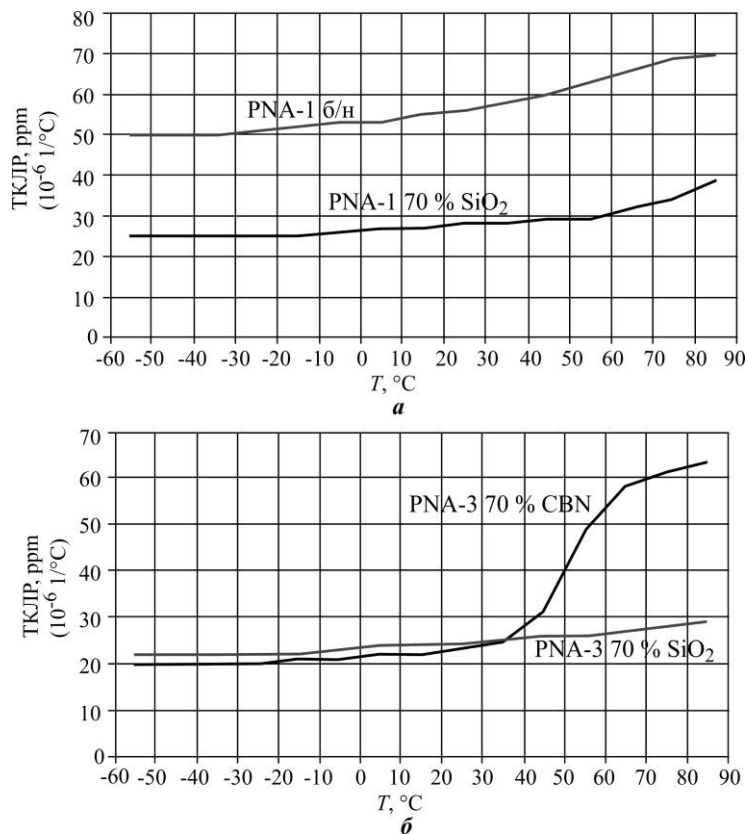


Рис. 9. Зависимости ТКЛР компаундов на основе модифицированных фосфазеном эпоксидных смол марки PNA от температуры для ненаполненной смолы и смол с оксидом кремния и кубическим нитридом бора: *a* – компаунд 1; *б* – компаунд 2  
 Fig. 9. Dependences graphs of the coefficient of thermal expansion of compounds based on phosphazene-modified epoxy resins “PNA” on temperature for unfilled resin and resins with silicon oxide and cubic boron nitride (CBN): *a* – compound 1; *b* – compound 2 (the transition in the graph for boron nitride is most likely caused by incomplete curing of resin)

В результате для дальнейших исследований металлизации выбраны две комбинации смолы и отвердителя: 4,4-диаминодифенилсульфон и модифицированная фосфазеном смола на основе бисфенола А; 4,4-диаминодифенилсульфон и смола на основе тетраглицидилового эфира.

Для создания металлизации образцов исследовали различные растворы активирования и медной металлизации. Наилучший результат показало сочетание ванн активирования от прямой металлизации с предварительной в растворе на основе 3-глицидоксипропилтриметоксисилана и последующим медленным химическим наращиванием затравочного слоя меди. После формирования затравочного слоя микросборка проходила электрохимическую металлизацию. Сформированную медь далее селективно удаляли с помощью лазерной абляции на микросекундном оборудовании лазерной микрообработки. Формирование коммутации проводили по торцам тестовых отливок из указанных материалов, имитирующих микросборки (размеры дорожки и зазора от 500 до 30 мкм). Отливки содержат различные наполнители, в том числе гексагональный и кубический нитрид бора, карбонитрид титана (рис. 10).

Два образца с наполнителями из оксида кремния и алмаза перед активацией поверхности обрабатывали в растворе на основе эпоксисилана (рис. 11). Как видно из рисунков, особенно на примере образца, наполненного алмазом, раствор на основе эпоксисилана значительно увеличивает адгезию коммутации к поверхности эпоксидного герметизирующего компаунда.

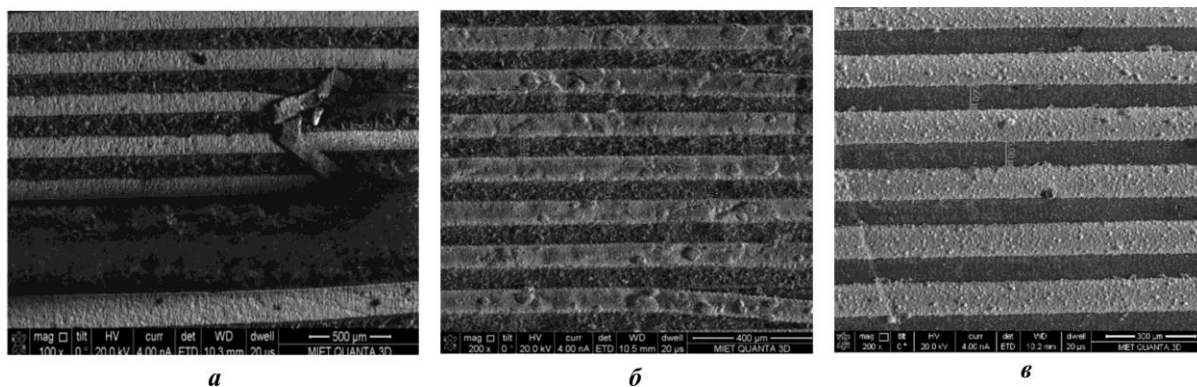


Рис. 10. РЭМ-изображения образцов со сформированной методом лазерной обработки медной коммутацией на тестовых отливках из смолы тетраглицидилового эфира, отвержденной 4,4-диаминодифенилсульфоном с наполнителями в виде: 50 % гексагонального нитрида бора (а); 60 % карбонитрида титана (б); 60 % кубического нитрида бора (в)

Fig. 10. SEM images of samples with laser-formed copper commutation on test castings from tetraglycidic acid ester resin cured with 4,4 diaminodiphenylsulfone with fillers in the form of 50 % hexagonal boron nitride (a); 60 % titanium carbonitride (b); 60 % cubic boron nitride (c)

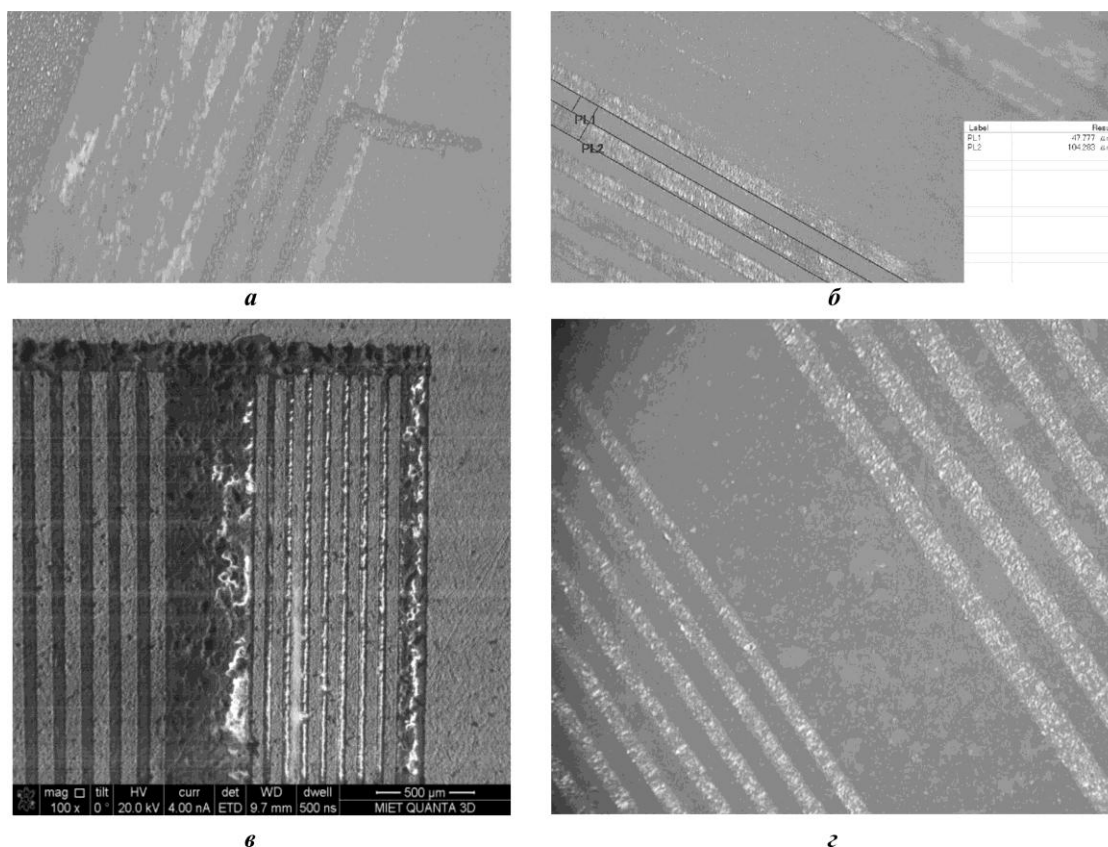


Рис. 11. Снимки образцов со сформированной методом лазерной обработки медной коммутацией на тестовых отливках из смолы тетраглицидилового эфира, отвержденной 4,4-диаминодифенилсульфоном с наполнителями в виде: 60 % алмаза без обработки в растворе эпoxисилана перед меднением (а); 60 % алмаза с обработкой в растворе на основе эпoxисилана (б); 60 % оксида кремния (в – снимок РЭМ; г – снимок оптического микроскопа)

Fig. 11. Snapshots of samples formed by laser-treated copper commutations on test castings of tetraglycidic ether resin cured with 4,4 diaminodiphenylsulfone with fillers in the form of 60 % diamond without treatment in epoxysilane solution before copper plating (a); 60 % diamond with treatment in epoxysilane-based solution (b); 60 % silicon oxide (c – SEM image; d – optical microscope image)

**Заключение.** Результаты проектирования трехмерной микросистемы с габаритными размерами  $20 \times 20 \times 20$  мм, четырьмя функциональными уровнями на основе бескорпусных микросхем и высокоинтегрированных подложек, соединяющихся между собой с помощью вертикальной торцевой коммутации с топологическими нормами до 50 мкм, выявили следующие особенности:

– все функциональные уровни микросборки должны располагаться в едином проекте САПР для точного совмещения подложек, элементов торцевой коммутации и во избежание ошибок при соединении цепей;

– торцевые элементы коммутации должны подходить к границе внутреннего пространства микросборки строго перпендикулярно, без смещения;

– элементы и компоненты должны располагаться во внутренних слоях, в полостях уровней микросборки;

– тестовая и технологическая части уровней микросборки должны быть включены в проект САПР;

– для обеспечения корректных результатов проверки полноты трассировки следует применять условные изображения торцевых контактов в виде переходных отверстий или специализированных условных компонентов.

Экспериментальные исследования по герметизации уровней трехмерной микросборки с помощью высоконаполненных композитов показали, что наилучшие результаты по теплопроводности, наименьшему ТКЛР, однородности и адгезии медной металлизации получены при использовании двух компаундов: на основе 4,4-диаминодифенилсульфона и модифицированной фосфазеном смолы на основе бисфенола А и 70%-ного наполнителя из оксида кремния; 4,4-диаминодифенилсульфона и смолы на основе тетраглицидилового эфира и 70%-ного наполнителя из оксида кремния.

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

### *Литература*

1. *Pereira G., Chitoraga S., Kumar S., Yik Yee Tan.* Advanced packaging quarterly market monitor Q1 2022: Market and technology product brochure // Yole Group [Электронный ресурс]. 2022. URL: <https://medias.yolegroup.com/uploads/2021/12/Advanced-Packaging-Quarterly-Market-Monitor-Q1-2022-Product-brochure-.pdf> (дата обращения: 24.05.2023).

2. *Chitoraga S., Yeghoyan T., Shoo F.* High-end performance packaging 2022 – focus 2.5D/3D integration: Market and technology report product brochure // Yole Développement [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://s3.i-micronews.com/uploads/2022/03/High-End-Performance-Packaging-2022-Product-Brochure.pdf> (дата обращения: 24.05.2023).

3. *Tseng C.-F., Liu C.-S., Wu C.-H., Yu D.* InFO (wafer level integrated fan-out) technology // 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Las Vegas, NV: IEEE, 2016. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2016.65>

4. Package-on-package (PoP) warpage characteristic and requirement / *W. K. Loh, R. Kulterman, T. Purdie et al.* // 2015 IEEE 17th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). Singapore: IEEE, 2015. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EPTC.2015.7412314>

5. *Yoon S. W.* Ultrathin 3D FO-WLP eWLB-PoP (embedded wafer-level ball grid array-package-on-package) technology // Advances in Embedded and Fan-Out Wafer-Level Packaging Technologies / eds B. Keser, S. Kroehnert. Hoboken, NJ: Wiley, 2019. P. 77–95. <https://doi.org/10.1002/9781119313991.ch4>

6. *Lapedus M.* Embedded die packaging emerges // Semiconductor Engineering [Электронный ресурс]. 09.04.2018. URL: <https://semiengineering.com/embedded-die-packaging-emerges/> (дата обращения: 24.05.2023).

7. *Huesgen T.* Printed circuit board embedded power semiconductors: A technology review // Power Electronic Devices and Components. 2022. Vol. 3. Art. No. 100017. <https://doi.org/10.1016/j.pedc.2022.100017>
8. *Plante J., Shaw H.* Evaluation of 3D Plus packaging test structures for NASA Goddard Space Flight Center // Proceedings of the European Space Components Conference, ESCCON 2002 (24–27 September 2002, Toulouse, France). Noordwijk: ESA Publ. Div., 2002. P. 213.
9. The European 3D technology platform (e-CUBES) / *P. Ramm, A. Klumpp, J. Weber et al.* // Future Fab International. 2010. Vol. 34. P. 103–116.
10. *Rey J. C.* Design to manufacturing considerations in 3D IC design // Electronic Design Process Symposium Archive for 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ieee-edps.com/archives/2017/c/1200rey.pdf> (дата обращения: 24.05.2023).
11. *Li S. (Li Yang).* SiP system-in-package design and simulation: Mentor EE flow advanced design guide. Hoboken, NJ: Wiley, 2017. 400 p.
12. *Strickland M., Johnson R. W., Gerke D.* 3-D packaging: A technology review // NASA Technical Reports Server [Электронный ресурс]. 2005. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050215652> (дата обращения: 24.05.2023).
13. Исследование влияния механических и температурных воздействий на уровень напряжений и деформаций в герметизированных двумя типами компаундов трехмерных микросборках / *Д. В. Вертянов, И. А. Беляков, А. В. Погудкин и др.* // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 1. С. 28–40. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-28-40>
14. Проектирование корпусов и микросборок по технологии FO WLP средствами САПР Mentor Graphics. Часть 1 / *Дж. Фергусон, Д. Вертянов, К. Фелтон и др.* // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2021. № 4 (205). С. 56–65. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2021.205.4.56.64>
15. Effects of multilayer structures made of epoxy compounds with different filler contents on thermo-mechanical stresses in 3D packages / *D. V. Vertyanov, S. P. Timoshenkov, V. N. Sidorenko et al.* // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2021. P. 2495–2500. <https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396288>

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 11.04.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

#### **Информация об авторах**

**Беляков Игорь Андреевич** – научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории передовых технологий корпусирования и производства 3D микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [igor-terra@yandex.ru](mailto:igor-terra@yandex.ru)

**Вертянов Денис Васильевич** – кандидат технических наук, начальник Научно-исследовательской лаборатории передовых технологий корпусирования и производства 3D микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [vdv.ertyanov@gmail.com](mailto:vdv.ertyanov@gmail.com)

**Кочергин Михаил Дмитриевич** – инженер-конструктор Научно-исследовательской лаборатории передовых технологий корпусирования и производства 3D микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [misha.kochergin1999@yandex.ru](mailto:misha.kochergin1999@yandex.ru)

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

## References

1. Pereira G., Chitoraga S., Kumar S., Yik Yee Tan. Advanced packaging quarterly market monitor Q1 2022: Market and technology product brochure. *Yole Group*. 2022. Available at: <https://medias.yolegroup.com/uploads/2021/12/Advanced-Packaging-Quarterly-Market-Monitor-Q1-2022-Product-brochure-.pdf> (accessed: 24.05.2023).
2. Chitoraga S., Yeghoyan T., Shoo F. High-end performance packaging 2022 – focus 2.5D/3D integration: Market and technology report product brochure. *Yole Développement*. 2021. Available at: <https://s3.i-micronews.com/uploads/2022/03/High-End-Performance-Packaging-2022-Product-Brochure.pdf> (accessed: 24.05.2023).
3. Tseng C.-F., Liu C.-S., Wu C.-H., Yu D. InFO (wafer level integrated fan-out) technology. *2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. Las Vegas, NV, IEEE, 2016, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2016.65>
4. Loh W. K., Kulterman R., Purdie T., Fu H., Tsuriya M. Package-on-package (PoP) warpage characteristic and requirement. *2015 IEEE 17th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*. Singapore, IEEE, 2015, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EPTC.2015.7412314>
5. Yoon S. W. Ultrathin 3D FO-WLP eWLB-PoP (embedded wafer-level ball grid array-package-on-package) technology. *Advances in Embedded and Fan-Out Wafer-Level Packaging Technologies*, eds B. Keser, S. Kroehnert. Hoboken, NJ, Wiley, 2019, pp. 77–95. <https://doi.org/10.1002/9781119313991.ch4>
6. Lapedus M. Embedded die packaging emerges. *Semiconductor Engineering*. 09.04.2018. Available at: <https://semiengineering.com/embedded-die-packaging-emerges/> (accessed: 24.05.2023).
7. Huesgen T. Printed circuit board embedded power semiconductors: A technology review. *Power Electronic Devices and Components*, 2022, vol. 3, art. no. 100017. <https://doi.org/10.1016/j.pedc.2022.100017>
8. Plante J., Shaw H. Evaluation of 3D Plus packaging test structures for NASA Goddard Space Flight Center. *Proceedings of the European Space Components Conference, ESCCON 2002 (24–27 September 2002, Toulouse, France)*. Noordwijk, ESA Publ. Div., 2002, p. 213.
9. Ramm P., Klumpp A., Weber J., Taklo M., De Raedt W., Fritzsche T., Hilt T., Couderc P. et al. The European 3D technology platform (e-CUBES). *Future Fab International*, 2010, vol. 34, pp. 103–116.
10. Rey J. C. Design to manufacturing considerations in 3D IC design. *Electronic Design Process Symposium Archive for 2017*. Available at: <https://www.ieee-edps.com/archives/2017/c/1200rey.pdf> (accessed: 24.05.2023).
11. Li S. (Li Yang). *SiP system-in-package design and simulation: Mentor EE flow advanced design guide*. Hoboken, NJ, Wiley, 2017. 400 p.
12. Strickland M., Johnson R. W., Gerke D. 3-D packaging: A technology review. *NASA Technical Reports Server*. 2005. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050215652> (accessed: 24.05.2023).
13. Vertyanov D. V., Belyakov I. A., Pogudkin A. V., Timoshenkov S. P., Sidorenko V. N. Investigation of the influence of mechanical and thermal effects on the level of stresses and deformations in three-dimensional microassemblies sealed with two types of compounds. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 1, pp. 28–40. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-1-28-40>
14. Ferguson J., Vertyanov D., Felton K., Belyakov I., Evstafiev S., Sidorenko V., Gorshkova N. Designing FO WLP packages and micro-assemblies using Mentor Graphics CAD. Part 1. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: Science, Technology, Business*, 2021, no. 4 (205), pp. 56–65. (In Russian). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2021.205.4.56.64>
15. Vertyanov D. V., Timoshenkov S. P., Sidorenko V. N., Pogudkin A. V., Belyakov I. A. Effects of multilayer structures made of epoxy compounds with different filler contents on thermo-mechanical stresses in 3D packages. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICoN Rus)*. St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2021, pp. 2495–2500. <https://doi.org/10.1109/EICoN Rus51938.2021.9396288>

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 11.04.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

## Information about the authors

**Igor A. Belyakov** – Science Assistant of the Research Laboratory of Advanced Technologies for the Packaging and Production of 3D Microsystems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [igor-terra@yandex.ru](mailto:igor-terra@yandex.ru)

**Denis V. Vertyanov** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory of Advanced Technologies for the Packaging and Production of 3D Microsystems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vdv.vertyanov@gmail.com

**Mikhail D. Kochergin** – Design Engineer of the Research Laboratory of Advanced Technologies for the Packaging and Production of 3D Microsystems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), misha.kochergin1999@yandex.ru

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

### **Вниманию читателей журнала**

#### **«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

##### **Подписку на печатную версию журнала можно оформить:**

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

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

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

## Применение инерциальных МЭМС в системе автоматической отцепки десантируемого груза

А. А. Галкин<sup>1,2</sup>, П. В. Еркин<sup>1,2</sup>, В. П. Захаров<sup>1,2</sup>, Н. А. Соломкина<sup>1,2</sup>,  
А. С. Тимошенко<sup>2</sup>, С. П. Тимошенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,

г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО «Лаборатория Микроприборов», г. Москва, Россия

at@mp-lab.ru

**Аннотация.** Десантирование грузов, как правило, происходит в условиях порывистого ветра. Во избежание опрокидывания или сноса груза от места посадки необходимо осуществлять его автоматическую отцепку. В работе рассмотрен процесс разработки конструкции устройства автоматической отцепки десантируемого груза, а также описаны принцип и алгоритм его работы. Алгоритм основан на мониторинге ориентации устройства в процессе десантирования. При достижении определенного угла наклона устройства происходит автоматическая отцепка десантируемого груза за счет размыкания кольцевого замкового устройства. Для определения углов наклона предложено применять инклинометр на базе трехосного акселерометра. Однако при существенных боковых ускорениях угол наклона, вычисляемый таким образом, значительно отличается от истинного. Для решения этой проблемы использован комплементарный фильтр, основанный на объединении данных акселерометра и датчика угловой скорости. Разработанное устройство предназначено для грузов массой до 200 кг и имеет массу около 1 кг, для обратной связи используются инерциальные МЭМС-датчики. Проведены комплексное тестирование, включающее в себя оценку точности определения угла наклона, оценку работы алгоритма устройства, а также летные испытания – десантирование изделия с грузом. Испытания подтвердили полную работоспособность устройства.

**Ключевые слова:** МЭМС, датчик угловой скорости, акселерометр, комплементарный фильтр, десантирование груза

**Для цитирования:** Применение инерциальных МЭМС в системе автоматической отцепки десантируемого груза / А. А. Галкин, П. В. Еркин, В. П. Захаров и др. // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 489–499. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-489-499>. – EDN: BQUFVF.

Original article

## Automatic payload system separation device based on inertial MEMS

A. A. Galkin<sup>1,2</sup>, P. V. Erkin<sup>1,2</sup>, V. P. Zaharov<sup>1,2</sup>, N. A. Solomkina<sup>1,2</sup>,  
A. S. Timoshenkov<sup>2</sup>, S. P. Timoshenkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research University of Electronic Technology, Moscow,  
Russia

<sup>2</sup>“Laboratory of Microdevices” LLC, Moscow, Russia

at@mp-lab.ru

**Abstract.** Airdrop missions occur most commonly under conditions of gusty wind. To avoid payload canting over or drifting away from landing site the automatic parachute release is necessary. In this work, the development is considered and operation principle and algorithm are described of the device for automatic payload system separation at load landing. The algorithm is based on the device inclination tracking during the airdrop. When a certain device inclination angle is reached, the payload is automatically separated using the 3-ring release system. It has been proposed to use a triaxial accelerometer based inclinometer for inclination angles determination. However, at the significant lateral accelerations the inclination angle calculated that way differs markedly from true angle. The complementary filter based on the accelerometer and angular rate sensor data combination was used to solve this problem. The developed device is designed for loads weighing up to 200 kg, has a mass of about 1 kg and uses inertial MEMS-sensors based feedback system. Complex testing was carried out including the evaluation of inclination angle accuracy determination and the device algorithm operation, as well as flight testing of device airdrop with payload. Tests have confirmed the full device performance.

**Keywords:** MEMS, angular rate sensor, accelerometer, complementary filter, payload airdrop

**For citation:** Galkin A. A., Erkin P. V., Zaharov V. P., Solomkina N. A., Timoshenkov A. S., Timoshenkov S. P. Automatic payload system separation device based on inertial MEMS. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 489–499. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-489-499>. – EDN: BQUFVF.

**Введение.** Большая часть областей применения инерциальных МЭМС-датчиков связана с определением ориентации объекта в пространстве [1–3]. Показания микромеханических акселерометров и датчиков угловой скорости используются в системах навигации, гиросtabilизации и инклинометрии для определения угловых и линейных перемещений [4].

Одним из типов устройств, где могут быть использованы данные об углах наклона, являются системы автоматической отцепки десантируемого груза. Как правило, десантирование происходит в условиях порывистого ветра, и для того чтобы избежать опрокидывания или сноса груза от места приземления, необходимо осуществлять автоотцепку.



**Разработка конструкции автоотцепки.** Устройства автоотцепки представляют собой механические, электромеханические или пиромеханические системы, обеспечивающие размыкание разъемного соединения парашюта и груза при посадке. Механические устройства такого назначения работают на двух основных принципах. Первый основан на уменьшении нагрузки на соединение груза и парашюта в момент посадки [5]. Во втором случае применяется механический индикатор наклона парашюта [6]. В устройствах автоотцепки с электронным управлением используются датчик наклона в качестве индикатора посадки и электропривод в качестве исполнительного звена. Схема такого устройства показана на рис. 1.

