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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 26 | Vol. 26
№ 2 | No. 2
март - апрель | March - April
2021

ПОДПИСКА 2021

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

Периодичность журнала - 6 номеров в год

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

Подписаться на печатную версию журнала можно:

- **по каталогу** «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «УП Урал-Пресс». Подписной индекс 38934
- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934
- **через редакцию** - с любого номера и до конца года

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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



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

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru

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



Известия высших учебных заведений.

ЭЛЕКТРОНИКА

Том 26, № 2, 2021
март – апрель

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.
Выходит 6 раз в год

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

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Быков Дмитрий Васильевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-4935-7292
Гаврилов Сергей Витальевич – д.т.н., проф., Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-0566-4482
Гапоненко Сергей Васильевич – акад. НАН Беларуси, д.физ.-мат.н., проф., Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0003-3774-5471
Горбацевич Александр Алексеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Грибов Борис Георгиевич – чл.-корр. РАН, д.хим.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
Коноплев Борис Георгиевич – д.т.н., проф., Южный федеральный университет (Таганрог, Россия), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Коркишко Юрий Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., НПК «Оптолинк» (Москва, Россия)
Королёв Михаил Александрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Красников Геннадий Яковлевич – акад. РАН, д.т.н., проф., АО «НИИМЭ» (Москва, Россия)
Кубарев Юрий Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова (Москва, Россия)
Лабунов Владимир Архипович – акад. НАН Беларуси, иностранный член РАН, д.т.н., проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Максимов Иван Александрович – PhD, проф., Университет города Лунд (Швеция), ORCID: 0000-0003-1944-4878
Меликян Вазген Шаваршович – чл.-корр. НАН Армении, д.т.н., проф., ЗАО «Синопсис Армения» (Ереван, Армения), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Неволин Владимир Кириллович – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© “Известия вузов. Электроника”, 2021
© МИЭТ, 2021

Неволин Владимир Николаевич – д.физ.-мат.н., проф., Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, Россия)
Переверзев Алексей Леонидович – д.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Петросянц Константин Орестович – д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Сазонов Андрей Юрьевич – PhD, проф., Университет Ватерлоо (Канада)
Сауров Александр Николаевич – акад. РАН, д.т.н., проф., Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Селищев Сергей Васильевич – д.физ.-мат.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Сигов Александр Сергеевич – акад. РАН, д.физ.-мат.н., проф., МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Сидоренко Анатолий Сергеевич – акад. АН Молдовы, д.физ.-мат.н., проф., Институт электронной инженерии и нанотехнологий АНМ (Кишинев, Молдова), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Телец Виталий Арсеньевич – д.т.н., проф., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-4944-676X
Тимошенков Сергей Петрович – д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Юриш Сергей Юрьевич – канд.т.н., IFSA Publishing, S.L. (Барселона, Испания), ORCID: 0000-0002-1433-260X

Заведующая редакцией *С.Г. Зверева*
Редактор *А.В. Тихонова*
Научный редактор *С.Г. Зверева*
Корректор *И.В. Проскурякова*
Верстка *А.Ю. Рыжков, С.Ю. Рыжков*

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

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

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

Подписано в печать 12.04.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 10,695 усл.печ.л., 10,664 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 3. Свободная цена.
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-72307 от 01.02.2018.

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

05.11.00 Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление
05.27.00 Электроника

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

Включен в Российский индекс научного цитирования и в Рейтинг Science Index.

Является членом Cross Ref.

Плата за публикацию статей не взимается.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы электроники

Лавров И.В., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Бардушкин А.В. Моделирование эффективной диэлектрической проницаемости пенополимерных материалов 115

Морозова Е.В., Тимкаева Д.А. Влияние инкапсуляции фуллеренов на оптические и термоэлектрические свойства углеродных нанотрубок 123

Технологические процессы и маршруты

Кубарев Ю.В., Котельников В.А., Котельников М.В. Зондовая диагностика физических процессов в магнитодинамической плазме 132

Схемотехника и проектирование

Melikyan V.Sh., Hovhannisyan V.D., Grigoryan M.T., Avetisyan A.A., Grigoryan H.T. Real Number Modeling Flow of Digital to Analog Converter
(***Меликян В.Ш., Ованнисян В.Д., Григорян М.Т., Аветисян А.А., Григорян А.Т.*** Маршрут моделирования цифроаналогового преобразователя на действительных числах) 144

Белостоцкая С.О., Лукьянов А.А., Росляков А.С., Семенов А.Н., Федоров Р.А. Особенности реализации аналогового умножителя на основе базового структурированного кристалла серии 5529 154

Биомедицинская электроника

Литинская Е.Л. Управление и поддержка принятия решений в системе персонализированной инсулинотерапии 162

Информационно-коммуникационные технологии

Янакова Е.С., Мачарадзе Г.Т., Гагарина Л.Г., Швачко А.А. Параллельно-конвейерная обработка видеоинформации в многопроцессорных гетерогенных системах на кристалле 172

Вишняков И.Э., Масягин М.М., Одинцов О.А., Слюсарь В.В. Методы и алгоритмы шумоочистки звука в реальном времени 184

Конференции

Калугин В.В. Об итогах 5-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника-2021» 197

4th International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT '2021) ..... 3-я стр. обложки

X Юбилейная Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2021) ..... 4-я стр. обложки

К сведению авторов 199

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS

Volume 26, No. 2, 2021
March – April

The scientifical and technical journal

Published since 1996
Published 6 times per year

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

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

Editorial Board:

Sergey A. Gavrilov – Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Aleksandr A. Bakhtin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Sergey B. Benevolensky – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Research Institute – Federal Research Centre for Projects Evaluation and Consulting Services (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3177-9136
Dmitri V. Bykov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-4935-7292
Sergey V. Gavrilov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS (Moscow, Russian), ORCID: 0000-0003-0566-4482
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
Aleksandr A. Gorbatsevich – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-1950-356X
Boris G. Gribov – Cor. Mem. RAS, Dr. Sci. (Chem.), Prof., JSC «NIIME» (Moscow, Russia)
Boris G. Konoplev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Southern Federal University (Taganrog, Russia), ORCID: 0000-0003-3105-029X
Yury N. Korkishko – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Optolink LLC (Moscow, Russia)
Mikhail A. Korolev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-3043-1293
Gennady Y. Krasnikov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC «NIIME» (Moscow, Russia)
Yuri V. Kubarev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Prokhorov Academy of Engineering Sciences (Moscow, Russia)
Vladimir A. Labunov **–** Acad. NAS of Belarus, Foreign member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus), ORCID: 0000-0002-3494-4881
Ivan A. Maksimov - PhD, Prof., Lund University (Sweden), ORCID: 0000-0003-1944-4878
Vazgen S. Melikyan – Cor. Mem. NAS of Armenia, Dr. Sci. (Eng.), Prof., CJSC Company «Synopsys Armenia» (Yerevan, Armenia), ORCID: 0000-0002-1667-6860
Vladimir K. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-4348-0377

© "Proceedings of Universities. Electronics", 2021
© MIET, 2021

Vladimir N. Nevolin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS (Moscow, Russia)
Aleksey L. Pereverzev – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5834-5138
Konstantin O. Petrosyantz – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7969-4786
Aleksandr N. Saurov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the RAS (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-7368-5977
Andrey Y. Sazonov - PhD, Prof., University of Waterloo (Canada)
Sergey V. Selishchev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0002-5589-7068
Anatolie S. Sidorenko – Acad. AS of Moldova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Institute of the Electronic Engineering and Nanotechnologies ASM (Chisinau, Moldova), ORCID: 0000-0001-7433-4140
Aleksandr S. Sigov – Acad. RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0003-2017-9186
Vitaly A. Telets – Dr. Sci. (Eng.), Prof., National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia) , ORCID: 0000-0003-4944-676X
Sergey P. Timoshenkov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., MIET (Moscow, Russia), ORCID: 0000-0001-5411-1804
Sergey Yu. Yurish – Cand. Sci. (Eng.), IFSA Publishing, S.L. (Barcelona, Spain), ORCID: 0000-0002-1433-260X

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

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

Publisher's address: 124498, Russia, Moscow, Zelenograd, Bld. 1, Shokin Square, MIET

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

Signed to print 12.04.2021. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 10,695. Number of copies 150. Order no. 3. Free price.
The media registration certificate ПИ № ФС 77-72307 of 01.02.2018.