Прототипом разрабатываемого устройства автоотцепки стало изделие АО-200 (ООО «ПараАвис», г. Александров) (рис. 2). Масса устройства 4 кг, габариты 300 × 80 × 45 мм. Блок крепится к парашюту и грузу с помощью двух разъемных скоб. Время срабатывания устройства при приземлении 7 с.

Задача заключается в разработке устройства со сниженными массогабаритными показателями и увеличенным быстродействием. Поскольку вся нагрузка в процессе снижения приходится на корпус изделия, его конструкция выполнена из стали. Корпус устройства закреплен на нейлоновой ленте, в качестве механизма размыкания использовано кольцевое замковое устройство (КЗУ) (рис. 3). В этом случае нагрузка при снижении приходится на соединительную ленту и КЗУ и при натяжении ленты индикаторный шток выходит из гнезда и сигнализирует о раскрытии парашюта. При посадке и распознавании угла наклона более 45° устройство управления посылает на привод команду по вытягиванию тросика КЗУ.

Разработаны два варианта конструкции устройства автоотцепки (рис. 4): с блоком, в котором тросик приводится в движение линейным приводом, и с блоком, роль привода в котором выполняет микросоленоид с пружиной. Масса блока с линейным приводом 1,2 кг, габариты 235 × 80 × 45 мм, масса блока с соленоидом 152 г, габариты 105 × 60 × 23 мм. В обоих приводах используется идентичная ячейка управления с микроконтроллером и датчиком наклона. В качестве датчика наклона применяется инерциальный сенсор, включающий в себя трехосевой микромеханический акселерометр и трехосевой датчик угловой скорости [7].

При тестировании устройств установлено, что блок с микросоленоидом не обеспечивает достаточной надежности срабатывания. Конструкция с линейным приводом работает надежно, однако с целью снижения массогабаритных показателей решено использовать в качестве двигателя полнооборотный сервопривод, что позволяет снизить массу конструкции до 0,75 кг (рис. 5).

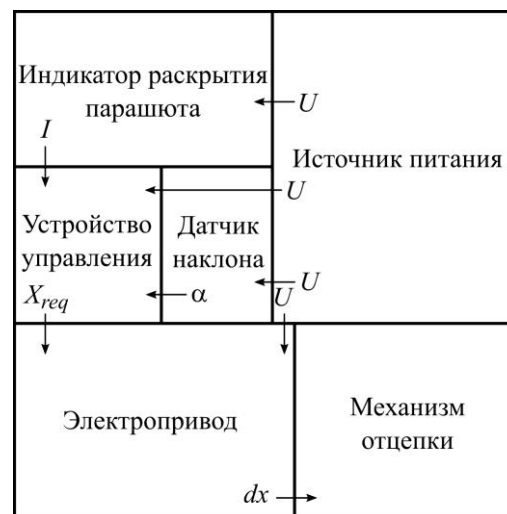


Рис. 1. Связи между блоками в общей схеме устройства автоотцепки с электронным управлением ( $U$  – напряжение питания;  $\alpha$  – угол наклона;  $I$  – сигнал раскрытия парашюта;  $X_{req}$  – управляющее воздействие на привод;  $dx$  – механическое перемещение)

Fig. 1. General scheme of an electronically controlled automatic uncoupler with connections between blocks ( $U$  – the supply voltage;  $\alpha$  – the angle of inclination;  $I$  – the parachute opening signal;  $X_{req}$  – the control action on the drive;  $dx$  – the mechanical movement)

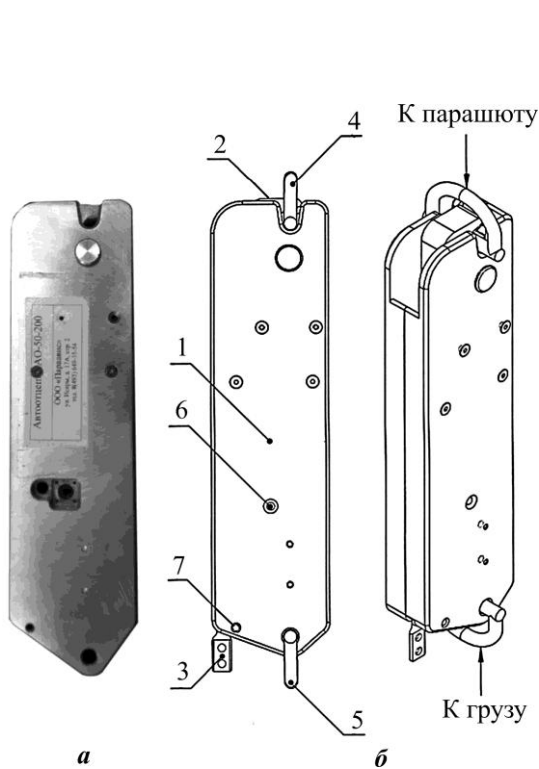


Рис. 2. Общий вид (а) и конструктивная схема (б) устройства автоотцепки АУ-200: 1 – корпус; 2 – захват; 3 – шток сигнала раскрытия парашюта; 4 – верхняя разъемная скоба; 5 – нижняя разъемная скоба; 6 – индикационный светодиод; 7 – контрольное отверстие

Fig. 2. General view (a) and structural drawing (b) of the AU-200 automatic uncoupler: 1 – body; 2 – grip; 3 – parachute opening signal rod; 4 – upper detachable bracket; 5 – bottom detachable bracket; 6 – indicator LED; 7 – locking hole

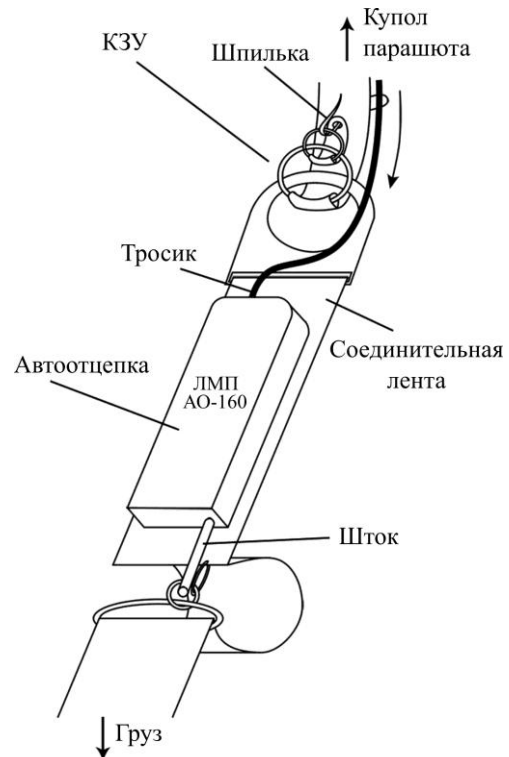


Рис. 3. Эскиз разработанной конструкции устройства автоотцепки  
Fig. 3. Sketch of the developed design of the automatic uncoupler

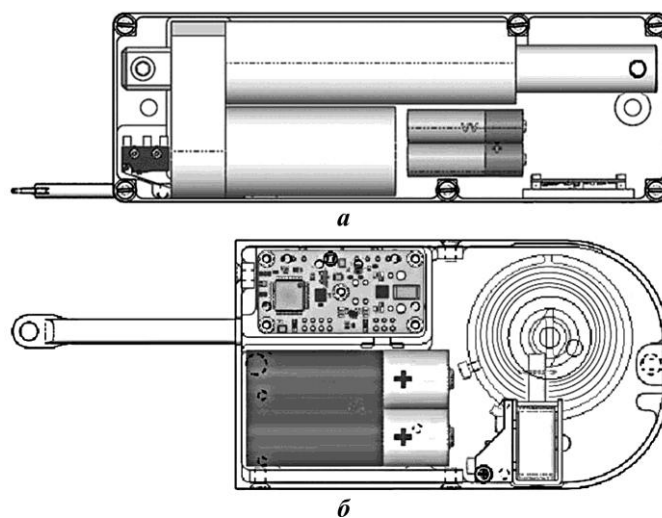


Рис. 4. Конструкции устройств автоотцепки с линейным приводом (а) и микросоленоидом (б)

Fig. 4. Automatic uncouplers designs with linear drive (a) and microsolenoid (b)



Рис. 5. Общий вид (а) и схема (б) разработанного устройства автоотцепки  
Fig. 5. General view (a) and scheme (b) of the final version of the automatic uncoupling

**Алгоритм работы устройства автоотцепки.** Общий алгоритм работы устройства автоотцепки следующий (рис. 6):

*Шаг 1.* При подаче питания система переходит в режим микропотребления (потребление 20 мкА).

*Шаг 2.* При установке штока индикатора раскрытия парашюта (перевод в режим готовности к сбросу) система проводит инициализацию и проверку всех компонентов. В это же время оператор может отрегулировать положение троса, управляющего разъемным соединением парашюта и груза.

*Шаг 3.* По завершении проверки и настройки устройство переходит в режим готовности (потребление 200 мкА). Сигналом к переходу в рабочий режим служит выход штока индикатора раскрытия парашюта из своего положения.

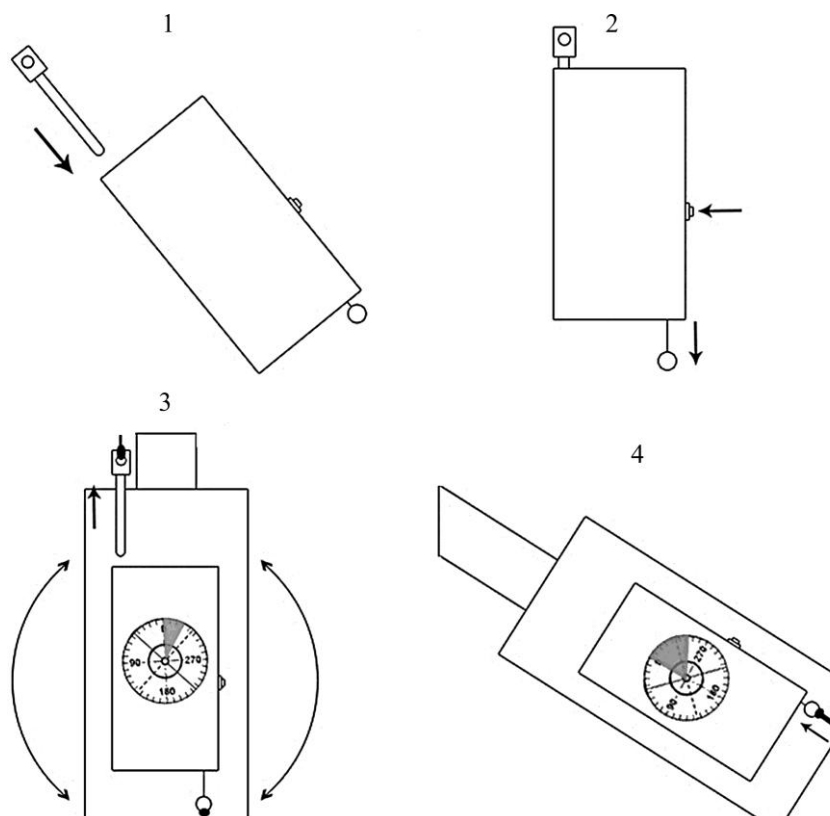


Рис. 6. Этапы (1–4) работы системы автоотцепки  
 Fig. 6. Stages (1–4) of operation of the automatic uncoupler

**Шаг 4.** В рабочем режиме устройство отслеживает свою ориентацию и при наклоне парашюта более  $45^\circ$  в течение 2 с происходит смотка троса, управляющего разъемным соединением. По завершении отцепки система вновь переходит в режим микропотребления.

Для определения углов наклона устройства проще всего использовать инклинометр на базе трехосного акселерометра. Углы наклона в таком случае определяются по формулам

$$\alpha = \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right), \quad \beta = \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right),$$

где  $A_x, A_y, A_z$  – показания акселерометров по каждой из осей [2].

Однако при существенных боковых ускорениях вычисляемый угол наклона будет значительно отличаться от истинного. Для решения этой проблемы используется комплементарный фильтр, в котором на каждой итерации угол наклона по каждой оси вычисляется с использованием данных как акселерометра, так и датчика угловой скорости. Формула комплементарного фильтра имеет вид

$$A_t = K\alpha_{acc} + (1 - K)(A_{t-1} + \omega \cdot dt),$$

где  $A_t, A_{t-1}$  – значения углов при измерении на шаге  $t$  и  $t - 1$ ;  $K$  – коэффициент комплементарного фильтра [8];  $\alpha_{acc}$  – значение угла на шаге  $t$ , вычисленное по формуле для трехосного акселерометра;  $\omega$  – показания датчика угловой скорости на шаге  $t$ ;  $dt$  – шаг времени.

Таким образом, при оптимальном значении коэффициента  $K$  устраняются ошибки, вызванные влиянием боковых ускорений, а также дрейфом нуля датчика угловой скорости.

**Тестирование образца.** Для проверки точности угла наклона проведен эксперимент. На двухосном поворотном стенде (рис. 7) закрепили блок автоотцепки и инерциальный модуль ГКВ-10 [9]. Далее осуществляли наклон закрепленных датчиков в диапазоне  $\pm 90^\circ$  по осям  $X$  и  $Y$ . Показания обоих приборов при этом записывали с помощью ПК.

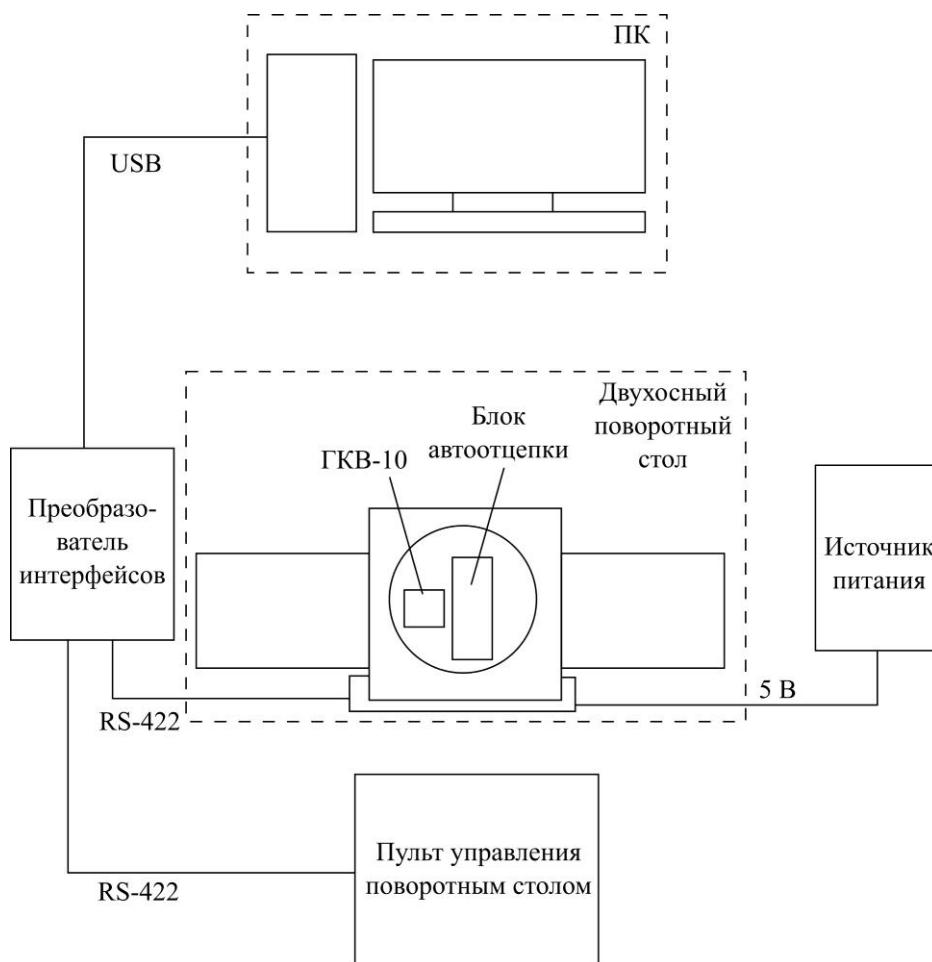


Рис. 7. Схема тестового стенда для проверки точности измерения угла наклона  
Fig. 7. Scheme of a test stand for checking the accuracy of measuring the inclination angle

Анализ полученных данных показал, что максимальное расхождение в показаниях ГКВ-10 [7] и автоотцепки при наклоне поворотного стола в диапазоне  $\pm 90^\circ$  составляет  $4,6^\circ$  (рис. 8, а). Повторное тестирование с вращением оси поворотного стола со скоростью  $360$  градус/с показало максимальное расхождение до  $6,9^\circ$  (рис. 8, б) в точках экстремума  $\pm 90$ . В рамках решаемой прибором задачи такая погрешность является удовлетворительной.

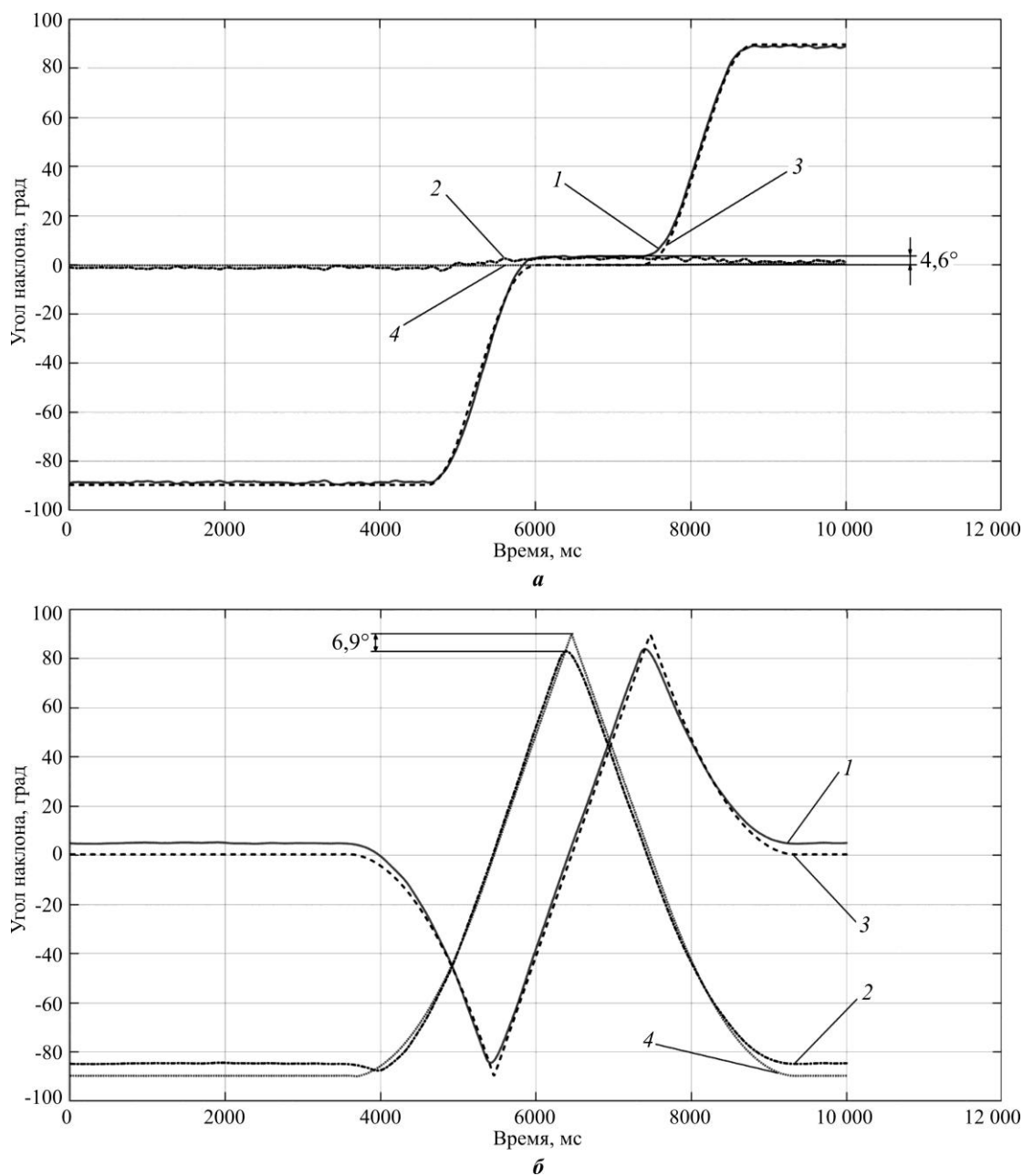


Рис. 8. Графики показаний инерциального модуля ГКВ-10 и автоотцепки в процессе эксперимента с наклоном вертикальной оси поворотного стола в диапазоне  $\pm 90^\circ$  (а) и при вращении поворотного стола со скоростью  $360^\circ/\text{с}$  (б): 1 – угол наклона по оси X автоотцепки; 2 – угол наклона по оси Y автоотцепки; 3 – угол наклона по оси X ГКВ-10; 4 – угол наклона по оси Y ГКВ-10  
 Fig. 8. Plots of readings of GKV-11 and automatic uncoupling during the experiment with the tilt of the vertical axis of the turntable in the range of  $\pm 90^\circ$  (a) and when the turntable rotates at a speed of  $360^\circ/\text{s}$  (b): 1 – the automatic uncoupling X-direction inclination angle; 2 – the automatic uncoupling Y-direction inclination angle; 3 – the GKV-11 X-direction inclination angle; 4 – the GKV-11 Y-direction inclination angle

В целях комплексной проверки работоспособности устройства проведены летные испытания на подмосковном аэродроме Ватулино. В процессе тестирования система отработала штатно.

**Заключение.** Разработанное устройства автоотцепки десантируемого груза имеет улучшенные характеристики по массе, габаритам и быстродействию. Использование КЗУ вместо рычажного механизма отцепки позволило уменьшить габариты в 1,5 раза (235 × 80 × 45 мм против 300 × 80 × 45 мм) и снизить массу изделия примерно в 5 раз (0,75 кг против 4 кг). Использование в качестве датчика наклона комбинированного инерциального МЭМС-сенсора, включающего в себя датчик угловой скорости и акселерометры, позволило повысить быстродействие при посадке в 3,5 раза (2 с против 7 с). Тестирование работы устройства в лабораторных условия подтвердило, что ошибка измерения угла наклона по сравнению с эталоном составляет менее 7°. Это является удовлетворительной погрешностью в данной задаче.

Проведенные летные испытания показали, что система успешно выполняет заданную функцию. В целях дальнейшей оптимизации конструкции и снижения массогабаритных параметров в настоящее время проходит доработка корпуса устройства.

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

### Литература

1. Голощанов А. Применение МЭМС-технологии в навигации // Компоненты и технологии. 2014. № 4. С. 65–69. EDN: QHOVSB.
2. Mobile satellite antenna control system based on MEMS-IMU / A. A. Galkin, V. V. Puzikov, A. V. Mikheev et al. // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg; Moscow: IEEE, 2021. P. 2655–2659. <https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396118>
3. Применение МЭМС-инерциальных датчиков в автомобилях // Laser Components [Электронный ресурс]. 17.03.2017. URL: <https://lasercomponents.ru/industry-news/primenenie-mems-inercialnyh-datchikov-v-avtomobilyah/> (дата обращения: 29.05.2023).
4. Тимошенко С. П., Кульчицкий А. П. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов // Изв. вузов. Электроника. 2012. № 6 (98). С. 51–56. EDN: PJHDEV.
5. А. с. 163905 СССР. Автоотцепка / П. И. Модин; заявл. 19.03.1963; опубл. 22.07.1964, Бюл. № 13.
6. А. с. 142156 СССР. Автоотцепка-угломер / В. В. Качалков, В. Н. Венценовцев; заявл. 17.02.1961; опубл. 20.07.1961, Бюл. № 20.
7. Точное измерение наклона объекта с помощью специализированных MEMS-датчиков ST // Компэл [Электронный ресурс]. URL: <https://www.compel.ru/lib/141720> (дата обращения: 15.08.2022).
8. Зо Мью Наин, Щагин А. В., Ле Винь Тханг, Хтин Линн У. Комплементарный фильтр для оценки угла с использованием микромеханической системы гироскопа и акселерометра // Инженерный вестник Дона. 2020. № 3 (63). URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2020/6380> (дата обращения: 29.05.2023).
9. ГКВ-10 // Лаборатория Микроприборов [Электронный ресурс]. 2022. URL: <https://mp-lab.ru/products/ins-about/gkv-10/#> (дата обращения: 30.03.2023).

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 11.04.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

### Информация об авторах

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

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

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

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

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

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

### **References**

1. Goloshchapov A. Application of MEMS technology in navigation. *Komponenty i tekhnologii*, 2014, no. 4, pp. 65–69. (In Russian). EDN: QHOVSB.
2. Galkin A. A., Puzikov V. V., Mikheev A. V., Tulush A. V., Timoshenkov A. S. Mobile satellite antenna control system based on MEMS-IMU. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. St. Petersburg, Moscow, IEEE, 2021, pp. 2655–2659. <https://doi.org/10.1109/ElConRus51938.2021.9396118>
3. Application of MEMS inertial sensors in motor vehicles. *Laser Components*. 17.03.2017. Available at: <https://lasercomponents.ru/industry-news/primenenie-mems-inercialnyh-datchikov-v-avtomobilyah/> (accessed: 29.05.2023).
4. Timoshenkov S. P., Kulchitsky A. P. Application of MEMS sensors in navigation and orientation systems for moving objects. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2012, no. 6 (98), pp. 51–56. (In Russian). EDN: PJHDEV.
5. Modin P. I. *Auto uncoupling*. Copyright certificate 163905 USSR, publ. 22.07.1964, Bul. no. 13. (In Russian).
6. Kachalkov V. V., Ventsenostsev V. N. *Automatic uncoupling protractor*. Copyright certificate 142156 USSR, publ. 20.07.1961, Bul. no. 20. (In Russian).
7. Accurate object tilt measurement with dedicated MEMS ST sensors. *Compel*. (In Russian). Available at: <https://www.compel.ru/lib/141720> (accessed: 15.08.2022).
8. Zaw Myo Naing, Shchagin A. V., Le Vinh Thang, Htin Linn Oo. Complementary filter for estimating the angle using the microelectromechanical system of the gyroscope and accelerometer. *Inzhenernyy vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2020, iss. 3. (In Russian). Available at: <http://ivdon.ru/en/magazine/archive/n3y2020/6380> (accessed: 29.05.2023).
9. GKV-10. *Laboratoriya Mikropriborov*. 2022. (In Russian). Available at: <https://mp-lab.ru/products/ins-about/gkv-10/#> (accessed: 30.03.2023).

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 11.04.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

### **Information about the authors**

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



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

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

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

**Alexey S. Timoshenkov** – Dr. Sci. (Eng.), General Director, “Laboratory of Microdevices” LLC (Russia, 124527, Moscow, Zelenograd, Solnechnaya alley, 6), at@mp-lab.ru

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

## Вниманию читателей журнала

### «Известия высших учебных заведений. Электроника»

**Подписку на печатную версию журнала можно оформить:**

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

## Двухосевой однокристалльный АМР-преобразователь магнитного поля

А. А. Баранов, А. Б. Грабов, Д. Ю. Обижаев, С. А. Жукова

Центральный научно-исследовательский институт химии и механики, г. Москва, Россия

mail@cniihm.ru

**Аннотация.** Магнитометры, основанные на анизотропном магниторезистивном (АМР) эффекте, лидируют по массогабаритным характеристикам, энергопотреблению и чувствительности. Перспективна идея двухосевого АМР-преобразователя магнитного поля в однокристалльном исполнении. В работе для целей магнитометрической навигации рассмотрены разработанные и изготовленные двухосевые однокристалльные анизотропные преобразователи магнитного поля на основе тонких пленок  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  со смешанной анизотропией. Описана технология их изготовления и представлены результаты исследования характеристик преобразователей. Достигнутая чувствительность по каждой оси составляет 1,58 мВ/(Э·В), начальный разбаланс моста  $\Delta U = 20$  мВ.

**Ключевые слова:** анизотропный магниторезистивный эффект, АМР-преобразователь, магнитное поле

**Для цитирования:** Баранов А. А., Грабов А. Б., Обижаев Д. Ю., Жукова С. А. Двухосевой однокристалльный АМР-преобразователь магнитного поля // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 500–508. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-500-508>. – EDN: APJFPO.

Original article

## Two-axis single-chip AMR transducer of magnetic field

A. A. Baranov, A. B. Grabov, D. Yu. Obizhaev, S. A. Zhukova

Central Scientific-Research Institute of Chemistry and Mechanics,  
Moscow, Russia

mail@cniihm.ru

**Abstract.** Magnetometers based on anisotropic magnetoresistive (AMR) effect are lead in physical data, energy consumption and sensitivity. The idea of two-axis single-chip AMR transducer of magnetic field is promising. In this work, the two-axis single-chip anisotropic transducers of magnetic field based on Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> thin films with mixed anisotropy, developed for magnetometry navigation purposes, are considered. Their manufacturing technique and sensor characteristics studying results are described. The realized sensitivity on every axis is 1.58 mV/(Oe·V) with beginning bridge unbalance  $\Delta U = 20$  mV.

**Keywords:** anisotropic magnetoresistive effect, AMR transducer, geomagnetic field

**For citation:** Baranov A. A., Grabov A. B., Obizhaev D. Yu., Zhukova S. A. Two-axis single-chip AMR transducer of magnetic field. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 500–508. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-500-508>. – EDN: APJFPO.

**Введение.** Надежная система ориентации и навигации летательных аппаратов и других подвижных платформ должна интегрировать в себе как минимум три независимых дублирующих навигационных канала [1]. Если, например, в навигационной системе летательного аппарата [2] первый канал выдает навигационную информацию по внешним искусственным ориентирам GPS или ГЛОНАСС, второй канал – бесплатформенная инерциальная навигационная система – формирует информационный поток по внутреннему стандарту, то навигационный сигнал третьего канала должен формироваться естественными физическими полями Земли, в частности геомагнитным полем, которое может обеспечить двух- или трехкоординатный магнитометр, находящийся на борту летательного аппарата.

Анализ возможных физических принципов магнитометрии в геомагнитной области показывает, что по массогабаритным характеристикам, энергопотреблению и чувствительности лидируют магнитометры на анизотропном магниторезистивном (АМР) эффекте [3]. Принцип действия АМР-преобразователей основан на изменении сопротивления в тонких пленках пермаллоя Ni<sub>81</sub>Fe<sub>19</sub>. Для возникновения АМР-эффекта пленки должны обладать осевой магнитной анизотропией [4].

Перспективна идея двухосевого АМР-преобразователя магнитного поля в однокристалльном исполнении [5]. В таких двухосевых однокристалльных АМР-преобразователях отсутствует погрешность измерений, обусловленная неортогональностью расположения осей чувствительности, характерная для двухосевых магнитометров, изготовленных на основе сборок одноосевых преобразователей. Кроме того, однокристалльное исполнение двухосевых АМР-преобразователей магнитного поля позволяет снизить электропотребление путем формирования единой планарной катушки (Set/Reset) для одновременного перемангничивания двух преобразователей.

**Эксперимент.** На первом этапе на подложках Si КДБ (100) термически формировали окисленный слой толщиной  $\approx 2$  мкм. На слой SiO<sub>2</sub> магнетронным напылением наносили трехслойную тонкопленочную ферромагнитную структуру Ti-Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>-Ti (25 – 35 – 25 нм). Магнетронное напыление проходило при температуре 300 °С и в однородном магнитном поле напряженностью 420 Гс.

Магниты и нагреватель сконструированы с учетом их тепловой развязки. На рис. 1 приведена 3D-модель подложкодержателя, содержащего два антипараллельных магнита и кварцевый нагреватель. При испытаниях подложкодержателя на воздухе, т. е. при наличии конвективной теплопередачи, при температуре на столике около 300 °С температура магнитов равна 85 °С.

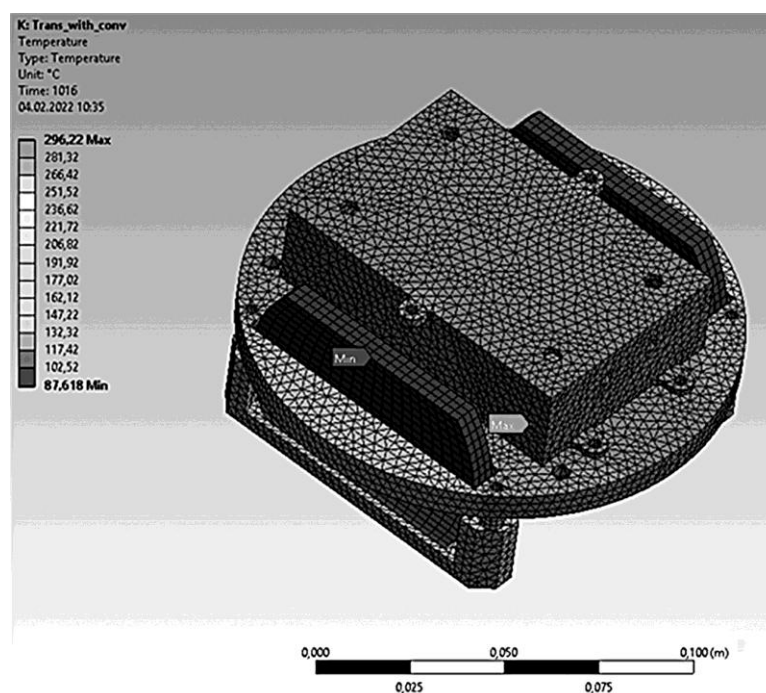


Рис. 1. Оснастка для осаждения ферромагнитных пленок в магнитном поле с возможностью нагрева подложки до 350 °С

Fig. 1. Tools for the ferromagnetic films deposition in magnetic field with the opportunity of substrate heating up to 350 °С

Измерения локальных значений АМР-эффекта ( $dR/R$ ), поверхностного сопротивления  $R_s$ , коэрцитивной силы  $H_c$  и поля анизотропии  $H_k$  по всей поверхности напыленной анизотропной пленки проводили шестизондовым методом [6] (рис. 2–4). Зависимости  $dR/R$ ,  $R_s$ ,  $H_c$  и  $H_k$  от угла поворота пластины  $\theta$  относительно оси катушек измеряли также шестизондовым методом. Как показано в работе [6], измерения зависимостей вида  $dR/R = f(\theta)$  и  $H_c = f(\theta)$  – это метод поиска оси легкого намагничивания в ферромагнитных пленках. Направление максимума  $dR/R$  или  $H_c$  соответствует направлению магнитной анизотропии пленки, а для случая технической размагниченности – направлению оси легкого намагничивания (см. рис. 2).

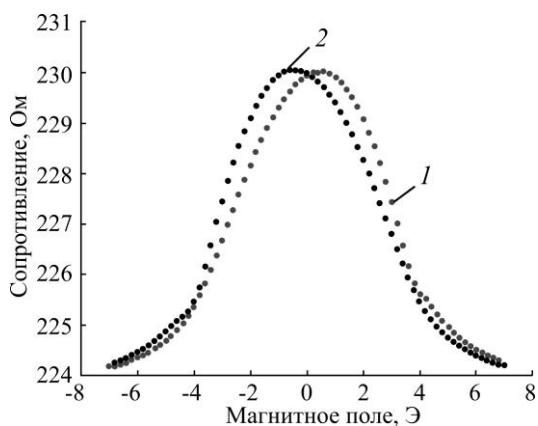


Рис. 2. Зависимость электрического сопротивления от магнитного поля для одиночного магниторезистора размером  $50 \times 6000$  мкм: 1 и 2 – кривые прямого и обратного хода соответственно  
 Fig. 2. Dependence of electrical resistivity with magnetic field for the single magnetoresistor  $50 \times 6000$  mkm: 1 and 2 – forward and reverse curves, respectively

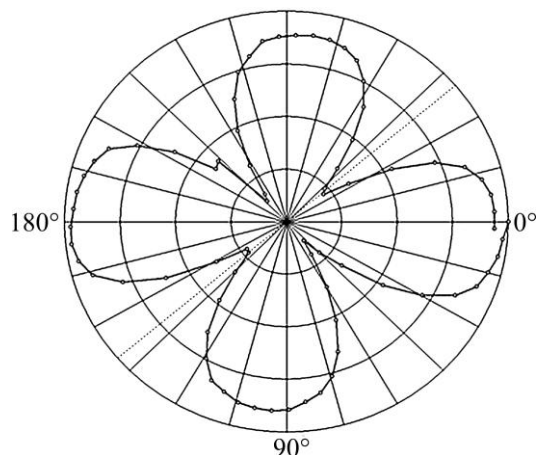
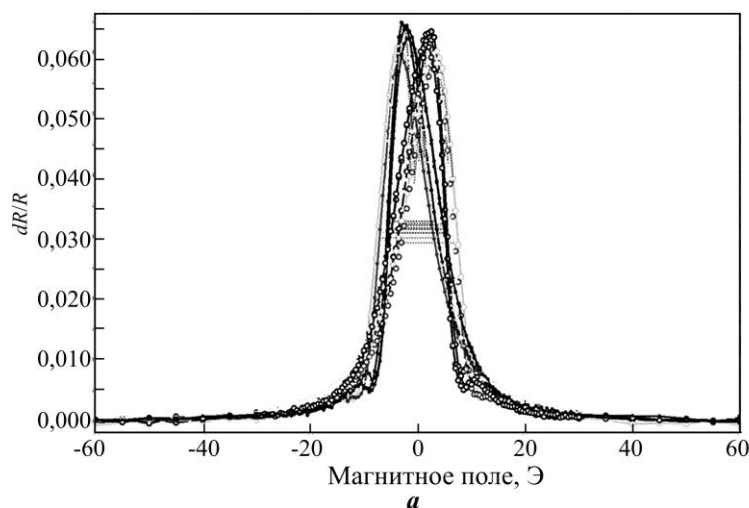


Рис. 3. Зависимость уровня АМР-эффекта от угла поворота подложки для пленки  $Ni_{80}Fe_{20}$ , измеренная шестизондовым методом  
 Fig. 3. Dependence of AMR effect level with substrate's turn angle for  $Ni_{80}Fe_{20}$  film measured by the six-probes method



6,16	6,34	6,51	6,53	6,4
6,4	6,39	6,38	6,35	6,38
6,42	6,35	6,36	6,36	6,27
6,53	6,41	6,28	6,28	6,23
6,42	6,51	6,42	6,16	5,95

б

Рис. 4. Исследование характеристик осажденных пленок на шестизондовой станции:  
 а – вольт-эрстедные кривые; б – карта распределения  $dR/R$  по поверхности пленки  
 Fig. 4. Studying of deposited thin films characteristics at six-probe station:  
 а – Volt-Oersted curves; б – map of  $dR/R$ 's distribution on the film surface

На втором этапе из тонкопленочной анизотропной структуры  $Ti-Ni_{80}Fe_{20}-Ti$  с использованием фотолитографии формировали топологию АМР-сенсора геомагнитного поля (рис. 5). АМР-преобразователь представляет собой мостовую схему из четырех магниторезисторов с шунтирующими полосками из алюминия и имеет планарную катушку перемагничивания. Предусмотрены подгоночные узлы для минимизации начального разбаланса моста. На сформированном АМР-преобразователе измеряли отклонение начального разбаланса мостовой схемы от нуля и чувствительность в диапазоне  $\pm 40$  Э.

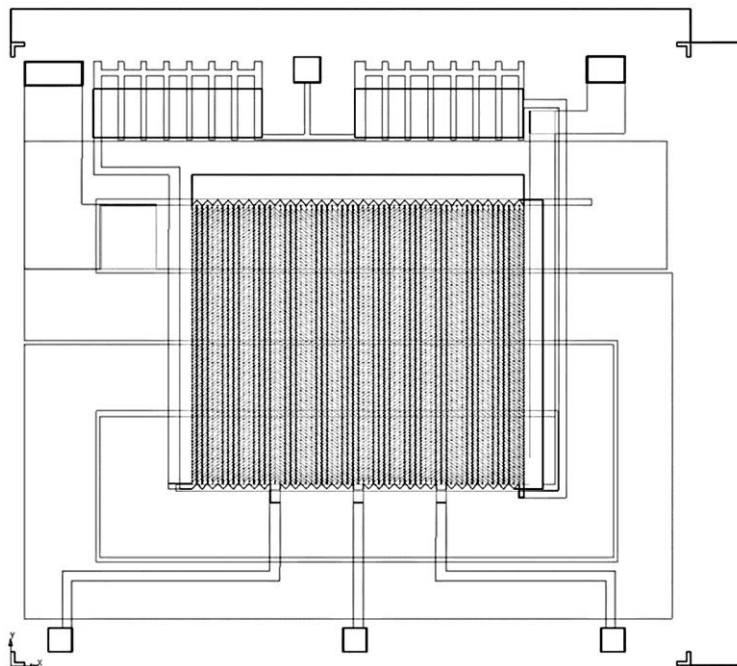


Рис. 5. Общий вид топологии АМР-преобразователя геомагнитного поля  
 Fig. 5. General view of the geomagnetic field AMR sensor topology

**Результаты и их обсуждение.** АМР-эффект в пленке растет с увеличением температуры подложки и напряженности поля, создаваемого магнитами. При температуре нагревателя  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  и магнитуде поля  $420\text{ Гс}$  достигнуто значение  $dR/R = 2,67\text{ \%}$ . (рис. 4, б).

Как показано на рис. 2, в выращенной пленке имеется четыре максимума на зависимости  $dR/R = f(\theta)$ . Следовательно, имеют место два направления анизотропии, оси которых направлены ортогонально друг к другу. Это так называемая смешанная анизотропия [7]. Преобразователь, изготовленный на основе пленки со смешанной анизотропией, должен также иметь и две ортогональные оси чувствительности.

На сформированной топологии АМР-преобразователя изучен эффект влияния формы и расположения шунтирующих полосок на выходные характеристики полосковых магниторезисторов, сформированных из двухосных пленок. Из приведенных графиков на рис. 6 видно, что для двухосных пленок эффект от шунтирующих полосок действует почти так же, как и в случае одноосных, т. е. область линейности смещается к нулю.

Важная характеристика магниторезисторов – их ширина и зазор между ними. Проведены испытания трех вариантов структур барберов (120, 80 и 30 мкм). Выбрана структура шириной 120 мкм, обеспечивающая наибольшую чувствительность. На рис. 7 представлены результаты измерений трех вариантов магниторезисторов, различающихся по ширине шунтирующих полосок и их шагу. При разработке рабочего шаблона учитывали размагничивающий фактор. Принята оптимальная ширина магниторезистора, равная 50 мкм, что повысило чувствительность на 40 % по сравнению с 30-мкм резисторами.

Исследовали влияние на чувствительность АМР-преобразователя зазора между магниторезистивными полосками. В первом варианте топологии зазор составлял 100 мкм, во втором – 5 мкм (рис. 8). Видно, что чувствительность выше в случае более узкого зазора.

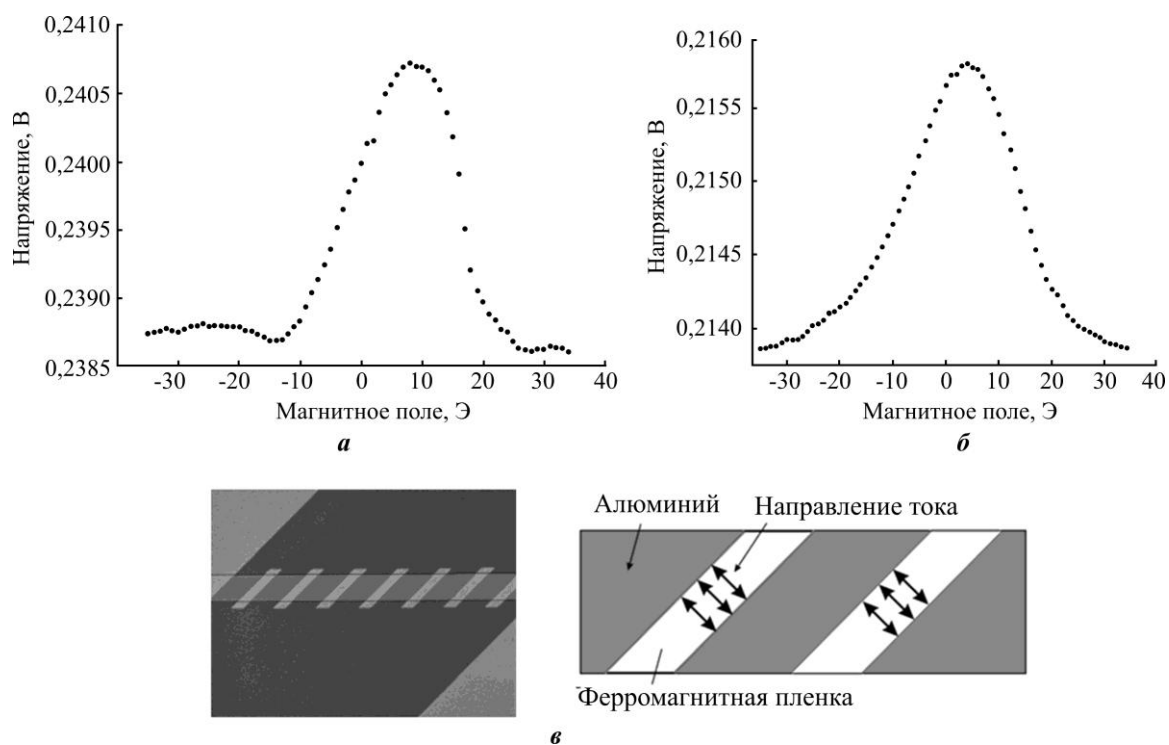


Рис. 6. Линеаризация передаточной характеристики преобразователя: *a, б* – линеаризованная и нелинеаризованная характеристики соответственно; *в* – топология  
 Fig. 6. Transducer's transfer characteristics linearization: *a, b* – linearized and non-linearized characteristics, respectively; *c* – topology

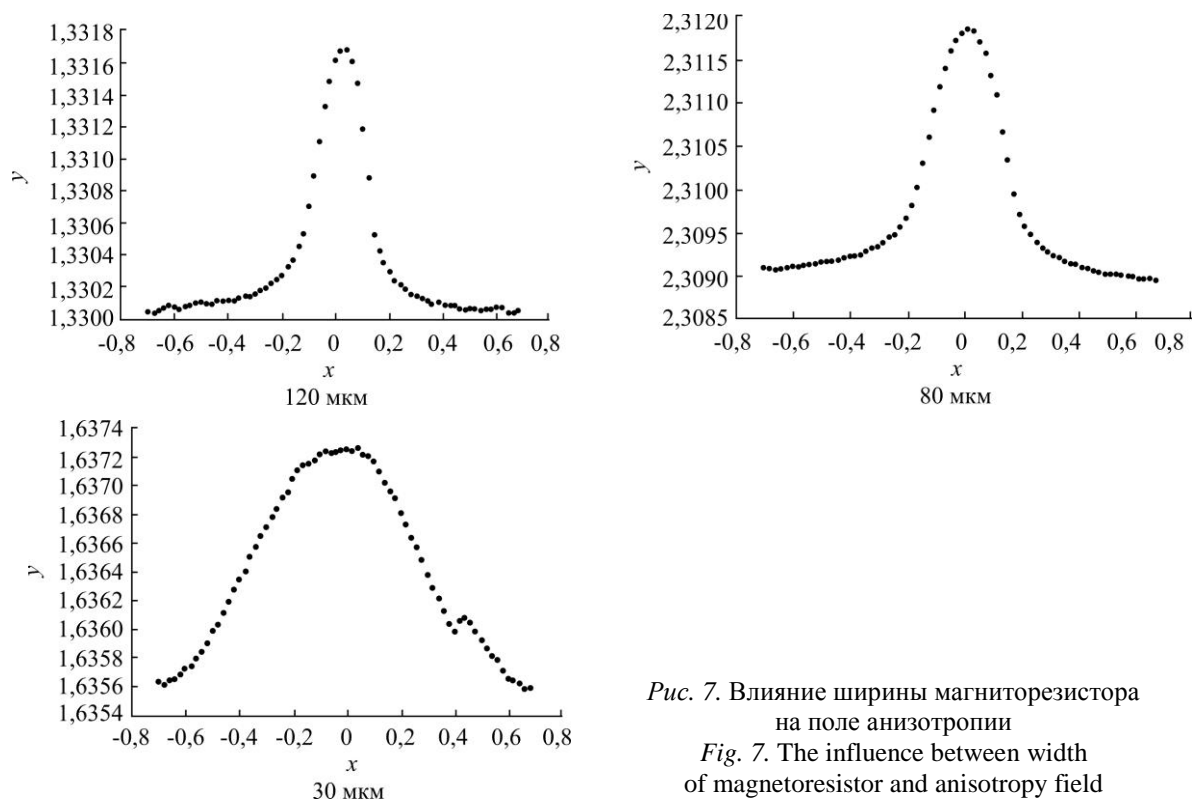


Рис. 7. Влияние ширины магниторезистора на поле анизотропии  
 Fig. 7. The influence between width of magnetoresistor and anisotropy field

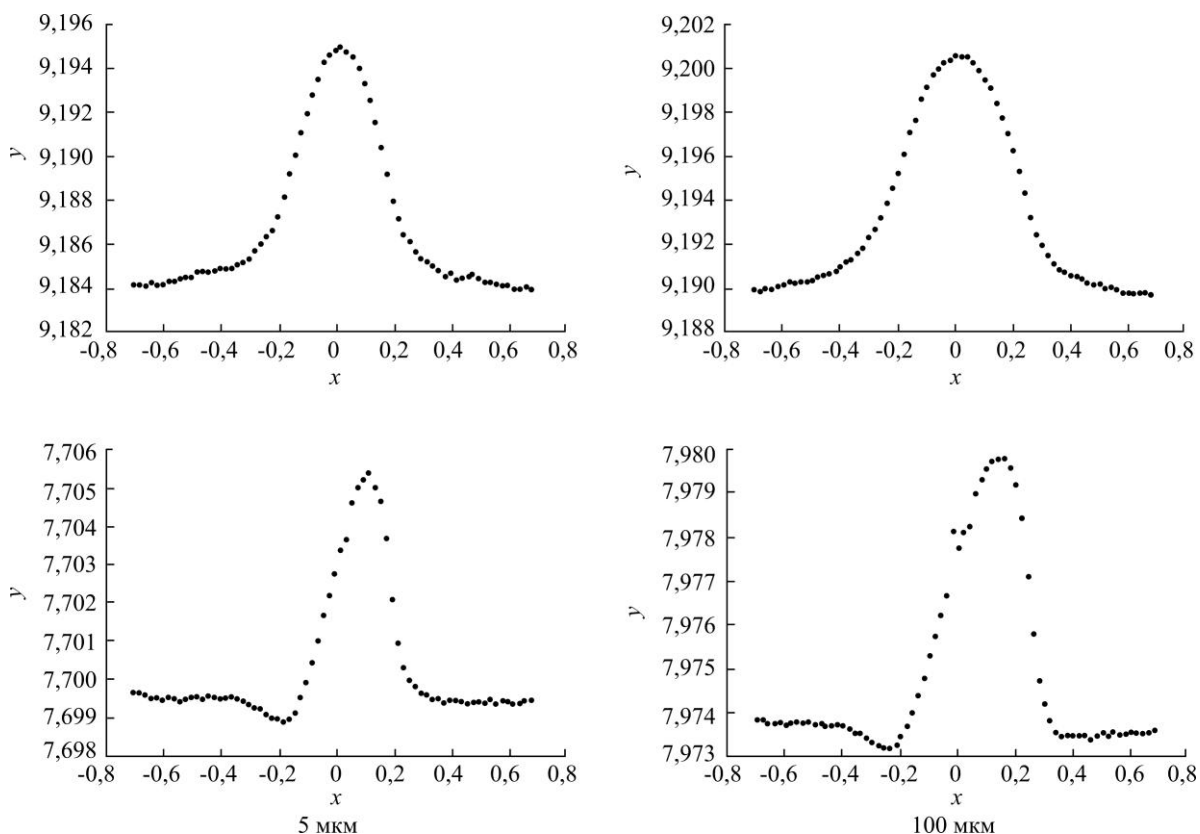


Рис. 8. Влияние зазора между магниторезисторами шириной 50 мкм на поле анизотропии  
 Fig. 8. The influence of the 50-μm-wide gap between magnetoresistors on the anisotropy field

На рис. 9 представлены микрофотографии кристаллов разработанного АМР-преобразователя магнитного поля. На рис. 10 приведены результаты измерения чувствительности АМР-преобразователя в диапазоне  $\pm 30$  Э. Видно, что в области геомагнитного поля изменению выходного напряжения соответствует чувствительность 1,58 мВ/(Э·В) при начальном разбалансе моста  $\Delta U = 20$  мВ.