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

05.11.00 Instrumentation, metrology and information-measuring devices and systems
05.13.00 Computer science, computer engineering and management
05.27.00 Electronics

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

The journal is included into the Russian index of scientific citing and into the Rating Science Index.

Is the member of Cross Ref.

The fee for the publication of articles is not charged.

The subscription index in catalogue «Russian Press» LLC «Agency «Book a Service» – 38934

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

CONTENTS

Electronics materials

Lavrov I.V., Bardushkin V.V., Yakovlev V.B., Bardushkin A.V. Prediction of Effective Permittivity of Foam-Polymer Materials 115

Morozova E.V., Timkaeva D.A. Influence of Encapsulation of Fullerenes on Optical and Thermoelectric Properties of Carbon Nanotubes 123

Technological processors and routes

Kubarev Yu.V., Kotelnikov V.A., Kotelnikov M.V. Probe Diagnostics of Physical Processes in Magneto-Dynamic Plasma 132

Circuit engineering and design

Melikyan V.Sh., Hovhannisyan V.D., Grigoryan M.T., Avetisyan A.A., Grigoryan H.T. Real Number Modeling Flow of Digital to Analog Converter 144

Belostotskaya S.O., Lukyanov A.A., Roslyakov A.S., Semenov A.N., Fedorov R.A. Implementation Features of an Analog Multiplier Based on 5529 Series Structured ASIC 154

Biomedical electronics

Litinskaia E.L. Control and Decision-Making Support in a Personalized Insulin Therapy System 162

Information-communication technologies

Yanakova E.S., Macharadze G.T., Gagarina L.G., Shvachko A.A. Parallel-Pipelined Video Processing in Multicore Heterogeneous Systems on Chip 172

Vishnyakov I.E., Masyagin M.M., Odintsov O.A., Sliusar V.V. Methods and Algorithms for Real Time Voice Noise Cleaning 184

Conferences

Kalugin V.V. About the Results of the 5th Scientific and Practical Conference «Intelligent Systems and Microsystem Technology-2021» 197

4th International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT '2021) ..... 3 cover page

X Anniversary All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation «Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems» (МЭС-2021) ..... 4 cover page

Instructions for authors 199

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ELECTRONICS MATERIALS

УДК [621.315.5:537.311/.312]:001.891.573 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-115-122**

Моделирование эффективной диэлектрической проницаемости пенополимерных материалов

И.В. Лавров[1], В.В. Бардушкин[1], В.Б. Яковлев[1,2], А.В. Бардушкин[1,3]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, г. Москва, Россия
[3]ООО «Альфачип», г. Москва, Россия

iglavr@mail.ru

Пористые пластмассы используются в различных отраслях промышленности, в том числе радио- и электротехнической. Они характеризуются хорошими тепло- и звукоизолирующими, диэлектрическими и механическими свойствами, а также стойкостью к воздействию различных внешних факторов в процессе эксплуатации. Рассмотрена задача прогнозирования эффективной диэлектрической проницаемости пористых пластмасс с большой объемной долей пор, в частности пенополиэпоксидных материалов. Предложены два подхода для ее решения, основанные на модели матричного композита. В первом подходе матрицей считается полиэпоксидное связующее, а полости, заполненные газом, принимаются за включения. Во втором – за включения принимаются полиэпоксидные стенки, разделяющие полости, а в качестве матрицы рассматривается газ, заполняющий полости. Для получения расчетных формул в обоих случаях использовано обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей. На основе полученных выражений проведены модельные расчеты эффективной диэлектрической проницаемости макроскопически изотропного пенопласта с полимерным связующим на основе ЭД-20 и полостями, заполненными фреоном, в зависимости от кажущейся плотности материала. Расчеты в обобщенном сингулярном приближении выполнены для случая, когда средой сравнения считалась матрица, а также методом самосогласования. При вычислениях во втором подходе рассмотрены следующие формы ячеек материала: слабовытекший или сильновытекший многогранник. Полученные различными методами расчетные зависимости показали качественное соответствие экспериментальным данным.