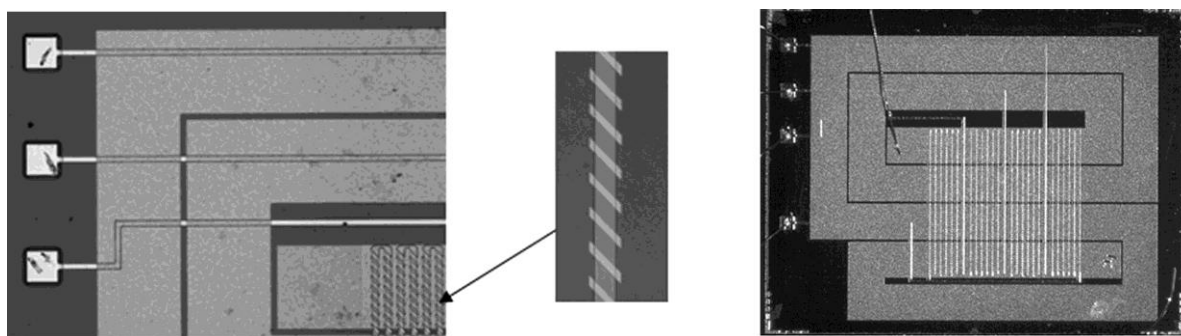


Рис. 9. Микрофотографии кристаллов АМР-преобразователя магнитного поля  
 Fig. 9. Micrographs of the magnetic field AMR sensor's die



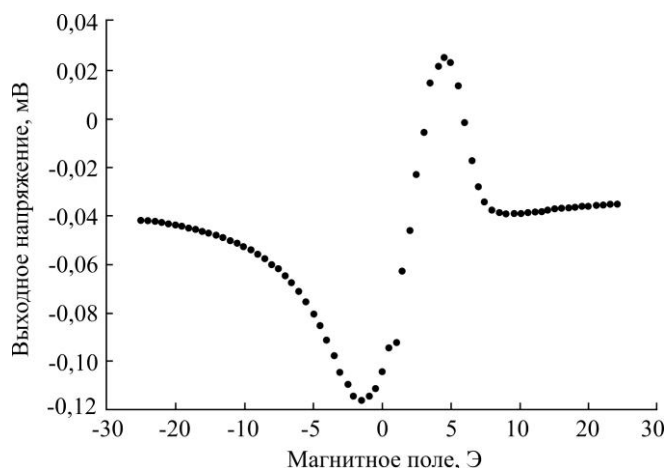


Рис. 10. Вольт-эрстедная характеристика кристалла АМР-преобразователя магнитного поля  
Fig. 10. Volt-Oersted curve of the magnetic field AMR transducer's die

**Заключение.** Исследования показали, что повышенный АМР-эффект (2,57 %) в анизотропной ферромагнитной пленке достигается в случае роста пленки при температуре подложкодержателя 300 °С и магнитуде постоянного поля 420 Гс. В пленке наблюдается смешанная анизотропия с двумя направленными ортогонально друг к другу осями легкого намагничивания. Наилучшей чувствительностью обладает АМР-преобразователь с шириной полоски 120 мкм, шагом между шунтирующими полосками 12 мкм и зазором между полосками 5 мкм.

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

### Литература

1. Бетанов В. В., Демидов А. С., Ступак Г. Г., Янчик А. Г. Теоретические основы построения автоматизированной системы организационно-технического управления космическими средствами / под ред. А. Г. Янчика. М.: Военная академия РВСН им. Петра Великого, 2002. 160 с.
2. Shorshi G., Bar-Itzhack I. Y. Satellite autonomous navigation based on magnetic field measurements // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1995. Vol. 18. Iss. 4. P. 843–850. <https://doi.org/10.2514/3.21468>
3. Three-axis digital compass IC HMC5883L by Honeywell // Farnell [Электронный ресурс]. 2010. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/1683374.pdf> (дата обращения: 26.05.2023).
4. Tumanski S. Thin film magnetoresistive sensors. Bristol; Philadelphia: IOP Publ., 2001. 576 p. (Series in Sensors).
5. Development of two axes magnetometer for navigation applications / P. V. Sreevidya, J. Khan, H. C. Barshilia et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2018. Vol. 448. P. 298–302. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.08.064>
6. Грабов А. Б. Исследование процессов токопереноса в тонкопленочных магниторезистивных структурах  $Ni_{0,76}Fe_{0,18}Co_{0,06}$  // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7. № 1. С. 95–103. <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.95.103>
7. Magnetic field-dependent shape anisotropy in small patterned films studied using rotating magnetoresistance / X. Fan, H. Zhou, J. Rao et al. // Sci. Rep. 2015. Vol. 5. Art. No. 16139. <https://doi.org/10.1038/srep16139>

Статья поступила в редакцию 07.03.2023 г.; одобрена после рецензирования 06.04.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

### Информация об авторах

**Баранов Александр Александрович** – кандидат технических наук, начальник лаборатории Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а), mail@cniihm.ru

**Грабов Алексей Борисович** – ведущий инженер Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а), mail@cniihm.ru

**Обижаев Денис Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а), mail@cniihm.ru

**Жукова Светлана Александровна** – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника научно-исследовательского центра Центрального научно-исследовательского института химии и механики (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а), mail@cniihm.ru

### References

1. Betanov V. V., Demidov A. S., Stupak G. G., Yanchik A. G. *Theoretical basics of building the automated control system for aerospace systems organizational and technical management*, ed. A. G. Yanchik. Moscow, Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great Publ., 2002. 160 p. (In Russian).
2. Shorshi G., Bar-Itzhack I. Y. Satellite autonomous navigation based on magnetic field measurements. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, vol. 18, iss. 4, pp. 843–850. <https://doi.org/10.2514/3.21468>
3. Three-axis digital compass IC HMC5883L by Honeywell. *Farnell*. 2010. Available at: <https://www.farnell.com/datasheets/1683374.pdf> (accessed: 26.05.2023).
4. Tumanski S. *Thin film magnetoresistive sensors*. Bristol, Philadelphia, IOP Publ., 2001. 576 p. Series in Sensors.
5. Sreevidya P. V., Khan J., Barshilia H. C., Ananda C. M., Chowdhury P. Development of two axes magnetometer for navigation applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 448, pp. 298–302. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.08.064>
6. Grabov A. B. Study of current transfer processes in thin film magnetoresistive structures Ni<sub>0.76</sub>Fe<sub>0.18</sub>Co<sub>0.06</sub>. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy = Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 95–103. (In Russian). <https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.1.95.103>
7. Fan X., Zhou H., Rao J., Zhao X., Zhao J., Zhang F., Xue D. Magnetic field-dependent shape anisotropy in small patterned films studied using rotating magnetoresistance. *Sci. Rep.*, 2015, vol. 5, art. no. 16139. <https://doi.org/10.1038/srep16139>

The article was submitted 07.03.2023; approved after reviewing 06.04.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

### Information about the authors

**Alexander A. Baranov** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a), mail@cniihm.ru

**Alexey B. Grabov** – Senior Engineer, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a), mail@cniihm.ru

**Denis Yu. Obizhaev** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of Department, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a), mail@cniihm.ru

**Svetlana A. Zhukova** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Deputy Head of the Research Center, Central Research Institute of Chemistry and Mechanics (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a), mail@cniihm.ru

# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

Научная статья  
УДК 621.372.553  
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-4-509-517  
EDN: BLIURN

## Управляемый фазовращатель гармонического сигнала

*Е. Б. Колесников*

*Новомосковский институт (филиал) Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева, г. Новомосковск, Россия*

*Kolesnikov55@mail.ru*

**Аннотация.** Схемы управляемого фазовращателя гармонического сигнала достаточно просты и делятся на два типа – с отстающим и опережающим фазовым углом сдвига. Схемы обеспечивают сдвиг фазы сигнала от 0 до 180°, имеют коэффициент передачи, равный единице в широком диапазоне входного сигнала. Однако для данных схем характерны такие недостатки, как относительно узкий диапазон углов сдвига фазы, влияние частоты входного сигнала на фазовый сдвиг, нелинейная регулировочная характеристика, а также ручное управление. Совершенствование управляемых фазовращателей позволяет устранить некоторые недостатки. В работе описаны принципы построения и функционирования существующих управляемых фазовращателей и области их применения. Приведены результаты разработки и исследования управляемого фазовращателя, обеспечивающего сдвиг фазы гармонического сигнала в пределах 360°, который не зависит от частоты входного напряжения при сохранении линейности передаточной характеристики. Представлены структурная схема и основные зависимости, поясняющие работу фазовращателя. Составлена имитационная модель фазовращателя в среде Matlab & Simulink и получены осциллограммы его работы, подтверждающие работоспособность устройства. Показано, что разработанный фазовращатель обеспечивает сдвиг фазы входного синусоидального напряжения до 360° при изменении сигнала управления в пределах  $\pm 10$  В. Применение такого фазовращателя упрощает построение различных аналоговых формирователей и многофазных генераторов гармонических колебаний, умножителей и делителей частоты, преобразователей переменного напряжения в постоянное и др.

**Ключевые слова:** фазовращатель, гармонический сигнал, фазовый сдвиг, угол сдвига, фазовый фильтр, перемножитель напряжений, формирователь синуса, формирователь косинуса

*Для цитирования:* Колесников Е. Б. Управляемый фазовращатель гармонического сигнала // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 509–517. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-509-517>. – EDN: BLIURN.

Original article

## Controlled harmonic signal phase shifter

*E. B. Kolesnikov*

*Novomoskovsk Institute (branch) of Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Novomoskovsk, Russia*

*Kolesnikov55@mail.ru*

**Abstract.** The schemes of controlled harmonic signal phase shifter are fairly simple and divided into two types: with lagging and leading phase shift angle. The schemes ensure signal phase shift from 0 to 180° and have transfer factor equal to 1 over the broad input ranges. However, these schemes have such flaws as relatively narrow phase shift angle range, input signal frequency impact on phase shift value, nonlinear regulating characteristic, and manning. Controlled phase shifters improvement has allowed the elimination of some flaws. In this work, principles of construction and functioning of existing controlled phase shifters and their applications are described. The results of the development and research of a controlled phase shifter providing a phase shift of a harmonic signal within 360°, which does not depend on the frequency of the input voltage while maintaining the linearity of the transfer characteristic, are given. A block diagram and the main dependencies explaining the operation of the phase shifter are presented. A simulation model of the phase shifter in the Matlab & Simulink environment has been compiled and oscillograms of its operation have been obtained, confirming its operability. It was demonstrated that the developed phase shifter provides a phase shift of the input sinusoidal voltage up to 360°, when the control signal changes within  $\pm 10$  V. The application of the developed phase shifter simplifies the construction of various analog shapers and multiphase harmonic oscillators, frequency multipliers and dividers, alternating voltage to DC converters, etc.

**Keywords:** phase shifter, harmonic signal, phase shift, shift angle, phase filter, voltage multiplier, sine shaper, cosine shaper

**For citation:** Kolesnikov E. B. Controlled harmonic signal phase shifter. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 509–517. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-509-517>. – EDN: BLIURN.

**Введение.** В технике измерений, радиоэлектронике, автоматике, системах связи, в устройствах силовой электроники широкое применение находят управляемые фильтры, многофазные электронные генераторы, модуляторы, демодуляторы, умножители и делители частоты, важным элементом которых являются фазовращатели гармонического сигнала. Фазовращатель создает фазовый сдвиг выходного гармонического колебания по отношению к фазе входного колебания [1]. Фазовый сдвиг сигнала обеспечивается применением в фазовращателях  $RC$ - или  $RL$ -цепей, позволяющих сдвигать фазу между напряжением и током. Если допускается возможность регулирования фазового сдвига, то такой фазовращатель называется управляемым (УФВ).

К основным характеристикам УФВ относятся максимальный угол фазового сдвига, управляемость, рабочий диапазон частот, линейность и коэффициент передачи. Фазовый сдвиг сигнала регулируют, изменяя параметры разных элементов, входящих в состав УФВ (обычно резисторов или конденсаторов). Управление осуществляют как ручным способом с использованием переменных резисторов и конденсаторов, так и электронным способом с применением внешнего сигнала управления постоянного тока. Управляемые фазовращательные цепи позволяют получать систему многофазных гармонических сигналов с постоянными фазовыми сдвигами, т. е. обеспечивают необходимые стабильные фазовые сдвиги при изменении частоты формируемых сигналов в широком диапазоне.

Цель настоящей работы – разработка и исследование УФВ гармонического сигнала без указанных недостатков.

**Анализ литературных источников.** УФВ достаточно широко освещены в литературе. Так, в работах [1–7] приведена схема низкочастотного *RC*-фазовращателя, представляющего собой неуравновешенный четырехплечий мост. Данный фазовращатель относится к пассивным, имеет простую схему и позволяет сдвигать фазу сигнала практически от 10 до 160° при изменении сопротивления переменного резистора. Наряду с простотой схемы устройство имеет существенные недостатки, ограничивающие его область применения: узкий диапазон углов сдвига фазы; зависимость фазового сдвига от частоты входного сигнала; нелинейная зависимость угла сдвига от сопротивления резистора; ручное управление; изменяемый коэффициент передачи.

В работах [8–11] рассмотрены схемы УФВ в виде управляемых фазовых фильтров, получившие широкое распространение на практике. Фазовращатели относятся к активным и выполняются на операционном усилителе. Их схемы просты и имеют два типа – с отстающим и опережающим фазовым углом сдвига. Схемы обеспечивают сдвиг фазы сигнала от 0 до 180° путем изменения сопротивления переменного резистора и имеют коэффициент передачи, равный единице в широком диапазоне входного сигнала. Однако для этих схем характерны следующие недостатки: относительно узкий диапазон углов сдвига фазы; влияние частоты входного сигнала на величину фазового сдвига; нелинейная регулировочная характеристика, а также ручное управление.

Применение в УФВ фазовых фильтров создало предпосылки для электронного управления фазовым сдвигом. С этой целью в схемах переменный резистор электронно-управляемый с применением полевого транзистора, аналого-цифрового преобразователя или перемножителя напряжений [12]. Управление фазой в этом случае осуществляется напряжением от внешнего источника, что значительно расширяет область применения УФВ, но зависимость угла сдвига фазы от частоты и нелинейности регулировочной характеристики осталась. Диапазон углов сдвига фазы сигнала у таких УФВ по-прежнему составляет 0–180°.

Дальнейшее совершенствование УФВ позволило избежать зависимости угла сдвига фазы от частоты. Для этого в УФВ введен преобразователь период – напряжение [13, 14]. Однако это не устранило нелинейности регулировочной характеристики и ограниченного диапазона углов сдвига фазы сигнала (0–180°).

**Построение управляемого фазовращателя.** Построение разрабатываемого УФВ основано на известном тригонометрическом выражении, касающемся синуса суммы двух аргументов [15]:

$$\sin (x + y) = \sin x \cos y + \cos x \sin y. \quad (1)$$

Функциональная схема УФВ приведена на рис. 1. УФВ содержит блок сдвига фазы на  $90^\circ$ , первый и второй множители напряжений, сумматор, блок масштабирования, формирователь косинуса и формирователь синуса [16].

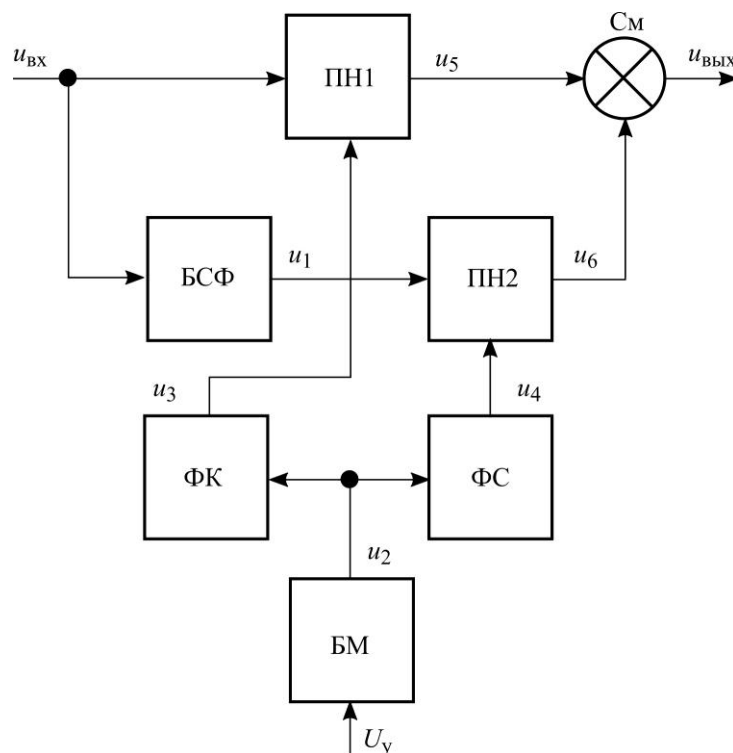


Рис. 1. Функциональная схема УФВ: БСФ – блок сдвига фазы на 90 градусов; ПН1 и ПН2 – первый и второй множители напряжений; См – сумматор; БМ – блок масштабирования; ФК – формирователь косинуса; ФС – формирователь синуса  
 Fig. 1. Functional diagram of the controlled phase shifter: БСФ – 90 degree phase shift unit; ПН1 and ПН2 the first and second voltage multipliers; См – adder; БМ – zoom block; ФК – cosine shaper; ФС – sine shaper

УФВ работает следующим образом. Входное синусоидальное напряжение (см. рис. 1)  $u_{\text{вх}} = U_{m\text{вх}} \sin \omega t$  с частотой  $\omega$  подается на первый вход ПН1 и вход БСФ на  $90^\circ$ , на выходе которого формируется напряжение  $u_1 = U_{m\text{вх}} \cos \omega t$ . Полученное напряжение  $u_1$  подается на первый вход ПН2. При этом одновременно на вход БМ подается напряжение управления  $U_y$  постоянного тока. Коэффициент передачи  $K_{\text{п}}$  БМ выбирается исходя из уравнения

$$K_{\text{п}} = \pi / U_y \approx 3,14 / 10 = 0,314.$$

Для принятого максимального значения напряжения управления УФВ  $U_y = \pm 10$  В коэффициент передачи БМ выбран равным  $K_{\text{п}} = 0,314$ . В результате этого на выходе БМ формируется напряжение  $u_2$ , численно равное углу сдвига фазы  $\varphi$  в радианах и пропорциональное напряжению управления  $U_y$ :

$$u_2 = U_y K_{\text{п}}.$$

Полученное напряжение  $u_2$  подается на входы ФК и ФС.

После преобразования напряжения  $u_2$  в ФК на его выходе формируется напряжение  $u_3 = \cos \varphi$ , пропорциональное косинусу угла сдвига фазы  $\varphi$ , и подается на второй вход ПН1. После преобразования напряжения  $u_2$  в ФС на его выходе формируется напряжение  $u_4 = \sin \varphi$ , пропорциональное синусу угла сдвига фазы  $\varphi$ , и подается на второй вход ПН2 (см. рис. 1). Полученные напряжения  $u_3$  и  $u_4$  имеют единичную амплитуду.

ПН1 и ПН2 проводят операцию перемножения входных сигналов  $u_{вх}$  и  $u_1$  соответственно на сигналы, полученные после ФК и ФС, соответственно  $u_3 = \cos \varphi$  и  $u_4 = \sin \varphi$ . Выходные напряжения  $u_5$  и  $u_6$ , полученные после ПН1 и ПН2, суммируются в См, на выходе которого и на выходе УФВ, согласно известному тригонометрическому выражению (1), формируется напряжение  $u_{вых}$  [15]:

$$u_{\text{вых}} = (U_{\text{мвх}} \sin \omega t) \cos \varphi + (U_{\text{мвх}} \cos \omega t) \sin \varphi = U_{\text{мвх}} \sin (\omega t + \varphi). \quad (2)$$

На рис. 2 приведены зависимости  $\varphi$  и  $u_2 - u_4$  от напряжения управления  $U_y$ , полученные по результатам проведенных расчетов по формуле (2).

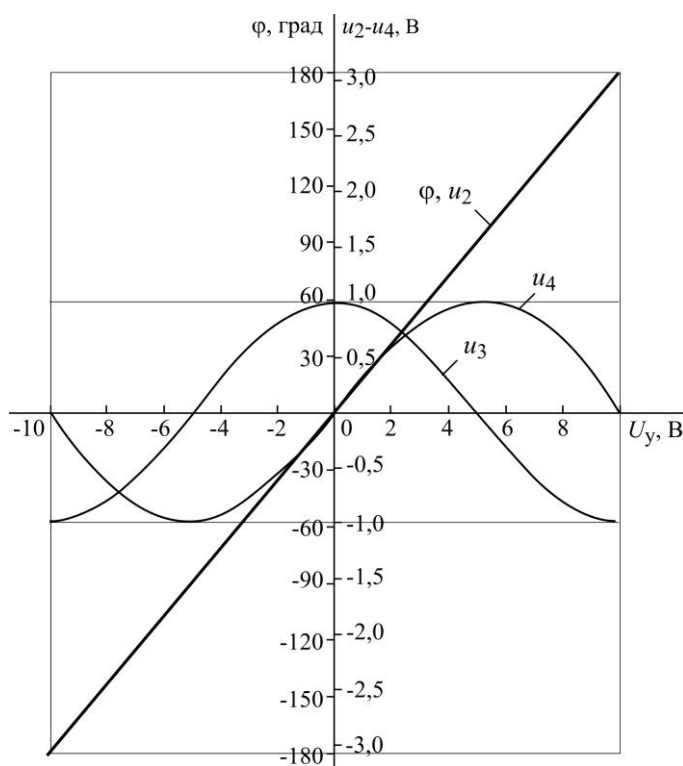


Рис. 2. Зависимости  $\varphi$  и  $u_2 - u_4$  от напряжения управления  $U_y$   
 Fig. 2. Dependences of  $\varphi$  and  $u_2 - u_4$  on the control voltage of the controlled phase shifter

Из анализа зависимостей на рис. 2 следует, что при изменении  $U_y$  от  $-10$  до  $+10$  В в УФВ происходит сдвиг фазы  $\varphi$  входного напряжения на угол от  $-180$  до  $180^\circ$ . В результате суммарный сдвиг фазы входного напряжения составляет  $360^\circ$  при изменении напряжения управления  $U_y$  в пределах  $\pm 10$  В, что в два раза больше, чем у известных [8–13]. Зависимость сдвига фазы входного сигнала от напряжения управления  $U_y$  линейная, что упрощает построение различных электронных устройств, работа которых основана на фазовом сдвиге.

**Моделирование схемы управляемого фазовращателя.** Для подтверждения достоверности полученных результатов проведено структурное моделирование схемы разработанного УФВ. Составлена имитационная модель в пакете прикладных программ Matlab & Simulink. Структурная схема модели УФВ приведена на рис. 3.

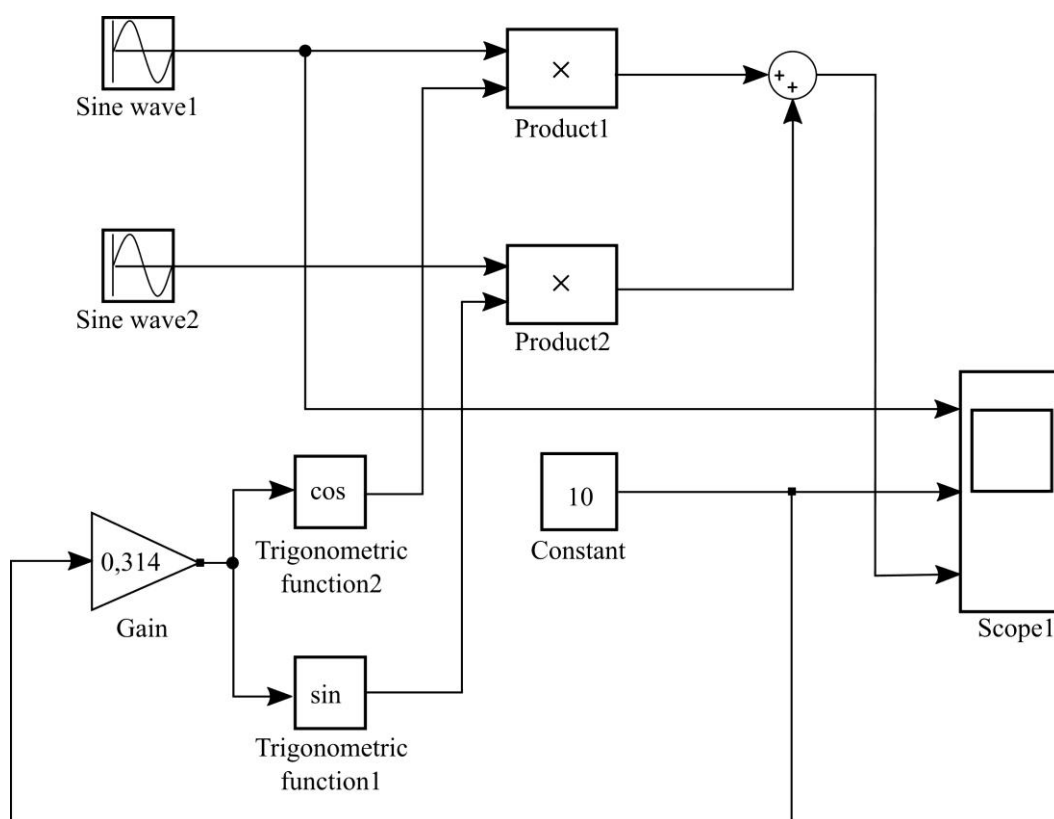


Рис. 3. Структурная схема модели УФВ  
 Fig. 3. Block diagram of the controlled phase shifter model

При моделировании УФВ на вход управления ступенчато подавалось напряжение  $U_y$  от  $-10$  до  $+10$  В через каждые 5 В в течение 2,5 периодов входного напряжения  $u_{вх}$ . На рис. 4 приведены осциллограммы напряжений  $u_{вх}$ ,  $U_y$  и  $u_{вых}$ , полученные в результате моделирования УФВ при  $U_{m\text{ вх}} = 10$  В и частоте входного напряжения  $f_{вх} = 50$  Гц. Из осциллограмм видно, что в первый полупериод ( $0 - \pi$ ) входного напряжения  $u_{вх}$  при напряжении управления  $U_y = -10$  В угол сдвига фазы сигнала  $\varphi = -180^\circ$ ; во втором полупериоде ( $\pi - 2\pi$ ) при напряжении управления  $U_y = -5$  В угол  $\varphi = -90^\circ$ ; в третьем полупериоде ( $2\pi - 3\pi$ ) при напряжении управления  $U_y = 0$  В угол  $\varphi = 0^\circ$ ; в четвертом полупериоде ( $3\pi - 4\pi$ ) при напряжении управления  $U_y = 5$  В угол  $\varphi = 90^\circ$ ; в пятом полупериоде ( $4\pi - 5\pi$ ) при напряжении управления  $U_y = 10$  В угол  $\varphi = 180^\circ$ .

Таким образом, разработанный УФВ обеспечивает сдвиг фазы  $\varphi$  входного сигнала от  $-180$  до  $+180^\circ$ , т. е. на  $360^\circ$  при изменении напряжения управления  $U_y$  от  $-10$  до  $+10$  В. Изменение частоты  $\omega$  не влияет на угол сдвига фазы  $\varphi$ , так как его величина пропорциональна напряжению управления  $U_y$ , поэтому регулировочная характеристика УФВ  $\varphi = f(U_y)$  линейная.



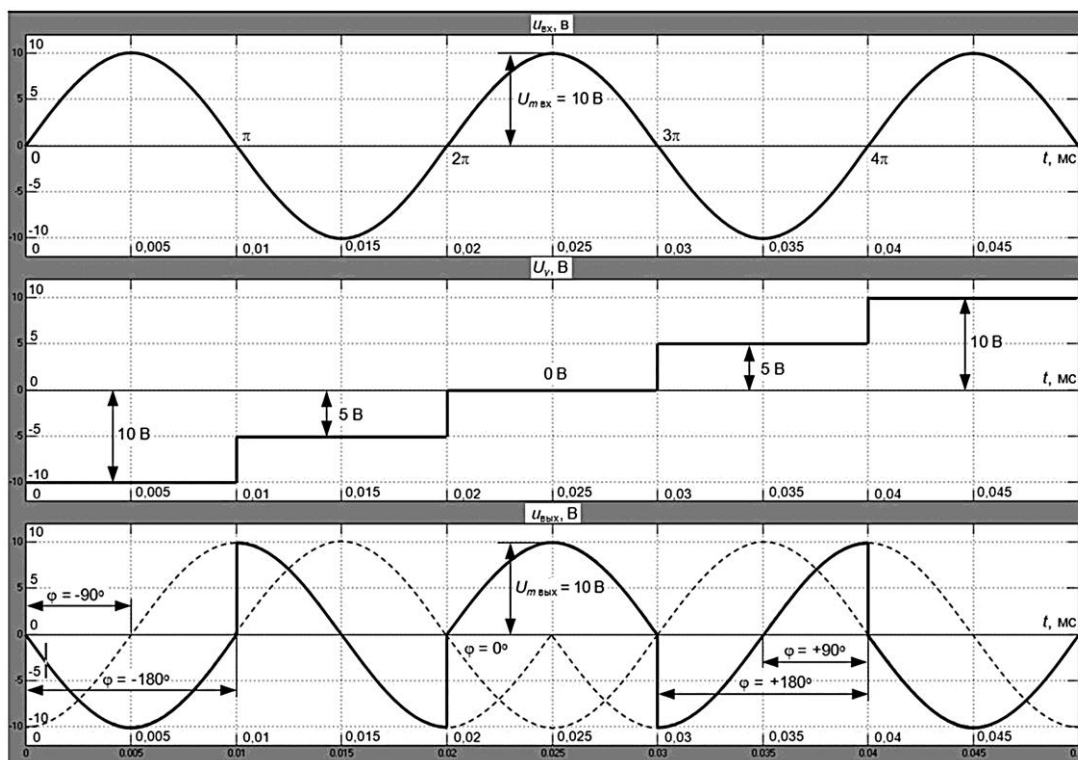


Рис. 4. Осциллограммы напряжений  $u_{вх}$ ,  $U_y$  и  $u_{вых}$   
 Fig. 4. Voltage waveforms of the  $u_{in}$ ,  $U_c$  and  $u_{out}$

При практическом выполнении разработанного УФВ БСФ на  $90^\circ$  можно выполнить по схеме, представленной в [17], ФС – по схеме в [18], а ФК – по схеме в [19]. Частотный диапазон данного УФВ ограничивается максимальной рабочей частотой входящих в него элементов – микросхем операционных усилителей и умножителей напряжений, которая в большинстве случаев составляет порядка 10–20 МГц.

**Заключение.** Разработанный УФВ обеспечивает сдвиг фазы гармонического сигнала в пределах  $360^\circ$ , который не зависит от частоты входного напряжения при сохранении линейности передаточной характеристики. Результаты моделирования УФВ подтвердили его работоспособность и правильность выбора технических решений. Применение разработанного УФВ упрощает построение различных аналоговых формирователей и многофазных генераторов гармонических колебаний, умножителей и делителей частоты, преобразователей переменного напряжения в постоянное и др.

### Литература

1. Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения: учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. 320 с.
2. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 622 с.
3. Основы промышленной электроники: учебник для неэлектротехн. спец. вузов / под ред. В. Г. Герасимова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 336 с.
4. Лабковская Р. Я. Метрология и электрорадиоизмерения: учебник. М.: Нац. открытый ун-т «ИНТУИТ», 2015. 126 с.
5. Кукуш В. Д. Электрорадиоизмерения. М.: Радио и связь, 1985. 368 с.
6. Винокуров В. И., Каплин С. И., Петелин И. Г. Электрорадиоизмерения. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 351 с.

7. **Лоцицкий Б. Н., Мельниченко И. И.** Электрорадиоизмерения. М.: Энергия, 1976. 224 с. (Массовая радиобиблиотека).
8. **Хохлов А. В.** Теоретические основы радиотехники: учеб. пособие для студентов физ. ф-та, ф-та нелинейных процессов и ф-та нано- и биомедицинских технологий. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2005. 295 с.
9. **Титце У., Шенк К.** Полупроводниковая схемотехника / пер. с нем. Г. С. Карабашев. 12-е изд. Т. 2. М.: Додэка-XXI: ДМК Пресс, 2008. 942 с.
10. **Горошков Б. И.** Радиоэлектронные устройства: справочник. М.: Радио и связь, 1984. 400 с.
11. **Пейтон А. Дж., Воли В.** Аналоговая электроника на операционных усилителях / пер. с англ. В. Л. Григорьева; ред. пер. А. П. Молодяну. М.: Бином, 1994. 349 с.
12. **Дубровин В. С.** Управляемые фазовращатели // Южно-Сибирский научный вестник. 2012. № 1 (1). С. 38–39. EDN: PAGHKL.
13. **Дубровин В. С.** Фазовращатель гармонического сигнала // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. № 9-10. С. 192–195.
14. А. с. 1667222 СССР. Управляемый фазовращатель / **В. С. Дубровин**; заявл. 13.10.1988; опубл. 30.07.1991, Бюл. № 28. 3 с.
15. **Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 608 с.
16. Пат. 206198 РФ. Управляемый фазовращатель / **Е. Б. Колесников**; заявл. 11.05.2021; опубл. 30.08.2021, Бюл. № 25. 6 с.
17. Пат. 206074 РФ. Устройство сдвига фазы на 90 градусов / **Е. Б. Колесников**; заявл. 05.04.2021; опубл. 18.08.2021, Бюл. № 23. 7 с.
18. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники / пер. с англ. Б. Н. Бронина и др. 7-е изд. М.: Бином, 2014. 704 с.
19. **Тимонтеев В. Н., Величко Л. М., Ткаченко В. А.** Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Радио и связь, 1981. 113 с.

Статья поступила в редакцию 13.01.2023 г.; одобрена после рецензирования 17.02.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

### Информация об авторе

**Колесников Евгений Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Новомосковского института (филиала) Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева (Россия, 301665, Тульская обл., г. Новомосковск, ул. Дружбы, 8), kolesnikov55@mail.ru

### References

1. Kushnir F. V. *Electrical and radio measurements*, study guide for universities. Leningrad, Energoatomizdat, Leningr. otd-nie Publ., 1983. 320 p. (In Russian).
2. Gusev V. G., Gusev Yu. M. *Electronics*, study guide. 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 622 p. (In Russian).
3. Gerasimov V. G. (ed.). *Fundamentals of industrial electronics*, textbook for non-electrical engineering. spec. of universities. 3rd ed., rev. and upd. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 336 p. (In Russian).
4. Labkovskaya R. Ya. *Metrology and electrical radio measurements*, textbook. Moscow, National Open Univ. "INTUIT", 2015. 126 p. (In Russian).
5. Kukush V. D. *Electrical radio measurements*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 368 p. (In Russian).
6. Vinokurov V. I., Kaplin S. I., Petelin I. G. *Electrical radio measurements*. 2nd ed., rev. and upd. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 351 p.
7. Lozitskiy B. N., Mel'nichenko I. I. *Electrical radio measurements*. Moscow, Energiya Publ., 1976. 224 p. Massovaya radiobiblioteka series. (In Russian).
8. Khokhlov A. V. *Theoretical foundations of radio engineering*, study guide for students of physical, non-linear processes and nano- and biomedical technologies faculties. Saratov, Saratov Univ. Publ., 2005. 295 p. (In Russian).

9. Tietze U., Schenk C., Gamm E. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2019. xxxv, 1793 S.
10. Goroshkov B. I. *Radio-electronic devices*, guide. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984. 400 p. (In Russian).
11. Peyton A. J., Walsh V. *Analog electronics with op-amps: A source book of practical circuits*. Cambridge, New York, Cambridge Univ. Press, 1993. 281 p.
12. Dubrovin V. S. Controllable phase shifters. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik = South-Siberian Scientific Bulletin*, 2012, no. 1 (1), pp. 38–39. (In Russian). EDN: PAGHKL.
13. Dubrovin V. S. Phase shifter of a harmonic signal. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*, 2014, no. 9-10, pp. 192–195. (In Russian).
14. Dubrovin V. S. *Controlled phase shifter*. Copyright certificate 1667222 USSR, publ. 30.07.1991, Bul. no. 28. 3 p. (In Russian).
15. Bronshteyn I. N., Semendyaev K. A. *Mathematics reference book for engineers and technical university students*, study guide. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022. 608 p. (In Russian).
16. Kolesnikov E. B. *Controlled phase shifter*. Patent 206198 RF, publ. 30.08.2021, Bul. no. 25. 6 p. (In Russian).
17. Kolesnikov E. B. *Device for phase quadrature*. Patent 206074 RF, publ. 18.08.2021, Bul. no. 23. 7 p. (In Russian).
18. Horowitz P., Hill W. *The art of electronics*. 2nd ed. Cambridge et al., Cambridge Univ. Press, 1989. 1125 p.
19. Timonteev V. N., Velichko L. M., Tkachenko V. A. *Analog signal multipliers in radio-electronic equipment*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981. 113 p. (In Russian).

The article was submitted 13.01.2023; approved after reviewing 17.02.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

#### **Information about the author**

***Evgeny B. Kolesnikov*** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Power Supply of Industrial Enterprises Department, Novomoskovsk Institute (branch) of Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Russia, 301665, Tula region, Novomoskovsk, Druzhba st., 8), kolesnikov55@mail.ru

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

Полные тексты статей журнала с 2007 по 2022 гг. доступны на сайтах  
Научной электронной библиотеки: [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru) и журнала «Известия  
высших учебных заведений. Электроника»: <http://ivuz-e.ru>

# БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА BIOMEDICAL ELECTRONICS

Научная статья  
УДК 615.47:681.542.32:681.516.3  
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-4-518-528  
EDN: BKWJAW

## Управление удалением жидкости в системе автоматизированного перитонеального диализа

*Н. М. Жило*

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

*nikitazhilo@gmail.com*

**Аннотация.** Переход осмотического агента в кровь при процедуре искусственного внепочечного очищения крови методом перитонеального диализа приводит к снижению скорости удаления излишков жидкости из организма и соответствующим нарушениям водно-солевого баланса. Для решения этой проблемы возможно использование системы автоматического поддержания и регулирования концентрации глюкозы в растворе для перитонеального диализа. В работе предложена система автоматического поддержания концентрации глюкозы в диализирующем растворе с обратной связью, обеспечивающая эффективную продолжительную ультрафильтрацию. Автоматическое управление с обратной связью основано на фотометрическом датчике, математической модели объекта управления и исполнительном устройстве – дозаторе глюкозы. Система испытана на стенде имитации биологического объекта, проходящего процедуру перитонеального диализа. Результаты испытаний показали, что система дает возможность управлять концентрацией глюкозы в диализирующем растворе и скоростью удаления жидкости из биологических объектов и, следовательно, позволяет увеличить продолжительность проведения процедуры внепочечной детоксикации, увеличить скорость удаления жидкости при перитонеальном диализе, снизить потребление расходных материалов, а также повысить безопасность процедуры по сравнению с амбулаторным перитонеальным диализом.

**Ключевые слова:** система управления с обратной связью, алгоритм управления, удаление жидкости, ультрафильтрация, перитонеальный диализ, носимый аппарат «искусственная почка», персонализированная медицина

**Финансирование работы:** работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-37-90049\20).

*Для цитирования:* Жило Н. М. Управление удалением жидкости в системе автоматизированного перитонеального диализа // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 518–528. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-518-528>. – EDN: BKWJAW.

Original article

## Control of fluid removal in an automated peritoneal dialysis system

*N. M. Zhilo*

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

*nikitazhilo@gmail.com*

**Abstract.** The transfer of an osmotic agent into the blood during the procedure of artificial extrarenal blood purification by peritoneal dialysis leads to a decrease in the rate of excess fluid removal from the body and corresponding disturbances in the water-salt balance. To solve this problem, a system for automatic maintaining and regulation of the glucose concentration in a solution for peritoneal dialysis can be used. In this work, a closed-loop system for automatic maintaining of the glucose concentration in the dialysis solution is proposed, which provides effective long-term ultrafiltration. Automatic feedback control is based on a photometric sensor, a mathematical model of the control object and an actuator – a glucose dispenser. The system was tested on a bench simulating a biological object undergoing peritoneal dialysis. The test results showed that the system allows controlling the concentration of glucose in the dialysis solution and the rate of fluid removal from biological objects. Thus, it has been demonstrated that the system allows the increase in the duration of the extrarenal detoxification procedure, the acceleration of fluid removal during peritoneal dialysis, the reduction of expendable materials consumption, and the improvement of the procedure safety compared to ambulatory peritoneal dialysis.

**Keywords:** closed-loop control system, control algorithm, fluid removal, ultrafiltration, peritoneal dialysis, wearable artificial kidney, personalized medicine

**Funding:** the work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-37-90049\20).

**For citation:** Zhilo N. M. Control of fluid removal in an automated peritoneal dialysis system. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 518–528. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-518-528>. – EDN: BKWJAW.

**Введение.** Разработка носимых аппаратов «искусственная почка» для экстракорпоральной детоксикации организма ведется многими научными коллективами [1, 2]. Принцип действия таких аппаратов сводится к регенерации диализирующего раствора – элиминации токсинов и восстановлении отдельных физико-химических характеристик жидкости [3]. Разрабатываемые носимые аппараты искусственного очищения крови должны удовлетворять следующим техническим требованиям [4]:

– малогабаритная и эргономичная система рециркуляции диализирующего раствора;

- обеспечение блоком регенерации диализата соответствующего уровня элиминации уремических токсинов из отработанного диализирующего раствора;
- несущественное изменение компонентного состава и кислотно-основного состояния диализата;
- соразмерное удаление из организма пациента излишков жидкости.

Некоторые прототипы аппаратов «искусственная почка» прошли либо проходят клинические испытания или готовятся к ним [5]. Однако требуется доработка этих аппаратов, чтобы максимально приблизить их показатели к показателям естественной почки человека. Один из таких показателей – продолжительность удаления излишков жидкости из организма пациента, или продолжительность ультрафильтрации, в аппаратах, реализующих метод перитонеального диализа. Данный показатель ограничен длительностью действия раствора для перитонеального диализа (РПД).

Осмотический агент делает раствор гиперосмолярным по отношению к внеклеточной жидкости, в связи с чем жидкость переходит в раствор, т. е. происходит ультрафильтрация. В идеальном случае осмотический агент должен быть одновременно дешевым, биосовместимым, с достаточно малой молекулярной массой для сохранения вязкости РПД, но при этом с большим размером молекул, чтобы не было всасывания через капилляры в кровоток. В литературных источниках описаны испытания разных веществ: глюкозы, глицерина, ксилита, сорбита, фруктозы, маннита, желатина, полимеров глюкозы, полипептидов и т. д. [6]. Большинство из них оказались непригодными ввиду побочных эффектов, например воспалительной активности. Положительный результат отмечен при использовании глицерина, аминокислот и полимеров глюкозы, но в повседневной клинической практике применяются только глюкоза [7], полимеры глюкозы и аминокислоты. Основным недостатком осмотических агентов с низким молекулярным размером – их быстрое всасывание (от 2 до 6 ч), что приводит к потере скорости ультрафильтрации [8] и метаболическим нарушениям [9, 10]. Для решения этой проблемы предлагается система поддержания концентрации глюкозы в РПД, при использовании которой будет измеряться текущая концентрация, рассчитываться и вводиться нужное количество осмотического агента в раствор. Использование такой системы позволит увеличить время искусственной очистки крови, что повысит биосовместимость и безопасность процедуры, так как менее частая замена РПД снижает риск воспаления брюшины и инфицирования.

В настоящей работе предлагается техническая модель, имитирующая осмотический массоперенос в брюшной полости пациента, а также система контроля и поддержания концентрации глюкозы в диализирующем растворе. Обсуждаются состав системы, принципы ее работы и экспериментальные испытания *in vitro*.

**Материалы и методы исследования. Математическая модель массопереноса при перитонеальном диализе.** Для описания транспорта веществ из крови в брюшную полость представим кровь и РПД в виде двух резервуаров, разделенных полупроницаемой мембраной – брюшной стенкой (рис. 1).

Основным математическим аппаратом, применяемым для описания процессов переноса растворителя через полупроницаемую мембрану, является уравнение Старлинга:

$$Q = K \left( \Delta p - \sum_k \sigma_k \Delta \pi_k \right),$$

где  $Q$  – поток ультрафильтрации;  $K = L_m S_m$  – полная гидравлическая проницаемость мембраны;  $L_m$  – средняя гидравлическая проводимость мембраны;  $S_m$  – эффективная площадь мембраны;  $\Delta p = p^b - p^d$  – разность гидростатических давлений в крови и РПД;  $\sigma_k$  – коэффициент отражения Ставермана  $k$ -го вещества;  $\Delta \pi_k = \pi_k^b - \pi_k^d$  – разность осмотических давлений  $k$ -го вещества в крови и РПД.

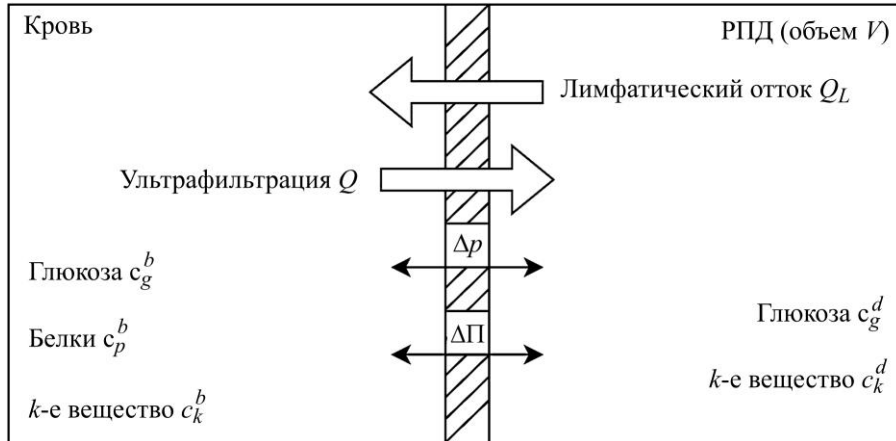


Рис. 1. Модель транспорта веществ при проведении перитонеального диализа  
 Fig. 1. Model of the transport of substances during peritoneal dialysis

Разность осмотических давлений  $k$ -го вещества в рассматриваемой системе в соответствии с уравнением Вант-Гоффа выражается следующим образом:

$$\Delta \pi_k = i_k (c_k^b - c_k^d) RT,$$

где  $i_k$  – изотонический коэффициент;  $c_k^b$  – концентрация  $k$ -го вещества в крови;  $c_k^d$  – концентрация  $k$ -го вещества в РПД;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура.

С учетом разности гидростатических давлений, которая существенно ниже разности осмотических давлений, а также преимущественного вклада глюкозы и белков в осмотическое давление уравнение принимает вид

$$Q = KRT \left( \sigma_g (c_g^d - c_g^b) - (c_p^b - c_p^d) - \sum_k \sigma_k i_k (c_k^b - c_k^d) \right),$$

где  $b$  – индекс для показателей крови;  $d$  – индекс для показателей диализата (РПД).

Для нахождения полного изменения объема жидкости в брюшной полости необходимо учесть, что из нее также происходит лимфатический отток жидкости:

$$\frac{dV}{dt} = Q - Q_L,$$

где  $V$  – объем;  $t$  – время;  $Q$  – поток ультрафильтрации;  $Q_L$  – поток лимфатического оттока.

Массоперенос веществ через перитонеальную мембрану обусловлен диффузией под действием градиента концентраций и конвективным переносом вещества вместе с потоком ультрафильтрации. Тогда изменение массы  $m$  некоторого вещества можно описать следующим образом:

$$\frac{dm}{dt} = k\Delta c + QS\bar{c},$$

где  $k$  – коэффициент массопереноса;  $\Delta c = c^b - c^d$ ;  $S$  – коэффициент просеивания мембраны;  $\bar{c}$  – средневзвешенная концентрация вещества.

Средняя концентрация вещества зависит, помимо разности его концентраций по обе стороны от мембраны, от характеристик мембраны и потока ультрафильтрации:

$$\bar{c} = c^b - \left( \frac{1}{Pe} - \frac{1}{e^{Pe} - 1} \right) \Delta c,$$

где  $Pe = QS/k$  – число Пекле.