Ключевые слова: эффективная диэлектрическая проницаемость; пенополимерный материал; матричный композит; включение; обобщенное сингулярное приближение; метод самосогласования

© И.В. Лавров, В.В. Бардушкин, В.Б. Яковлев, А.В. Бардушкин, 2021

Для цитирования: Лавров И.В., Бардушкин В.В., Яковлев В.Б., Бардушкин А.В. Моделирование эффективной диэлектрической проницаемости пенополимерных материалов // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 2. С. 115–122. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-115-122

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-08-00155-а).

Prediction of Effective Permittivity of Foam-Polymer Materials

I.V. Lavrov[1], V.V. Bardushkin[1], V.B. Yakovlev[1,2], A.V. Bardushkin[1,3]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[3]LLC «Alphachip», Moscow, Russia

iglavr@mail.ru

Abstract: Porous plastics are used in various fields of industry, including radio- and electrotechnical fields. They are characterized by good heat- and sound isolating, dielectric and mechanical properties as well as by resistance to effect of various external factors during operation. The problem of estimation of effective permittivity of foam-polymer materials with a large volume fraction of pores, in particular, polyepoxide foam materials, has been considered. Two methods for solving it, both based on the matrix have been proposed. In the first method the matrix is considered as a polyepoxide binder, and the cavities filled with gas are taken as inclusions. In the second method the polyepoxide walls, separating cavities, are taken as inclusions, and gas filling cavities is considered as a matrix. To obtain the formulas for calculation, both methods use a generalized singular approximation of the theory of random fields. Based on the obtained expressions, the model calculations of the effective permittivity of a macroscopically isotropic foam material with a polymer binder based on E-20 and the cavities filled with freon, depending on the apparent density of the material, have been made. The calculations in the generalized singular approximations have been carried out for two of its variants: when the matrix was considered as a comparison medium; and, also by the self-consistent method. In the calculations using the second method two variants of the shape of the cells of the material have been considered: a weakly leaked or heavily leaked polyhedron. The calculated dependences obtained by all methods have shown the qualitative compliance with the experimental data.

Keywords: effective permittivity; foam polymer material; matrix composite; inclusion; generalized singular approximation; self-consistent method

For citation: Lavrov I.V., Bardushkin V.V., Yakovlev V.B., Bardushkin A.V. Prediction of effective permittivity of foam-polymer materials. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 115–122. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-115-122

Funding: the study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 20-08-00155-a).

Введение. Пористые (газонаполненные) пластмассы находят широкое применение в различных отраслях промышленности: авиакосмической, машиностроении, судостроении, строительной, радио- и электротехнической и др. [1]. Это обусловлено их хорошими тепло- и звукоизолирующими, диэлектрическими и механическими свойствами, а также стойкостью к воздействию различных внешних факторов в процессе эксплуатации [2]. Пористые пластмассы можно разделить на два класса: пенопласты и сферопластики (или синтактные материалы). К пенопластам относят газонаполненные полимеры, полученные вспениванием и последующим отверждением жидкой или пластично-вязкой композиции [1]. Сферопластики – это композиционные материалы с полимерной или кремнийорганической матрицей, в которую погружены полые шаровые включения [3, 4]. В сферопластиках форма полостей определяется формой оболочки включений, которая близка к сферической, в то время как в пенопластах полости могут иметь сложную, нередко геометрически неправильную форму, причем часть полостей могут быть соединены между собой. Размер и форма полостей, их объемная доля в пенопласте, а также доля сообщающихся между собой полостей зависят от процессов вспенивания и отверждения при производстве материала, в свою очередь определяющихся химическим составом вспениваемой композиции и внешними условиями, в которых эти процессы протекают [2].

В настоящей работе предложены два подхода для модельного расчета эффективной диэлектрической проницаемости пенопласта с полиэпоксидным связующим (пенополиэпоксид), основанные на обобщенном сингулярном приближении [5, 6]. Для описания пенополиэпоксида использована модель матричного композита. В первом подходе матрица – полиэпоксидное связующее, а полости, заполненные газом, принимаются за включения. Во втором – за включения принимаются полиэпоксидные стенки, разделяющие полости, а в качестве матрицы рассматривается газ, заполняющий полости.