Исходя из изложенного можно записать уравнение для массы глюкозы:

$$\frac{dm_g}{dt} = -k_g(c_g^b - c_g^d) + QS \left( c_g^b - \left( \frac{k_g}{QS} - \frac{1}{e^{QS/k_g} - 1} \right) (c_g^b - c_g^d) \right).$$

Динамику концентрации глюкозы можно выразить, представив массу глюкозы как произведение мгновенных значений концентрации глюкозы и объема жидкости в брюшной полости:

$$\frac{dc_g^d(t)}{dt} = \frac{1}{V(t)} \left( -c_g^d(t) \frac{dV(t)}{dt} - k_g(c_g^b - c_g^d) + QS \left( c_g^b - \left( \frac{k_g}{QS} - \frac{1}{e^{QS/k_g} - 1} \right) (c_g^b - c_g^d) \right) \right).$$

Рассматриваемые процессы описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dc_g^d(t)}{dt} = -c_g^d(t) \frac{(Q(t) - Q_L + k_g)}{V(t)} - \frac{Q(t)S - k_g}{V(t)} c_g^b - \left( \frac{k_g}{V(t)} - \frac{SQ(t)/V(t)}{e^{SQ(t)/k_g} - 1} \right) (c_g^b - c_g^d), \\ \frac{dV}{dt} = Q(t) - Q_L, \\ Q(t) = KRT \sigma_g c_g^d(t) - \Delta \pi_r, \\ \Delta \pi_r = KRT \left( \sigma_g c_g^b + c_p^b + \sum_k \sigma_k i_k (c_k^b - c_k^d) \right). \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений позволяет оценить скорость удаления жидкости и текущий объем жидкости в брюшной полости биологического объекта, что дает возможность регулирования интенсивности и продолжительности процедуры.

**Система управления скоростью удаления жидкости.** Техническим решением задачи регулирования скорости ультрафильтрации может стать система управления концентрацией осмотического агента в растворе для перитонеального диализа (рис. 2). Объектом управления является раствор для перитонеального диализа. Управляемые параметры: концентрация глюкозы  $y(t)$ , измеряемая датчиком обратной связи – измерителем концентрации осмотического агента (ДОС1); давление раствора, измеряемое датчиком давления (ДОС2). Выходной сигнал датчика глюкозы (ДОС1)  $z(t)$  сравнивается с целевой концентрацией  $g(t)$ , поступающей от задающего устройства. Полученное отклонение измеренной концентрации от заданной  $e(t)$  поступает на регулятор, выраба-



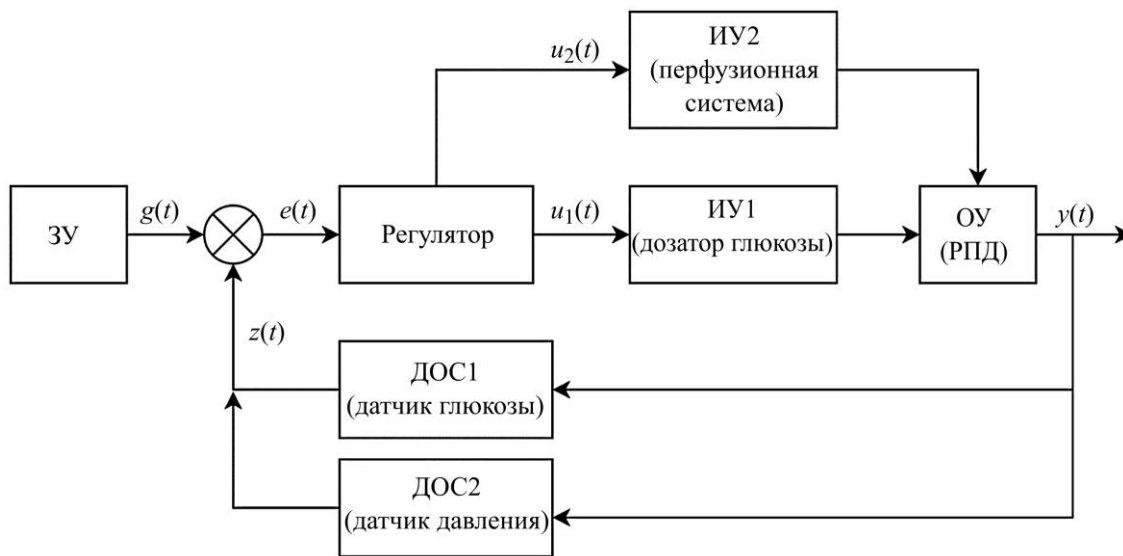


Рис. 2. Структурная схема системы управления концентрацией осмотического агента в растворе для перитонеального диализа в экспериментальном исполнении: ЗУ – задающее устройство; ИУ – исполнительное устройство; ОУ – объект управления (раствор для перитонеального диализа); ДОС – датчик обратной связи;  $g(t)$  – целевая концентрация глюкозы в растворе;  $z(t)$  – сигнал ДОС;  $e(t)$  – отклонение;  $u(t)$  – управляющее воздействие;  $y(t)$  – управляемый параметр (концентрация глюкозы)

Fig. 2. Structural diagram of the control system for the concentration of an osmotic agent in a solution for peritoneal dialysis in an experimental version: ЗУ – master device; ИУ – actuator; ОУ – control object (solution for peritoneal dialysis); ДОС – feedback sensor;  $g(t)$  – the target concentration of glucose in the solution;  $z(t)$  – the ДОС signal;  $e(t)$  – the deviation;  $u(t)$  – the control action;  $y(t)$  – the controlled parameter (glucose concentration)

тывающий управляющее воздействие  $u_1(t)$ , на основании которого исполнительное устройство (ИУ1) – шприцевой насос с концентратом осмотического агента – вводит в раствор рассчитанную дозу вещества, восстанавливающую необходимую концентрацию в объекте управления. Выходной сигнал датчика давления (ДОС2) сравнивается с заданным допустимым диапазоном, при выходе за который перфузионная система (ИУ2) и дозатор останавливаются и включается режим тревоги (падение давления может быть связано с потерей герметичности магистрали, повышение – с пережатием или засорением).

Датчик концентрации глюкозы представляет собой фотометрический датчик, принцип действия которого заключается в измерении ослабления лазерного излучения раствором глюкозы и последующим пересчетом в концентрацию исходя из закона Бугера – Ламберта – Бера. Рабочая длина волны выбрана на пике поглощения глюкозы и равна 1600 нм. Испытания датчика [9] показали, что он позволяет измерять концентрацию глюкозы в растворе для перитонеального диализа в диапазоне 40–220 ммоль/л с относительной погрешностью не более 15 %. Установлено также, что основные диализные метаболиты, такие как мочевины, креатинин и мочевая кислота, не оказывают влияния на измерение концентрации глюкозы.

В качестве дозатора глюкозы разработан шприцевой насос, позволяющий применять шприцы объемом до 30 мл, скоростью введения до 600 мл/ч с дискретностью 0,1 мл/ч. Исполнительным устройством перфузионной системы является перистальтический насос, приводимый в движение шаговым двигателем (объемный расход до 150 мл/мин). Это позволяет изолировать перекачиваемую жидкость от внешней среды, что снижает риск инфицирования и загрязнения раствора. Датчик обратной связи по

давлению жидкости представляет собой микроэлектромеханическое устройство, установленное на печатной плате и подключенное к измеряемой среде через гидрофобный фильтр для исключения попадания жидкости в датчик и загрязнения жидкости извне. Регулятором в технической системе выступает плата управления, центральный элемент которой – микроконтроллер, управляющий ходом процедуры посредством снятия сигналов с датчиков обратной связи, их математической обработки и выдачи соответствующих управляющих сигналов на исполнительные устройства. Целевые значения и режимы процедуры задаются заранее на задающем устройстве, представляющем собой персональный компьютер с программным обеспечением собственной разработки, подсоединенный к плате управления. Программное обеспечение предназначено также для сбора и обработки информации, поступающей из системы управления. Внешний вид собранного устройства представлен на рис. 3.

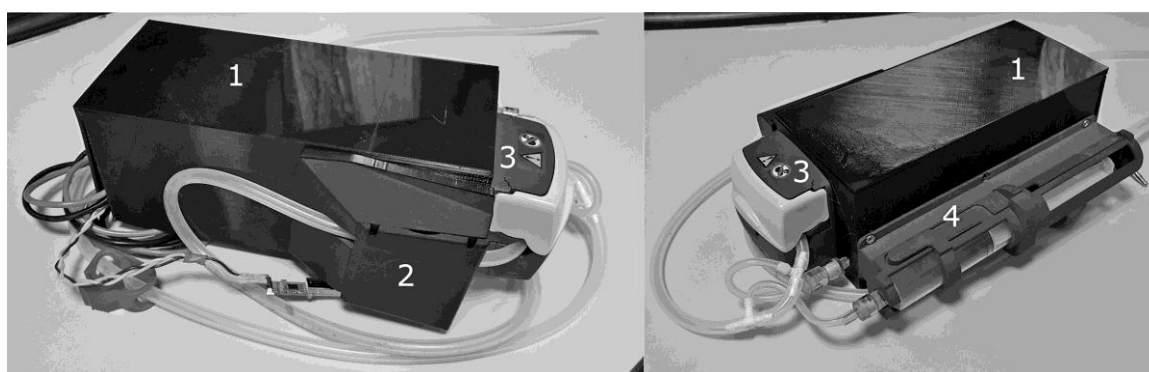


Рис. 3. Внешний вид технической реализации системы управления: 1 – корпус с электроникой; 2 – оптический датчик глюкозы; 3 – перистальтический насос; 4 – шприцевой насос-дозатор  
 Fig. 3. Photo of technical implementation of control system: 1 – housing with electronics; 2 – optical glucose sensor; 3 – peristaltic pump; 4 – syringe dosing pump

**Испытательный стенд.** Для испытаний технической системы разработан стенд, имитирующий процессы массопереноса в биологическом объекте при проведении процедуры искусственного очищения крови методом перитонеального диализа (рис. 4).

Роль полупроницаемой брюшной мембраны выполняет гемодиализатор AQUAMAX HF03 (Nikkiso, Япония), выбранный в связи с малыми размерами: площадь полиэфирсульфонной мембраны  $0,3 \text{ м}^2$ , диаметр волокна 200 мкм, толщина мембраны 30 мкм, объем заполнения 32 мл. С учетом отношения объемов жидкости в человеке и стенде площадь мембраны гемодиализатора близка площади брюшной мембраны человека ( $\sim 1 \text{ м}^2$ ). Диализатор связывает термостабилизированные объемы емкостей «брюшная полость» и «пациент» с помощью термостатов объемом 30 л, мощностью 2000 Вт, точностью  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , неравномерностью  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (Daihan Scientific, Южная Корея). В состав стенда также входят перистальтические насосы для перемещения и перемешивания жидкостей и биохимический анализатор для контрольных измерений. Емкость «брюшная полость» (1 л) представляет собой модельный раствор на основе дистиллированной воды с добавлением глюкозы (80 ммоль/л). Перемешивание осуществляется за счет магнитной мешалки при  $T = 37 \text{ }^\circ\text{C}$ . Емкость «пациент» (20 л) – это модельный раствор на основе дистиллированной воды с добавлением глюкозы (5 ммоль/л). Перемешивание проводится стеклянной палочкой перед взятием пробы при  $T = 37 \text{ }^\circ\text{C}$ . В связи с незначительным количеством глюкозы, переходящей из емкости «брюшная полость»

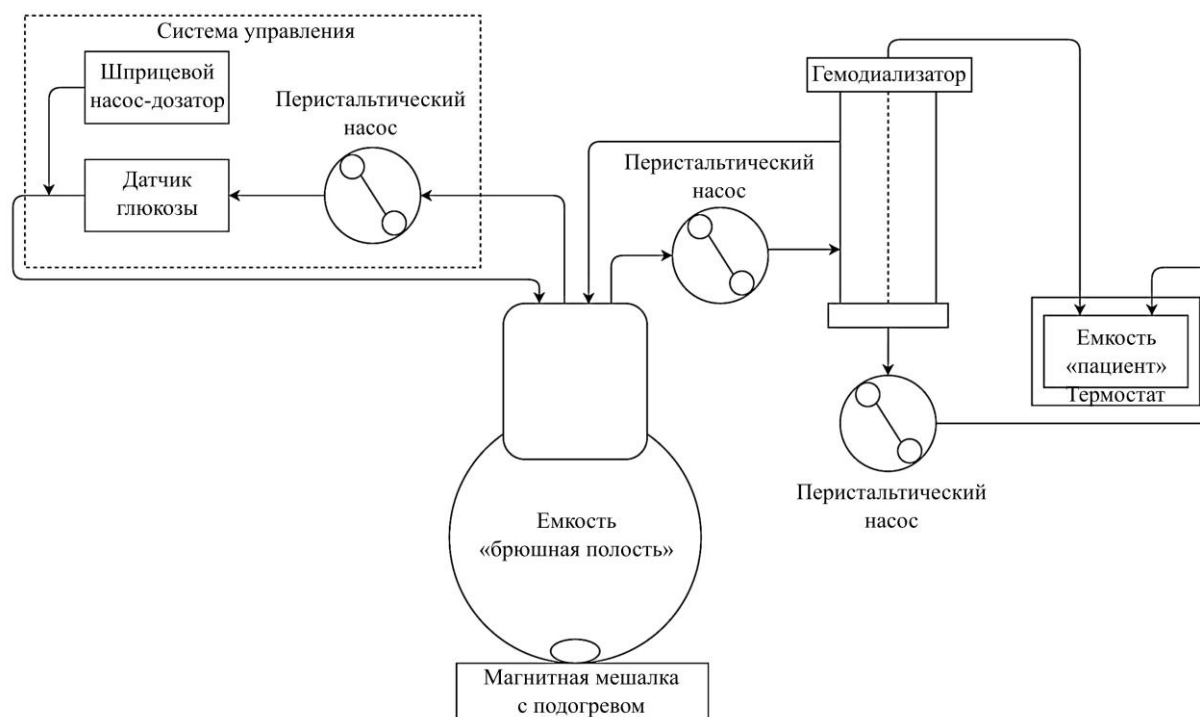


Рис. 4. Структурная схема испытательного стенда  
 Fig. 4. Structural diagram of the test bench

(расчетное увеличение концентрации до 6,5 ммоль/л за 4 ч), функция имитации работы поджелудочной железы (стабилизация концентрации глюкозы около 5 ммоль/л отсутствует). Раствор на основе дистиллированной воды с добавлением глюкозы (30 г на 100 мл) – инфузат – заправлен в шприц, установленный в дозатор глюкозы.

Цель проводимого эксперимента – опытная проверка функционирования системы управления, оценка продолжительности и точности поддержания заданного уровня концентрации осмотического агента. Программа четырехчасового эксперимента следующая:

1. Подготовка стенда – установка и соединение гидравлических элементов силиконовыми трубками, прогрев емкостей в термостатах, приготовление модельных растворов и концентрата глюкозы.

2. Старт процедуры с установкой на задающем устройстве режима по поддержанию концентрации глюкозы с целевым значением не менее 40 ммоль/л.

3. Фиксация показаний датчика глюкозы и измерение объема жидкости в емкости «брюшная полость» каждые 15 мин.

4. Фиксация концентрации глюкозы в емкостях «пациент» и «брюшная полость» с использованием лабораторного спектрофотометра и запись объема введенного системой концентрата каждые 60 мин.

5. Замена шприца с концентратом при его опустошении по сообщению от системы управления.

**Результаты и их обсуждение.** В таблице приведены данные по концентрации глюкозы и объему удаленной жидкости (ультрафильтрата) в ходе эксперимента.

**Результаты функционирования системы управления с обратной связью**  
**Results of functioning of the closed-loop control system**

Продолжительность эксперимента, мин	Концентрация глюкозы, ммоль/л			Удаленная жидкость, мл	Болюс концентрата, мл
	Датчик глюкозы	Емкость «брюшная полость»	Емкость «пациент»		
0	81,1	81,6	5,0	0	–
15	54,8	–	–	120	–
30	51,1	–	–	238	–
45	47,4	–	–	415	–
60	45,0	43,6	5,1	590	22,9
75	58,1	–	–	816	–
90	46,5	–	–	936	–
105	46,6	–	–	1110	–
120	43,4	42,0	5,8	1275	23,9
135	54,2	–	–	1432	–
150	50,0	–	–	1661	–
165	48,9	–	–	1843	–
180	43,9	42,4	5,9	2017	23,6
195	54,5	–	–	2202	–
210	48,9	–	–	2345	–
225	47,9	–	–	2500	–
240	45,2	42,4	6,7	2622	–

Из результатов эксперимента видно, что разработанный стенд позволяет моделировать массоперенос из крови в диализат через брюшную мембрану пациента. При использовании данного стенда проведена апробация технической системы управления скоростью удаления жидкости в режиме поддержания концентрации осмотического агента. На протяжении 4 ч система проводила измерения концентрации глюкозы в емкости «брюшная полость» и один раз в час – коррекцию путем введения концентрата. По итогам испытания сделан вывод о том, что система может управлять концентрацией глюкозы в диализирующем растворе и удалять жидкость при проведении процедуры. По окончании эксперимента, через 4 ч, объем удаленной жидкости составил 2622 мл, было израсходовано 70 мл концентрата глюкозы с содержанием глюкозы 1670 ммоль/л.

**Заключение.** Разработанная техническая система управления с обратной связью для автоматизации удаления излишков жидкости при проведении искусственного очищения крови методом перитонеального диализа с управлением концентрацией глюкозы в диализирующем растворе на основе обратной связи по данным непрерывного мониторинга концентрации глюкозы реализует метод управления концентрацией глюкозы в растворе для перитонеального диализа и позволяет поддерживать концентрацию глюкозы в физиологически допустимом диапазоне. Предложенный метод управления скоростью удаления жидкости из биологических объектов позволяет повысить эффективность процедуры низкопоточной внепочечной детоксикации, в том числе увеличить продолжительность и скорость удаления жидкости при перитонеальном диализе до двух раз по сравнению с амбулаторным перитонеальным диализом, а также снизить риск возникновения инфекций и потребление расходных материалов.

## Литература

1. Hueso M., Navarro E., Sandoval D., Cruzado J. M. Progress in the development and challenges for the use of artificial kidneys and wearable dialysis devices // *Kidney Dis.* 2019. Vol. 5. Iss. 1. P. 3–10. <https://doi.org/10.1159/000492932>
2. Himmelfarb J., Ratner B. Wearable artificial kidney: Problems, progress and prospects // *Nat. Rev. Nephrol.* 2020. Vol. 16. Iss. 10. P. 558–559. <https://doi.org/10.1038/s41581-020-0318-1>
3. Пат. 2692329 РФ. Способ искусственного очищения крови с регенерацией диализирующего раствора в экстракорпоральном контуре и устройство для его осуществления / **Н. А. Базаев**; заявл. 21.04.2017; опубл. 24.06.2019, Бюл. № 18. 11 с.
4. Salani M., Roy S., Fissell W. H. (IV). Innovations in wearable and implantable artificial kidneys // *Am. J. Kidney Dis.* 2018. Vol. 72. Iss. 5. P. 745–751. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2018.06.005>
5. Nagasubramanian S. The future of the artificial kidney // *Indian Journal of Urology.* 2021. Vol. 37. Iss. 4. P. 310–317. [https://doi.org/10.4103/iju.IJU\\_273\\_21](https://doi.org/10.4103/iju.IJU_273_21)
6. How to improve the biocompatibility of peritoneal dialysis solutions (without jeopardizing the patient's health) / **M. Bonomini, V. Masola, G. Procino et al.** // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22. Iss. 15. Art. No. 7955. <https://doi.org/10.3390%2Fijms22157955>
7. Krediet R. T. Acquired decline in ultrafiltration in peritoneal dialysis: The role of glucose // *JASN.* 2021. Vol. 32. Iss. 10. P. 2408–2415. <https://doi.org/10.1681/ASN.2021010080>
8. Krediet R. T. Ultrafiltration failure is a reflection of peritoneal alterations in patients treated with peritoneal dialysis // *Front. Physiol.* 2018. Vol. 9. Art. ID: 1815. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01815>
9. The osmo-metabolic approach: A novel and tantalizing glucose-sparing strategy in peritoneal dialysis / **M. Bonomini, V. Zammit, J. C. Divino-Filho et al.** // *J. Nephrol.* 2021. Vol. 34. Iss. 2. P. 503–519. <https://doi.org/10.1007%2Fs40620-020-00804-2>
10. Insulin resistance in cardiovascular disease, uremia, and peritoneal dialysis / **M. Lambie, M. Bonomini, S. J. Davies et al.** // *Trends Endocrinol. Metab.* 2021. Vol. 32. Iss. 9. P. 721–730. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2021.06.001>
11. **Жило Н. М., Михайлов М. О., Литинская Е. Л., Пожар К. В.** Метод ИК-фотометрии для измерения концентрации глюкозы в растворе для перитонеального диализа // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника.* 2021. Т. 24. № 4. С. 68–78. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-68-78>

Статья поступила в редакцию 11.01.2023 г.; одобрена после рецензирования 30.01.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

## Информация об авторе

**Жило Никита Максимович** – инженер Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), [nikitazhilo@gmail.com](mailto:nikitazhilo@gmail.com)

## References

1. Hueso M., Navarro E., Sandoval D., Cruzado J. M. Progress in the development and challenges for the use of artificial kidneys and wearable dialysis devices. *Kidney Dis.*, 2019, vol. 5, iss. 1, pp. 3–10. <https://doi.org/10.1159/000492932>
2. Himmelfarb J., Ratner B. Wearable artificial kidney: Problems, progress and prospects. *Nat. Rev. Nephrol.*, 2020, vol. 16, iss. 10, pp. 558–559. <https://doi.org/10.1038/s41581-020-0318-1>
3. Bazaev N. A. *Method of artificial blood purification with dialysis solution regeneration in extracorporeal circuit and device for its implementation.* Patent 2692329 RF, publ. 24.06.2019, Bul. no. 18. 11 p. (In Russian).
4. Salani M., Roy S., Fissell W. H. (IV). Innovations in wearable and implantable artificial kidneys. *Am. J. Kidney Dis.*, 2018, vol. 72, iss. 5, pp. 745–751. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2018.06.005>
5. Nagasubramanian S. The future of the artificial kidney. *Indian Journal of Urology*, 2021, vol. 37, iss. 4, pp. 310–317. [https://doi.org/10.4103/iju.IJU\\_273\\_21](https://doi.org/10.4103/iju.IJU_273_21)
6. Bonomini M., Masola V., Procino G., Zammit V., Divino-Filho J. C., Arduini A., Gambaro G. How to improve the biocompatibility of peritoneal dialysis solutions (without jeopardizing the patient's health). *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, vol. 22, iss. 15, art. no. 7955. <https://doi.org/10.3390%2Fijms22157955>

7. Krediet R. T. Acquired decline in ultrafiltration in peritoneal dialysis: The role of glucose. *JASN*, 2021, vol. 32, iss. 10, pp. 2408–2415. <https://doi.org/10.1681/ASN.2021010080>
8. Krediet R. T. Ultrafiltration failure is a reflection of peritoneal alterations in patients treated with peritoneal dialysis. *Front. Physiol.*, 2018, vol. 9, art. ID: 1815. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01815>
9. Bonomini M., Zammit V., Divino-Filho J. C., Davies S. J., Di Liberato L., Arduini A., Lambie M. The osmo-metabolic approach: A novel and tantalizing glucose-sparing strategy in peritoneal dialysis. *J. Nephrol.*, 2021, vol. 34, iss. 2, pp. 503–519. <https://doi.org/10.1007%2Fs40620-020-00804-2>
10. Lambie M., Bonomini M., Davies S. J., Accili D., Arduini A., Zammit V. Insulin resistance in cardiovascular disease, uremia, and peritoneal dialysis. *Trends Endocrinol. Metab.*, 2021, vol. 32, iss. 9, pp. 721–730. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2021.06.001>
11. Zhilo N. M., Mikhailov M. O., Litinskaia E. L., Pozhar K. V. IR-photometry method for measuring glucose concentration in peritoneal dialysis fluid. *Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 68–78. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-4-68-78>

The article was submitted 11.01.2023; approved after reviewing 30.01.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

#### **Information about the author**

**Nikita M. Zhilo** – Engineer of the Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), [nikitazhilo@gmail.com](mailto:nikitazhilo@gmail.com)

### **Вниманию читателей журнала**

#### **«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

##### **Подписку на печатную версию журнала можно оформить:**

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

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

- Научной электронной библиотеки: [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)
- ООО «Агентство «Книга-Сервис»: [www.rucont.ru](http://www.rucont.ru); [www.akc.ru](http://www.akc.ru);  
[www.prensa-rf.ru](http://www.prensa-rf.ru)
- ООО «Урал-Пресс Округ»: [www.delpress.ru](http://www.delpress.ru)
- ООО «ИВИС»: [www.ivis.ru](http://www.ivis.ru)

# ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Научная статья  
УДК 65.011.56  
doi:10.24151/1561-5405-2023-28-4-529-536  
EDN: BAFXHZ

## Методика перехода к электронным конструкторским документам для автоматизации нормоконтроля

*Е. С. Кузнецова*

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

*e.s.kuznetsova@inbox.ru*

**Аннотация.** Правильность выполнения конструкторских документов – важный фактор при проектировании изделий специального назначения. Ошибки в конструкторских документах влияют на срок изготовления, качество изделия и его стоимость. В работе представлена методика перехода к электронным конструкторским документам для автоматизации нормоконтроля как способ улучшения качества конструкторской документации. Разработана модель проверки электронных конструкторских документов для уменьшения количества ошибок в них. Проанализированы отличия традиционной модели от разработанной. Описаны процессы автоматизированной проверки конструкторских документов. Предлагаемая методика является результативной и позволяет с точки зрения нормоконтроля осуществить переход к электронным конструкторским документам.

**Ключевые слова:** нормоконтроль, автоматизация нормоконтроля, электронная конструкторская документация, управление жизненным циклом изделия

**Для цитирования:** Кузнецова Е. С. Методика перехода к электронным конструкторским документам для автоматизации нормоконтроля // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 529–536. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-529-536>. – EDN: BAFXHZ.

## **Procedure of transition to electronic engineering drawings for regulatory document control automation**

*E. S. Kuznetsova*

*“Submicron Research Institute” JSC, Moscow, Russia*

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

*e.s.kuznetsova@inbox.ru*

**Abstract.** The correctness of engineering drawings implementation is an important factor in the design of special-purpose products. Errors in engineering drawings affect production time, quality and cost of the product. In this work, a procedure of transition to electronic engineering drawings is presented for regulatory document control automation as method of improvement in engineering drawings quality. The electronic engineering drawings examination model for decreasing the number of errors in them has been developed. The developed model differences with traditional model are analyzed. Engineering drawings' automated control processes are described. The proposed procedure is efficient and allows the transition to electronic engineering drawings in terms of regulatory document control.

**Keywords:** regulatory document control, regulatory document control automation, electronic engineering drawings, product lifecycle management

**For citation:** Kuznetsova E. S. Procedure of transition to electronic engineering drawings for regulatory document control automation. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 529–536. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-529-536>. – EDN: BAFXHZ.

**Введение.** Для улучшения качества конструкторских документов и, следовательно, выпускаемых изделий специального назначения необходимым является автоматизация нормоконтроля. Понятие «нормализационный контроль чертежей» впервые было регламентировано ГОСТ 5293–50 [1] как новый вид работ наряду с характером работы (разработал, проверил, утвердил). Отдельные упоминания о нормализационном контроле появлялись в публикациях по стандартизации в 1950-х гг. Книга по данной тематике вышла в свет в 1958 г. [2]. На государственном уровне деятельность нормоконтроля была регламентирована ГОСТ 2.111–68 [3]. Первый выпуск стандарта аналогичен современной версии и включает в себя набор параметров, необходимых при проведении нормоконтроля конструкторских документов.

В основе нормоконтроля лежит деятельность по достижению оптимальной степени упорядоченности [4]. Существуют два направления нормоконтроля: «сличительный» и активный. Первое направление представляет собой сверку ключевых параметров и документов на соответствие требованиям Единой системы конструкторской документации. Второе направление предполагает не только сверку, но и внесение предложений по замене уникальных составляющих изделия на стандартные или ранее разработанные [5]. Соответственно, в данном случае необходима высокая квалификация специалистов и глубокое понимание не только стандартов, но и специфики разрабатываемых изделий.



Однако в настоящее время отсутствуют государственные программы по обучению нормоконтролеров, организации и проведению нормоконтроля обучают только на коммерческих курсах. В то же время в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58182-2018 [6] специалисту по нормоконтролю необходимо получать документ о повышении квалификации по нормоконтролю технической документации не реже чем каждые 5 лет.

Таким образом, качество проведения нормоконтроля зависит от множества факторов, в том числе от нормоконтролера (при комплексной стандартизации является большим риском допустить ошибки в конструкторской документации). С ухудшением качества проверки конструкторских документов нормоконтролером возрастает необходимость нормоконтроля в целом. Также на качество нормоконтроля влияет его положение в иерархии организации. В том случае, если нормоконтроль подчиняется разработчикам документов, на качество разрабатываемых изделий он не влияет. Для получения преимуществ от проверки конструкторской документации нормоконтроль не должен находиться в зависимом положении от разработчиков конструкторской документации, а должен быть интегрирован в общую структуру организации как самостоятельная единица.

**Разработка модели проведения автоматизированного нормоконтроля.** При проектировании изделий специального назначения важно достичь оптимальной степени упорядоченности данного процесса. Стандартизация – научный метод работы, основанный на единых оптимальных требованиях к объекту [7]. Соответственно, необходимо выделить отдельные объекты, чтобы по отношению к каждому из них разработать оптимальные требования.

В современных реалиях приоритетным является выпуск изделия в соответствии с требуемыми характеристиками и в заданный срок. В первую очередь автоматизация нормоконтроля будет направлена на подготовку производства. Традиционная модель проведения нормоконтроля (рис. 1) представляет собой проверку бумажной конструкторской документации нормоконтролером на соответствие требованиям нормативных документов [8]. Корректно оформленные документы передаются на хранение в архив организации.



Рис. 1. Модель традиционного проведения нормоконтроля  
Fig. 1. Traditional regulatory document control model

Основной упор делается на формальную проверку бумажных чертежей без учета возможностей производства и данных исходных файлов. Полностью правильно оформленная конструкторская документация не гарантирует возможности изготовления изделия. В таком случае может возникнуть проблема, например, из-за ручной простановки размеров деталей. На чертеже они могут быть проставлены верно, но так как на производство передается электронный файл, деталь будет изготовлена по фактическим размерам из электронного файла. Из-за этого могут возникнуть трудности при сборке изделия. Рассмотрим, как с помощью автоматизации отследить такие ошибки при проверке бумажных чертежей.

В результате анализа традиционной модели разработана новая модель проведения нормоконтроля (рис. 2), в которой большая часть конструкторской документации создается с помощью САПР, поэтому файлы по каждому изделию проверяются и хранятся в электронном виде. Разработчик конструкторской документации передает на нормоконтроль бумажные чертежи и электронные файлы. Первично проводится нормоконтроль электронных файлов конструкторских документов. Модель разработана для организации, где изделия проектируются с помощью программ «КОМПАС-3D», Altium Designer, 1С:PLM. При проектировании в «КОМПАС-3D» есть возможность использовать «КОМПАС-Эксперт» для проверки. Общая концепция разработанной модели позволяет применять такой подход с использованием и других программ.

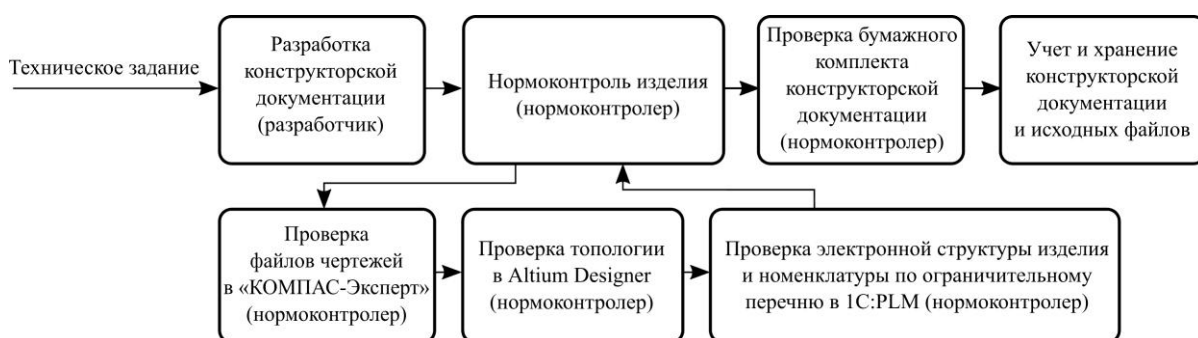


Рис. 2. Разработанная модель проведения автоматизированного нормоконтроля  
 Fig. 2. Developed model of automated regulatory document control

### Организация автоматизированной проверки конструкторских документов.

Для решения вопроса передачи электронных файлов на нормоконтроль необходимо упорядочить информацию и ее актуальность по поступлению и внесению изменений для составления приоритетности задач и очереди проверки файлов. Передача файлов организована в информационной системе 1С:PLM. Дополнительные преимущества использования 1С:PLM заключаются в автоматизации учета проверяемой документации, а также в удобстве получаемых оповещений при поступлении каждой новой задачи (рис. 3).

Тема	Номер
Стенд контроля	18
Жгуты на проверку	19
Проверка чертежей	20
Блок	23
Жгуты на проверку	22
.305642.422 Комплект упаковки; .305642.423 Комплект упаковки	24
Жгут заземления	25
.685621.552	26
.685621.556	29
.468213.209 Устройство	30

Рис. 3. Задачи на проведение нормоконтроля в 1С:PLM  
 Fig. 3. Tasks to perform regulatory document control in 1С:PLM

В 1С:PLM можно прикреплять не только электронные файлы документов, но и электронную структуру изделия (ЭСИ), которая играет большую роль в стандартизации при проектировании современных изделий [9]. В соответствии с ГОСТ 2.102-2013 [10] ЭСИ является основным конструкторским документом и используется совместно или вместо спецификации изделия [11]. ЭСИ представляет собой набор данных об изделии, необходимых при проектировании и производстве. ЭСИ создается в начале проектирования (после получения технического задания) и наполняется в процессе проектирования до передачи конструкторской документации в архив организации. Так как наполнение ЭСИ осуществляется разными отделами, необходимо точное разграничение ответственности по заполнению параметров. ЭСИ не является электронной версией спецификации, поэтому может содержать дополнительные данные, необходимые при производстве и эксплуатации изделия. Наполнение ЭСИ происходит из традиционных разделов спецификации: документации, сборочных единиц, деталей, стандартных изделий, прочих изделий, комплектов и др. Документация, сборочные единицы и детали создаются вручную, а наполнение стандартных и прочих изделий происходит из ограничительного перечня организации, который реализован на базе информационной системы.

Ограничительным перечнем в 1С:PLM является конструкторско-технологический справочник. Наполнение справочника проводится в соответствии с внутренним регламентом организации с учетом актуальной информации по каждому элементу из перечня (возможность его закупки и допустимость использования в тех или иных изделиях). Таким образом, при создании ЭСИ разработчик конструкторской документации использует только допустимые элементы, чем обеспечивается унификация при проектировании.

Проведение нормоконтроля ЭСИ осуществляется с целью минимизации ошибок при проектировании и изготовлении. В свою очередь, имеется возможность автоматизированно формировать конструкторские отчеты из ЭСИ, которые после согласования [12] могут использоваться в качестве конструкторских документов. Таким образом, благодаря автоматизации процесса формирования документов минимизируется возможность возникновения ошибок в номенклатуре элементов изделия и обеспечивается оптимальный уровень унификации. В 1С:PLM также есть возможность создания технологической ЭСИ и автоматизированного формирования технологических отчетов в соответствии с требованиями Единой системы технологической документации [13].

Еще одной возможностью для автоматизации нормоконтроля является использование автоматической проверки файлов конструкторских документов в КОМПАС-Эксперт. Программа позволяет осуществлять поиск ошибок, таких как несоответствие размеров заявленным, несоответствие формы и положения объектов, а также проверку орфографии и пунктуации (рис. 4). Программа регулярно обновляется, поэтому со временем с ее помощью может быть устранено большее количество ошибок в конструкторской документации. На сегодняшний день возможности программы КОМПАС-Эксперт не охватывают всех требований Единой системы конструкторской документации, поэтому автоматическая проверка чертежей может являться только предварительным этапом. Преимущество программы заключается в быстром и точном нахождении несоответствий проверяемых параметров, которые могут быть упущены нормоконтролером, а некоторые из них вообще не могут быть обнаружены в ходе проверки бумажных чертежей. Основным недостатком является невозможность рецензирования проверяемых конструкторских документов, что приводит к увеличению трудоемкости процесса проверки. Информационная система 1С:PLM также не позволяет осуществлять рецензирование файлов документов, но этот функционал реализован в других системах управления жизненным циклом изделия, таких как Лощман PLM, Союз PLM и др.

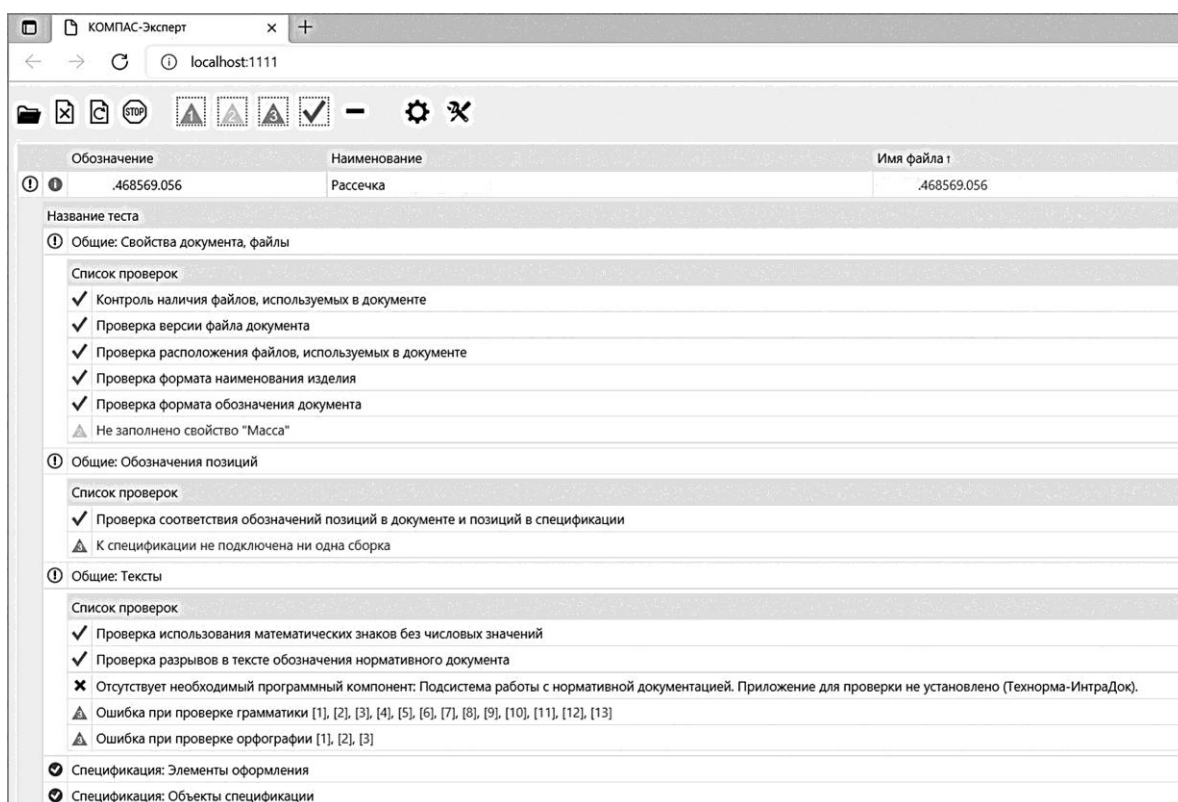


Рис. 4. Отчет о проведении проверки конструкторского документа в КОМПАС-Эксперт  
 Fig. 4. Engineering drawing screening report in KOMPAS-Expert

Топологии печатных плат также могут быть проверены нормоконтролером в электронном виде. Это помогает определить соответствие конструкторской документации и топологии при передаче электронных файлов в архив организации. Проверка проводится в соответствии с чек-листом, и контролируются ключевые для организации параметры. Основную проверку топологии осуществляет разработчик, но необходимость проверки файлов нормоконтролером обусловлена требованиями нормативных документов.

При проведении нормоконтроля и его автоматизации важно точное разграничение ответственности за определенные параметры составных частей конструкторских документов. Автоматизации подлежат все операции, которые возможно автоматизировать с учетом технического оснащения организации. Кроме проверки вновь разработанных изделий, нормоконтроль осуществляет проверку всех изменений, вносимых в документацию. Фрагмент алгоритма взаимного влияния изменений на разрабатываемую конструкторскую документацию представлен на рис. 5.

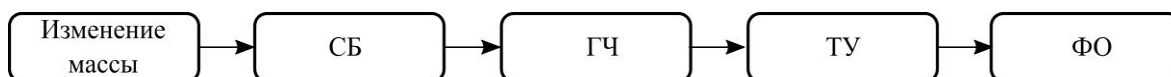


Рис. 5. Фрагмент алгоритма влияния взаимных изменений на разрабатываемую документацию (СБ – сборочный чертеж; ГЧ – габаритный чертеж; ТУ – технические условия; ФО – формуляр)  
 Fig. 5. Fragment of algorithm of reciprocal changes influence on documents under development (СБ – assembly drawing; ГЧ – dimensional drawing; ТУ – technical conditions; ФО – form)

**Заключение.** Рассмотренная автоматизированная модель проверки конструкторских документов внедрена в работу организации. Модель показала свою результативность. Проведение нормоконтроля файлов конструкторских документов привело к уменьшению количества ошибок в конструкторской документации и сокращению времени проведения нормоконтроля. Использование ЭСИ в качестве первичного документа, содержащего всю информацию об изделии, и наполнение ее из конструкторско-технологического справочника упростили процесс изготовления изделий и уменьшили количество ошибок в процессе проектирования. Предложенная методика автоматизации нормоконтроля позволяет работать с документами в электронном виде, которые создаются на всех этапах разработки с использованием информации из ЭСИ.

Таким образом, автоматизация позволяет систематизировать процесс проведения нормоконтроля, что соответствует требованиям по стандартизации и унификации изделий. Полученный результат позволяет определить дальнейший курс автоматизации нормоконтроля в организации.

### *Литература*

1. ГОСТ 5293–50. Система чертежного хозяйства. Основные надписи (угловые штампы) и спецификации на чертежах изделий основного производства // Система чертежного хозяйства. ГОСТ 5290–50 – ГОСТ 5302–50: сборник ГОСТов. М.: Стандартгиз, 1950. С. 13–17.
2. **Пастер И. Д., Страшунский А. М.** Нормализационный контроль чертежей. М.: Оборонгиз, 1958. 72 с.
3. ГОСТ 2.111–68. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Нормоконтроль. М.: Стандартинформ, 1968. 8 с.
4. ГОСТ 1.0–85. Государственная система стандартизации. Основные положения // Государственная система стандартизации. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1986. С. 3–20.
5. **Соколов А. А., Дворянkin А. М., Ужва А. Ю.** Разработка метода автоматизации процесса нормоконтроля технической документации // Изв. ВолГТУ. 2013. № 22 (125). С. 114–118. EDN: RPEYUJ.
6. ГОСТ Р 58182–2018. Требования к экспертам и специалистам. Нормоконтролер технической документации. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019. III, 7 с.
7. **Григорьева Л. И., Богданов М. В., Демидов И. К.** Нормоконтроль: Методика и организация. М.: Изд-во стандартов, 1991. 190 с.
8. **Балабанов А. Н.** Контроль технической документации. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Изд-во стандартов, 1988. 350 с.
9. ГОСТ 2.053–2013. Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2014. II, 9 с.
10. ГОСТ 2.102–2013. Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов. М.: Стандартинформ, 2014. II, 12 с.
11. **Кузнецова Е. С., Орлов И. А., Чукин П. Е., Хасанов Р. Ш.** Автоматизация контроля конструкторской документации методом перехода к электронной структуре изделия // Стандартизация оборонной продукции: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф. (Республика Крым, г. Ялта, 14–17 сент. 2021 г.). Ялта: НИИСУ, 2021. С. 110–114.
12. **Кузнецова Е. С., Федюнина Е. А., Орлов И. А., Чукин П. Е.** Разработка алгоритма процесса согласования документов в 1С:PLM // Электронные информационные системы. 2022. № 1 (32). С. 48–58. EDN: QWTYLC.
13. **Кузнецова Е. С., Орлов И. А., Чукин П. Е.** Автоматизация процесса создания ведомости материалов изделий специальной техники в 1С:PLM // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2022. № 4 (188). С. 55–59. [https://doi.org/10.52190/2073-2597\\_2022\\_4\\_55](https://doi.org/10.52190/2073-2597_2022_4_55)

Статья поступила в редакцию 19.01.2023 г.; одобрена после рецензирования 25.01.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

### Информация об авторе

**Кузнецова Елена Станиславовна** – ведущий инженер-конструктор АО «НИИ «Субмикрон» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр-т, 5, стр. 2), аспирант Института микроприборов и систем управления имени Л. Н. Преснухина Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), e.s.kuznetsova@inbox.ru

### References

1. GOST 5293–50. System of engineering drawing organization. Main lettering (title blocks) and specifications on the products drawings of the core production. *Sistema chertezhnogo khozyaystva. GOST 5290–50 – GOST 5302–50*, collection of government standards. Moscow, Standartgiz Publ., 1950, pp. 13–17. (In Russian).
2. Paster I. D., Strashunskiy A. M. *Normalization control of drawings*. Moscow, Oborongiz Publ., 1958. 72 p. (In Russian).
3. GOST 2.111–68. *Unified system for design documentation. Normocontrol*. Moscow, Standartinform Publ., 1968. 8 p. (In Russian).
4. GOST 1.0–85. *State system of standardization. Basic provisions*. Moscow, Gos. komitet SSSR po standartam Publ., 1986, pp. 3–20. (In Russian).
5. Sokolov A. A., Dvoryankin A. M., Uzhva A. Yu. The development of a method of automation of the process of normative control of technical documentation. *Izvestiya VolGTU = Izvestia Volgograd State Technical University*, 2013, no. 22 (125), pp. 114–118. (In Russian). EDN: RPEPYJ.
6. GOST R 58182–2018. *Requirements for experts and specialists. Engineering documents normocontrol. Basic principles*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. iii, 7 p. (In Russian).
7. Grigor'eva L. I., Bogdanov M. V., Demidov I. K. *Normocontrol: Techniques and organization*. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1991. 190 p. (In Russian).
8. Balabanov A. N. *Technical documentation control*. 2nd ed., upd. and rev. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1988. 350 p. (In Russian).
9. GOST 2.053–2013. *Unified system for design documentation. Product electronic structure. General principles*. Moscow, Standartinform Publ., 2014. ii, 9 p. (In Russian).
10. GOST 2.102–2013. *Unified system for design documentation. Types and sets of design documentation*. Moscow, Standartinform Publ., 2014. ii, 12 p. (In Russian).
11. Kuznetsova E. S., Orlov I. A., Chukin P. E., Khasanov R. Sh. Automation of design documentation control by the method of transition to the electronic structure of the product. *Standartizatsiya oboronnoy produktsii: materialy XII Vseros. nauch.-prakt. konf. (Respublika Krym, g. Yalta, 14–17 sent. 2021 g.)*. Yalta, NIISU Publ., 2021, pp. 110–114. (In Russian).
12. Kuznetsova E. S., Fedyunina E. A., Orlov I. A., Chukin P. E. Development of the algorithm for the document coordination process in 1C:PLM. *Elektronnye informatsionnye sistemy = Electronic Information Systems*, 2022, no. 1 (32), pp. 48–58. (In Russian). EDN: QWTYLC.
13. Kuznetsova E. S., Orlov I. A., Chukin P. E. Automation of creating a bill of materials for special equipment products in 1C:PLM. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technologies of CAD/CAM/CAE*, 2022, no. 4 (188), pp. 55–59. (In Russian). [https://doi.org/10.52190/2073-2597\\_2022\\_4\\_55](https://doi.org/10.52190/2073-2597_2022_4_55)

The article was submitted 19.01.2023; approved after reviewing 25.01.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

### Information about the author

**Elena S. Kuznetsova** – Leading Design Engineer, “Submicron Research Institute” JSC (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5, bld. 2), PhD student of the Institute of Micro-Devices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), e.s.kuznetsova@inbox.ru

## Метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики

*Ю. С. Шевнина, Л. Г. Гагарина, Е. В. Конюхов, А. Д. Харитоновна*

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

*yusm@rambler.ru*

**Аннотация.** Гетерогенными являются данные различных форматов, собранные из разных источников. Такие данные, как правило, неполные и неточные, что затрудняет их обработку и кластеризацию. В работе представлен метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики. Приведены математические модели представления кандидата на вакантную должность, которые характеризуются гетерогенными данными. Для разработки математических моделей использован аппарат алгебраических систем. Подробно описан способ определения функции принадлежности нечетких множеств с использованием вероятностного подхода как наиболее эффективного при работе с гетерогенными данными. Приведен пример формирования базы логических правил для выделения классификационных признаков в множестве гетерогенных данных кадрового резерва производственного предприятия. Выделенные классификационные признаки позволяют реализовать дальнейшую точную и эффективную проверку, а также оценить сведения о кандидатах на вакантную должность. Предлагаемый метод кластерного анализа гетерогенных данных может применяться, например, в социально-экономических, технических, биологических системах, предполагающих использование неполных и неточных данных.

**Ключевые слова:** кластерный анализ, гетерогенные данные, нечеткая логика, нечеткие множества, функция принадлежности

**Для цитирования:** Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г., Конюхов Е. В., Харитоновна А. Д. Метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики // Изв. вузов. Электроника. 2023. Т. 28. № 4. С. 537–546. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-537-546>. – EDN: AVWMTN.

Original article

## Method of cluster analysis of heterogeneous data using the provisions of fuzzy logic

Ju. S. Shevnina, L. G. Gagarina, E. V. Konyukhov, A. D. Kharitonova

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

yusm@rambler.ru

**Abstract.** Heterogeneous data are those of various formats and collected from various sources. Such data usually are incomplete and inaccurate, which makes them difficult to process and cluster. In this work, a method for cluster analysis of heterogeneous data using the provisions of fuzzy logic is presented. The simulation models for representing a candidate for a vacant position, which is characterized by heterogeneous data, are provided. The apparatus of algebraic systems has been used to develop simulation models. A method for determining the membership function of fuzzy sets using a probabilistic approach as the most effective when working with heterogeneous data, is described in detail. An example is given of the formation of a base of logical rules for selection of classification features in a set of heterogeneous data of the personnel reserve of a manufacturing enterprise. The selected classification features allow for further accurate and efficient verification and evaluation of information about candidates for a vacant position. The proposed method of cluster analysis of heterogeneous data can be applied in various subject areas that involve the use of incomplete and inaccurate data, for example, socio-economic, technical, and biological systems.

**Keywords:** cluster analysis, heterogeneous data, fuzzy logic, fuzzy sets, membership function

**For citation:** Shevnina Ju. S., Gagarina L. G., Konyukhov E. V., Kharitonova A. D. Method of cluster analysis of heterogeneous data using the provisions of fuzzy logic. *Proc. Univ. Electronics*, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 537–546. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-4-537-546>. – EDN: AVWMTN.