Постановка задачи и модельные расчетные выражения для диэлектрической проницаемости пенополиэпоксида. Пусть имеется образец объемом V статистически однородного композита, к границе S которого приложено однородное электрическое поле напряженностью $\mathbf{E}_0$. Композит считается состоящим из однородной диэлектрической матрицы с погруженными в нее неоднородными включениями нескольких видов; диэлектрические проницаемости матрицы и включений считаются известными скалярными величинами. Тензор $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ эффективной диэлектрической проницаемости данного образца определяется как оператор, связывающий средние по объему образца векторы электрической индукции и напряженности электрического поля: $\langle \mathbf{D} \rangle = \boldsymbol{\varepsilon}^* \langle \mathbf{E} \rangle$.

Для вычисления $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ рассмотрены две краевые задачи для электростатического потенциала $\phi(\mathbf{r})$: в образце данного композита, являющегося неоднородной средой; в образце однородного тела сравнения такой же формы и размеров, как и образец композита [6–8]. В результате для вычисления $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ в обобщенном сингулярном приближении [7] получаем выражение

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

где $\boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r}) = \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) - \boldsymbol{\varepsilon}^c$ – разность между тензором диэлектрической проницаемости образца композита в текущей точке и параметром тела сравнения; $\mathbf{g}$ – тензор, связанный с конкретным зерном неоднородности (матрицу также можно считать состоящей из отдельных зерен).

Компоненты тензора $\mathbf{g}$ в случае изотропной среды сравнения ($\boldsymbol{\varepsilon}^{c} = \varepsilon^{c}\mathbf{I}$) могут быть вычислены по формуле [7]

$$g_{ij} = -(\varepsilon^{c})^{-1} L_i \delta_{ij}, \quad i, j = 1,2,3, \tag{2}$$

где L_i – геометрические факторы эллипсоида [9] (для сферических зерен $L_1 = L_2 = L_3 = 1/3$).

Усреднение в (1) проводится по всем зернам неоднородности образца материала, включая зерна, составляющие матрицу.

Введем тензор $\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r})$, связанный с конкретным включением, по формуле

$$\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r}) = \left(\mathbf{I} - \mathbf{g}\boldsymbol{\varepsilon}'(\mathbf{r})\right)^{-1}, \tag{3}$$

тогда (1) можно записать в виде

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{*} = \left\langle \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r})\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r}) \right\rangle \left\langle \boldsymbol{\lambda}(\mathbf{r}) \right\rangle^{-1}. \tag{4}$$

Для первой модели, в которой поры принимаются за включения, а перегородки – за матрицу, формула (4) принимает вид

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{*} = \left((1-f)\boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}\boldsymbol{\lambda}^{(m)} + f\left\langle \boldsymbol{\varepsilon}^{(in)}\boldsymbol{\lambda}^{(in)} \right\rangle\right)\left((1-f)\boldsymbol{\lambda}^{(m)} + f\left\langle \boldsymbol{\lambda}^{(in)} \right\rangle\right)^{-1}, \tag{5}$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}$, $\boldsymbol{\lambda}^{(m)}$ – тензоры, связанные с частицами матрицы; $\boldsymbol{\varepsilon}^{(in)}$, $\boldsymbol{\lambda}^{(in)}$ – тензоры, относящиеся к порам; f – полная объемная доля пор в материале. Угловые скобки в (5) означают усреднение по всем порам в материале. В частности, если все поры имеют одинаковую форму и ориентацию, угловые скобки в (5) можно не использовать.

Формула (5) применима и ко второй модели, в которой роль матрицы играют поры, а роль включений – перегородки между ними. Использование второй модели можно считать оправданным при выполнении двух условий: при большой объемной доле пор и существенной доле сообщающихся между собой полостей. Считается, что ячейка пенопласта имеет форму частично «вытекшего» многогранника [1], т.е. некоторая часть полимерного связующего в результате действия сил поверхностного натяжения из стенок перетекает в ребра многогранника. Для простоты многогранник считаем прямоугольным параллелепипедом. Его стенки моделируются тремя видами сжатых эллипсоидов, у которых одна полуось намного меньше двух других, а ребра – тремя видами вытянутых сфероидов. Распределение полимерного связующего между стенками и ребрами регулируется относительной объемной долей α_r ребер среди включений всех видов; при $\alpha_r = 0$ и $\alpha_r = 1$ имеем предельные случаи невытекшего и полностью вытекшего многогранника соответственно. Если все ячейки имеют одинаковую форму и ориентацию, то формулу (5) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}^{*} = &\left(f\,\boldsymbol{\varepsilon}^{(m)}\boldsymbol{\lambda}^{(m)} + (1-f)\boldsymbol{\varepsilon}_2 \left[(1-\alpha_r)\sum_{i=1}^{3} f_i^{(s)}\boldsymbol{\lambda}_i^{(s)} + \alpha_r \sum_{i=1}^{3} f_i^{(r)}\boldsymbol{\lambda}_i^{(r)} \right] \right) \times \\ &\times \left(f\,\boldsymbol{\lambda}^{(m)} + (1-f)\left[(1-\alpha_r)\sum_{i=1}^{3} f_i^{(s)}\boldsymbol{\lambda}_i^{(s)} + \alpha_r \sum_{i=1}^{3} f_i^{(r)}\boldsymbol{\lambda}_i^{(r)} \right] \right)^{-1}, \end{aligned} \tag{6}$$