**Введение.** В современных условиях в основе формирования и подбора кадрового резерва для производственных предприятий – оценка кандидата по образовательной, научной и практической составляющим, которые характеризуются гетерогенными данными, собранными из различных источников. К ним относятся: образование, опыт работы, личные качества и другие характеристики. Степень сложности оценки кандидата на вакантную должность зависит от таких параметров, как должность и размер производственного предприятия. Чем выше должность и крупнее предприятие, тем сложнее процедура оценки [1–3].

В настоящее время существует множество программных сервисов, позволяющих оценивать кандидатов, например, по развитию навыков softskills, по умению применять теоретические знания при решении практических задач и др. Однако данные сервисы не могут гарантировать продуктивной, точной и полной оценки умений кандидата, поскольку не учитывают в совокупности гетерогенные данные кандидата и должностные инструкции конкретного предприятия. Решить создавшуюся проблему возможно с использованием



кластеризации гетерогенных данных о кандидате по заранее выделенным признакам, применяя положения нечеткой логики и последующую обработку данных методами машинного обучения. Качественная и точная оценка кадрового резерва производственного предприятия позволит повысить эффективность принимаемых управленческих решений на всех уровнях, что, несомненно, является актуальной задачей [4–6].

**Программные средства по работе с кадровым резервом.** Существующие программные средства по работе с кадровым резервом реализованы с обязательным соблюдением требований законодательства, регулирующего порядок приема работников, согласования и подписания кадровых документов. Условно программные средства состоят из следующих модулей: основной функциональный модуль сотрудников отдела кадров, личный кабинет для сбора сведений о кандидате, список вакантных должностей. Обобщенный типовой функционал современных программных средств по работе с кадровым резервом обеспечивается модулями сбора сведений о кандидате и его ближайших родственниках; проверки на корректность заполнения предоставляемых кандидатом данных; загрузки скан-образов документов кандидата; передачи кандидатом сведений и документов в основной функциональный модуль сотрудников отдела кадров для проведения дальнейших проверок и оценок.

На рис. 1 представлен фрагмент BPMN-диаграммы (Business Process Model and Notation, нотация моделирования бизнес-процессов) автоматизированного процесса проверки и оценки кандидата на вакантную должность предприятия. В основном функциональном модуле сотрудников отдела кадров HR-специалист создает новое личное дело (карточку проверки) с отправкой уведомления на электронную почту. Кандидат проходит процедуру аутентификации и заполняет разделы анкеты, загружает скан-образы необходимых документов. Затем проводится проверка загруженных сведений. Дальнейшая работа с данными кандидатов на вакантные должности осуществляется HR-специалистами преимущественно вручную.



Рис. 1. Фрагмент BPMN-диаграммы автоматизированного процесса проверки и оценки кандидата на вакантную должность (----- ассоциативная связь; × – условный оператор (исключающее ИЛИ); ○ – событие)

Fig. 1. A fragment of the BPMN diagram of the automated process of checking and evaluating a candidate for a vacant position (-----associative connection; × – conditional operator (exclusive OR); ○ – event)

Наиболее известными программными средствами по работе с кадровым резервом являются «СберКорус» [7], «СПАРК» [8], специальное программное обеспечение «Справки БК» [9]. Недостаток представленных систем – отсутствие единого инструмента анализа и хранения промежуточной информации для проверки и оценки кандидатов, а также сравнения данных кандидатов и имеющихся вакантных должностей производственного предприятия. Очевидно, что данные программные средства не позволяют кластеризовать гетерогенные данные кандидатов по разным классификационным признакам и комплексно обрабатывать их с учетом различных ограничений и условий.

**Математическое моделирование данных кандидата на вакантную должность производственного предприятия.** Цель математического моделирования данных кандидата на вакантную должность – определение необходимых для его представления и полной оценки гетерогенных данных и связей между ними. Такой подход позволяет выделять аспекты дальнейшей кластеризации гетерогенных данных кадрового резерва. Математическая модель данных кандидата способствует определению компетенций, которыми должен обладать кандидат, получивший образование по тому или иному направлению подготовки. Оценить квалификацию кандидата можно по перечню сформированных компетенций, набор которых определен в профессиональном стандарте [4].

Набор компетенций по направлению подготовки представляет собой совокупность элементов  $N$ :

$$N = \langle K, P, U, F, O_1, O_2, O_3, O_4 \rangle,$$

где  $K$  – множество формируемых компетенций из набора профессионального стандарта;  $P$  – множество общих для всех направлений подготовки компетенций;  $U$  – множество индикаторов сформированных компетенций, объединенных в списки «знания, умения, опыт деятельности»;  $F$  – множество критериев сформированности компетенций (элементы множества  $F$  представляют собой пары  $(k, f)$ , здесь  $k$  – компетенция,  $f$  – критерий сформированности);  $O_1$  – отношение  $K \times U$ ;  $O_2$  – отношение  $K \times F$ ;  $O_3$  – отношение  $P \times U$ ;  $O_4$  – отношение  $P \times F$ .

Отношения  $O_i$  имеют свойства:

- 1)  $\forall k_i \in K \exists U_i \subset U : \forall u \in U_i \rightarrow (k_i, u) \in O_1 \equiv k_i O_1 u \wedge |U_i| \geq 1$ ;
- 2)  $\forall k_i \in K \exists F_i \subset F : \forall f \in F_i \rightarrow (k_i, f) \in O_2 \equiv k_i O_2 f \wedge |F_i| \geq 1$ ;
- 3)  $\forall p_i \in P \exists U_i \subset U : \forall u \in U_i \rightarrow (p_i, u) \in O_3 \equiv p_i O_3 u \wedge |U_i| \geq 1$ ;
- 4)  $\forall p_i \in P \exists F_i \subset F : \forall f \in F_i \rightarrow (p_i, f) \in O_4 \equiv p_i O_4 f \wedge |F_i| \geq 1$ ;
- 5)  $\forall u \in U \exists! k \in K : k O_1 u; \forall u \in U \exists! p \in P : p O_2 u$ ;
- 6)  $\forall f \in F \exists! k \in K : k O_3 f; \forall f \in F \exists! p \in P : p O_4 f$ .

Аналогично получено математическое описание компетентности кандидата на вакантную должность производственного предприятия:

$$N^S = \langle K^S, P^S, U^S, Z, O_1^S, O_3^S, O_5^S, O_6^S \rangle,$$

где  $K^S$  – множество формируемых в процессе обучения у кандидата компетенций,  $K^S \subset K$ ;  $P^S$  – множество общих для всех направлений подготовки формируемых у кандидата компетенций,  $P^S \subset P$ ;  $U^S$  – множество индикаторов сформированных компетенций, объединенных в списки «знания, умения, опыт деятельности»;  $U^S \subset U$ ;  $Z$  – ре-

зультат формирования компетенции у кандидата (элементы множества  $Z$  представляют собой пары  $(k^S, z)$ , здесь  $k^S$  – компетенция,  $z$  – результат формирования компетенции; множество  $z$  состоит из одного элемента кортежа «сформирована, не сформирована»);  $O_1^S$  – отношение  $K^S \times U^S$ ;  $O_5$  – отношение  $K^S \times Z$ ;  $O_3^S$  – отношение  $P^S \times U^S$ ;  $O_6$  – отношение  $P^S \times Z$ .

Свойства отношений модели компетентности кандидата:

1)  $O_1^S \subset O_1$ .  $O_1^S$  представляет собой множество упорядоченных пар  $(k^S, u^S)$ ,  $O_1$  – пар  $(k, u)$ . Так как  $K^S \subset K$  и  $U^S \subset U$ , то  $\forall k^S \in K^S \rightarrow k^S \in K$ ,  $\forall u^S \in U^S \rightarrow u^S \in U$ . Кроме того, соответствующие свойства  $k^S$  и  $k$ ,  $u^S$  и  $u$  равны. Тогда получаем, что соответствующие пары  $(k^S, u^S)$  и  $(k, u)$  равны между собой, а значит  $O_1^S \subset O_1$ ;

2)  $\forall k_i^S \in K^S \exists Z_i \subset Z : \forall z \in Z_i \rightarrow (k_i^S, z) \in O_5 \equiv k_i^S O_5 z \wedge |Z_i| \geq 1$ ;

3)  $O_3^S \subset O_3$ .  $O_3^S$  представляет собой множество упорядоченных пар  $(p^S, u^S)$ ,  $O_3$  – пар  $(p, u)$ . Так как  $P^S \subset P$  и  $U^S \subset U$ , то  $\forall p^S \in P^S \rightarrow p^S \in P$ ,  $\forall u^S \in U^S \rightarrow u^S \in U$ . Кроме того, соответствующие свойства  $p^S$  и  $p$ ,  $u^S$  и  $u$  равны. Тогда получаем, что соответствующие пары  $(p^S, u^S)$  и  $(p, u)$  равны между собой, а значит  $O_3^S \subset O_3$ ;

4) поскольку  $O_1^S \subset O_1$  и  $O_3^S \subset O_3$ , отношения  $O_1^S$  и  $O_3^S$  имеют те же свойства, что и отношения  $O_1$  и  $O_3$ ;

5)  $\forall p_i^S \in P^S \exists Z_i \subset Z : \forall z \in Z_i \rightarrow (p_i^S, z) \in O_6 \equiv p_i^S O_6 z \wedge |Z_i| \geq 1$ ;

6)  $\forall z \in Z \exists! k^S \in K^S : k^S O_5 z; \forall z \in Z \exists! p^S \in P^S : p^S O_6 z$ .

Математическое описание набора компетенций, которыми должен обладать кандидат для решения практической задачи, имеет вид

$$S = \langle R, P^S, V, O_7, O_8 \rangle,$$

где  $R$  – множество компетенций, необходимых для решения задачи;  $P^S$  – множество общих для всех направлений подготовки компетенций, необходимых для решения задачи;  $V$  – множество индикаторов сформированных компетенций, объединенных в списки «знания, умения, опыт деятельности» и сформированное из элементов множества  $U$  для различных направлений подготовки;  $O_7$  – отношение  $R \times V$ ;  $O_8$  – отношение  $K^S \times Z$ .

Отношения  $O_7$  и  $O_8$  имеют следующие свойства:

1)  $\forall r_i \in R \exists V_i \subset V : \forall v \in V_i \rightarrow (r_i, v) \in O_7 \equiv r_i O_7 v \wedge |V_i| \geq 1$ ;

2)  $\forall k_i^S \in K^S \exists Z_i \subset Z : \forall z \in Z \rightarrow (k_i^S, z) \in O_8 \equiv k_i^S O_8 z \wedge |Z_i| \geq 1$ ;

3)  $\forall v \in V \exists! p^S \in P^S : p^S O_7 v; \forall v \in V \exists! p^S \in P^S : p^S O_8 v$ .

Во всех моделях присутствуют множества  $K, P, U$  или множества, формируемые на их основе. Исходя из анализа свойств полученных моделей следует, что набор компетенций направления подготовки, описание компетентности кандидата и набор компетенций для решения практической задачи связаны посредством  $K, P, U$ . Полученный вывод используется при разработке метода кластерного анализа гетерогенных данных кадрового резерва с использованием положений нечеткой логики. Предлагаемая математическая модель является расширяемой и может быть дополнена гетерогенными данными о кандидатах на вакантные должности и связях между ними.

**Использование положений нечеткой логики при работе с гетерогенными данными.** Результаты исследования современных методов и средств оценки и проверки гетерогенных данных кандидатов на вакантные должности производственного предприятия показали, что существующие решения неэффективны, поскольку не дают возможности анализировать данные комплексно и не учитывают нелинейные факторы. Однако развитие информационных технологий позволяет использовать в ходе работы с кадровым резервом методы нечеткой логики, которые эффективно работают с нелинейными факторами, а также с неполными и неточными данными. Основная сложность использования положений нечеткой логики при решении задач формирования и подбора кадрового резерва заключается в составлении базы нечетких правил и определении функции принадлежности. Однако кластерный анализ данных кадрового резерва позволяет существенно упростить данную задачу.

В теории нечетких множеств функция принадлежности определяет степень, или вероятность, принадлежности элемента множеству. Основной задачей при определении функции принадлежности является фаззификация, при которой происходит преобразование четких переменных в нечеткие. При этом диапазон значений обрабатываемой переменной разбивается на несколько подмножеств, для каждого из которых строится функция принадлежности. Количество получаемых подмножеств произвольно и зависит от условий решаемой задачи [5, 6, 10].

В множестве гетерогенных данных кадрового резерва в соответствии с терминологией теории нечеткой логики выделим подмножества: N – отрицательное; Z – нулевое; P – положительное; S – малое; M – среднее; L – большое; NL – отрицательное большое; NM – отрицательное среднее; PL – положительное большое; NS – отрицательное малое; PM – положительное среднее; PS – положительное малое. Функция принадлежности определяется треугольной формой (рис. 2).

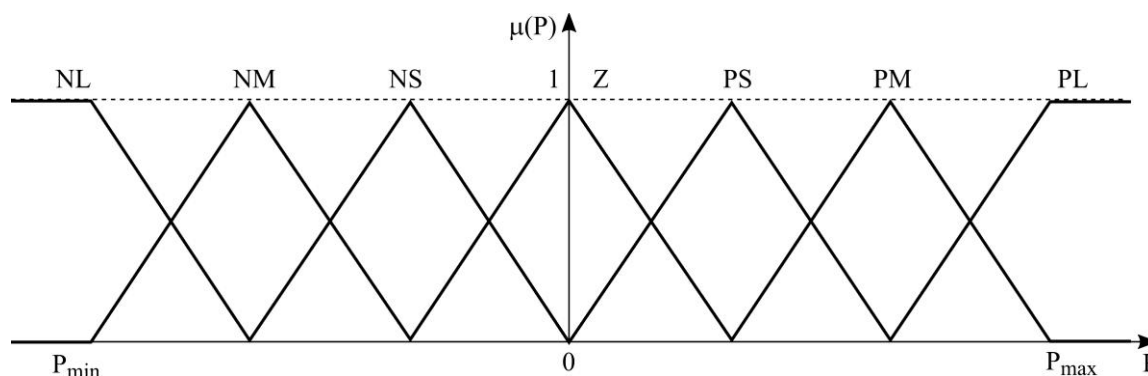


Рис. 2. Выделенные подмножества гетерогенных данных кадрового резерва производственного предприятия

Fig. 2. Selected subsets of heterogeneous data of the personnel reserve of a manufacturing enterprise

Ограничения и условия для операций над полученными подмножествами формируются с использованием лингвистических и логических операторов и переменных и составляют так называемую базу правил (таблица).

Использование логических операций И, ИЛИ, НЕ и других соответствует основным функциям над нечеткими множествами: пересечение, объединение, вычитание и т. д. Таким образом, для каждого правила формируется его математическая запись. Например, функция принадлежности для пересечения двух нечетких множеств определяется как  $\mu(P \cap \Delta P) = \min(\mu(P), \mu(\Delta P))$ , т. е. каждое значение функции принадлежности при пересечении двух множеств равно наименьшему значению принадлежностей для положения элемента и его отклонения.

**База правил для обработки данных кадрового резерва**  
**Rule base for processing personnel reserve data**

Сведения о кандидате $P$	Точность сведений $\Delta P$	Правило
N	NS	Если $P = N$ и $\Delta P = NS$ , то $U = PS$ , где $U$ – выделенный классификационный признак
Z	PS	Если $P = Z$ и $\Delta P = PS$ , то $U = Z$
P	Z	Если $P = P$ и $\Delta P = Z$ , то $U = PS$
NM	NL	Если $P = NM$ и $\Delta P = NL$ , то $U = PL$
NS	Z	Если $P = NS$ и $\Delta P = Z$ , то $U = PS$
PL	NS	Если $P = PL$ и $\Delta P = NS$ , то $U = NS$

Теория нечетких множеств позволяет определять функции принадлежности разными способами. Для гетерогенных данных целесообразно использовать вероятностный подход, при котором функция принадлежности принимает вид

$$\mu(P \cap \Delta P) = \mu(P)\mu(\Delta P), \mu(P \cup \Delta P) = \mu(P) + \mu(\Delta P) - \mu(P)\mu(\Delta P).$$

Функции принадлежности для правил, представленных в таблице, имеют вид

$$\mu_1(U) = \min(\mu_{U_1}(U), \min(\mu(P), \mu(\Delta P))),$$

$$\mu_2(U) = \min(\mu_{U_2}(U), \min(\mu(P), \mu(\Delta P))),$$

$$\mu_3(U) = \min(\mu_{U_3}(U), \min(\mu(P), \mu(\Delta P))),$$

$$\mu_4(U) = \min(\mu_{U_4}(U), \min(\mu(P), \mu(\Delta P))),$$

$$\mu_5(U) = \min(\mu_{U_5}(U), \min(\mu(P), \mu(\Delta P))),$$

$$\mu_6(U) = \min(\mu_{U_6}(U), \min(\mu(P), \mu(\Delta P))).$$

Результирующая функция определяется как объединение функций принадлежности, полученной для каждого правила:

$$\mu(U) = \max(\mu_{U_1}(U), \mu_{U_2}(U), \mu_{U_3}(U), \mu_{U_4}(U), \mu_{U_5}(U), \mu_{U_6}(U)).$$

Полученное значение классификационного признака в виде нечеткой функции необходимо дефазифицировать для последующего использования в решении задач проверки и оценки гетерогенных данных кадрового резерва. Дефазификация проводится на основе вероятностного подхода с помощью формулы

$$U = \frac{\int_{U_{\min}}^{U_{\max}} U \mu(U) dU}{\int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \mu(U) dU}.$$

Таким образом, метод кластерного анализа гетерогенных данных кадрового резерва производственного предприятия включает в себя:

- разделение множества гетерогенных сведений о кандидатах на вакантные должности на подмножества;
- определение функции принадлежности в пределах каждого из полученных подмножеств;
- фазификацию переменных, определяющих классификационные признаки сведений о кандидатах;

- формирование нечетких логических правил;
- формирование нечеткого логического вывода.

**Оценка эффективности использования метода кластерного анализа гетерогенных данных.** Для количественной оценки эффективности разработанного метода кластерного анализа гетерогенных данных по формированию кадрового резерва предприятия случайным образом выбрана экспериментальная группа сотрудников в составе 100 человек. В процессе эксперимента сотрудников исследовали с использованием разработанного метода и традиционными способами. Оценка компетентности каждого специалиста и уровня соответствия требованиям занимаемой им должности, полученная традиционными способами, составила 90 %, т. е. 9 человек из 10 соответствовали компетентности и требованиям к должности. Аналогичная оценка, полученная с использованием разработанного метода кластерного анализа гетерогенных данных, составила 60 %. Метод позволил определить недостающие у специалиста знания и навыки. Таким образом, эффективность разработанного метода на 30 % выше эффективности традиционных способов формирования кадрового резерва.

**Заключение.** Разработанный метод кластерного анализа гетерогенных данных с использованием положений нечеткой логики позволяет точно и эффективно формировать и подбирать кадровый резерв производственного предприятия, а также выделять классификационные признаки из неполных и неточных данных, подтверждаемых сведениями из разных источников, в том числе путем загрузки скан-образов документов.

Метод кластерного анализа гетерогенных данных может применяться, например, в социально-экономических, технических, биологических системах, предполагающих использование неполных и (или) неточных данных.

### Литература

1. Шевнина Ю. С. Метод оценки состояния нелинейной системы на основе логического анализа данных // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 3. С. 407–415. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415>
2. Шевнина Ю. С., Бураков А. Н. Автоматизация учета рабочего времени сотрудников предприятия // Программные продукты и системы. 2022. № 1. С. 132–138. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.137.132-138>
3. Шевнина Ю. С., Константинов В. В. Автоматизация оценки профессиональных качеств и компетенций сотрудников предприятия // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2021. № 2 (72). С. 7–14. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2021-2-7-14>
4. Шевнина Ю. С., Гагарина Л. Г. Подходы к автоматизации процессов центров коллективного проектирования микроэлектроники // Информационные технологии и вычислительные системы. 2021. № 4. С. 12–25. <https://doi.org/10.14357/20718632210402>
5. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с пол. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 383 с.
6. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / под ред. Н. Д. Егупова. 2-е изд., стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. 744 с.
7. Сервис проверки физических лиц // СберКорус [Электронный ресурс]. URL: <https://www.esphere.ru/products/proverka-fiz-litc/> (дата обращения: 05.06.2023).
8. Поиск аффилированности // СПАРК [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spark-interfax.ru/ru/features/realtions> (дата обращения: 05.06.2023).
9. СПО «Справки БК»: Описание специального программного обеспечения (в формате doc) // Госслужба [Электронный ресурс]. URL: [https://gosszluzhba.gov.ru/anticorruption/spravki\\_bk](https://gosszluzhba.gov.ru/anticorruption/spravki_bk) (дата обращения: 05.06.2023).
10. Усков А. А., Кузьмин А. В. Интеллектуальные технологии управления: Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 143 с.

Статья поступила в редакцию 26.01.2023 г.; одобрена после рецензирования 07.02.2023 г.; принята к публикации 31.05.2023 г.

### Информация об авторах

**Шевнина Юлия Сергеевна** – 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), yusm@rambler.ru

**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

**Конюхов Евгений Владимирович** – соискатель Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yusm@rambler.ru

**Харитонов Анастасия Даниловна** – магистрант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), yusm@rambler.ru

### References

1. Shevnina Ju. S. Method for estimating the state of a nonlinear system based on logical data analysis. *Izv. vuzov. Elektronika = Proc. Univ. Electronics*, 2022, vol. 27, no. 3, pp. 407–415. (In Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-3-407-415>
2. Shevnina Yu. S., Buravov A. N. Time tracking automation for employees working remotely. *Programmnye produkty i sistemy = Software Products and Systems*, 2022, no. 1, pp. 132–138. (In Russian). <https://doi.org/10.15827/0236-235X.137.132-138>
3. Shevnina Ju. S., Konstantinov V. V. Automation of assessment of professional qualities and competencies of enterprise employees. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Astrakhan State Technical University*, 2021, no. 2 (72), pp. 7–14. (In Russian). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2021-2-7-14>
4. Shevnina Ju. S., Gagarina L. G. Approaches to process automation of collective design centers for microelectronics. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2021, no. 4, pp. 12–25. (In Russian). <https://doi.org/10.14357/20718632210402>
5. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L. *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. Warszawa, Łódź, Wydaw. Naukowe PWN, 1997. 410 s.
6. Egupov N. D., ed. *Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control*, textbook. 2nd print. Moscow, Bauman University Publ., 2022. 744 p. (In Russian).
7. Service for verification of individuals. *SberKorus*. (In Russian). Available at: <https://www.esphere.ru/products/proverka-fiz-litc/> (accessed: 05.06.2023).
8. Affiliation checks. *SPARK*. Available at: <https://spark-interfax.com/capabilities/affiliation-checks/> (accessed: 05.06.2023).
9. SPO “Spravki BK”: Description of special software (in doc format). *Gossluzhba*. (In Russian). Available at: [https://gossluzhba.gov.ru/anticorruption/spravki\\_bk](https://gossluzhba.gov.ru/anticorruption/spravki_bk) (accessed: 05.06.2023).
10. Uskov A. A., Kuz'min A. V. *Intelligent control technologies: Artificial neural networks and fuzzy logic*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2004. 143 p. (In Russian).

The article was submitted 26.01.2023; approved after reviewing 07.02.2023;  
accepted for publication 31.05.2023.

**Information about the authors**

**Yulia S. Shevnina** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yusm@rambler.ru

**Larisa G. Gagarina** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gagar@bk.ru

**Evgeny V. Konyukhov** – Applicant of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yusm@rambler.ru

**Anastasia D. Kharitonova** – Master’s degree student of the Institute of System and Software Engineering and Information Technologies, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), yusm@rambler.ru

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

С тематическими указателями статей за 1996 – 2022 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

<http://ivuz-e.ru>



## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 октября 2022 г.)

**ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ!** Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал «Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА» публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- фундаментальные исследования;
- материалы электроники;
- технологические процессы и маршруты;
- элементы интегральной электроники;
- схемотехника и проектирование;
- микро- и наносистемная техника;
- интегральные радиоэлектронные устройства;
- биомедицинская электроника;
- информационно-коммуникационные технологии;
- проблемы высшего образования.

**В редакцию представляются:**

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом *в двух экземплярах*.

2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.

3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры или института, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).

4. Лицензионный договор о передаче авторского права в двух экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: <http://ivuz-e.ru/authors/>

**Статья должна быть подписана всеми авторами.**

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

*Первая страница статьи оформляется следующим образом:* индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

**Аннотация:**

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

– на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;

– на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать **ключевые слова** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

**Текст:**

– печатается *через два интервала* с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

– абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

**Формулы:**

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только *по умолчанию*. Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

**Иллюстрации:**

1. Штриховые и полутоновые рисунки (фотографии) могут быть представлены в графических форматах JPEG/JPG, PNG, SVG, PDF, TIFF (без компрессии). Представление рисунков в других форматах возможно по согласованию с редакцией журнала и при наличии технических возможностей. Текст и графические элементы изображения (в электронном виде и при печати на бумаге) должны быть качественными и различимыми.

2. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок необходимо сохранить в отдельном файле. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

**Таблицы** должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

**Библиографический список:**

– оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

– нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

– русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык (для References).

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

**Список авторов и сведения о них:**

– оформляется отдельным файлом;

– необходимо указать: фамилию, имя, отчество полностью; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, служебный адрес (на русском и английском языках), служебный телефон, e-mail;

– указать автора, ответственного за прохождение статьи, для аспирантов – научного руководителя.

*Плата за публикацию статей не взимается.*

Статьи направлять по адресу: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ, редакция журнала «Известия вузов. Электроника», комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@micee.ru

http://ivuz-e.ru