где $f_i^{(s)}$, $f_i^{(r)}$; $i = 1, 2, 3$ – относительные объемные доли видов включений, моделирую-

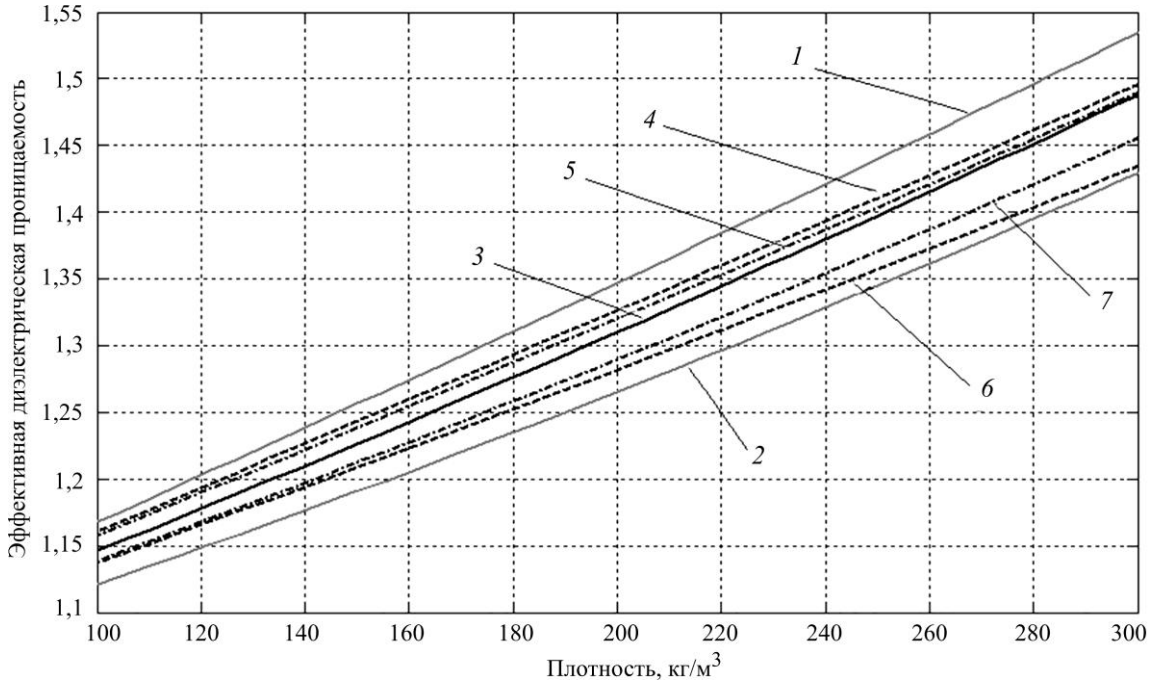
щих стенки и ребра соответственно (условия нормировки для них: $\sum_{i=1}^{3} f_i^{(s)} = 1$, $\sum_{i=1}^{3} f_i^{(r)} = 1$); $\boldsymbol{\lambda}_i^{(s)}$, $\boldsymbol{\lambda}_i^{(r)}$; $i = 1, 2, 3$ – тензоры соответствующих видов включений, определяемые выражением (3); $\boldsymbol{\varepsilon}_2$ – тензор диэлектрической проницаемости полимера, составляющего стенки и ребра.

Результаты модельных расчетов. Проведены расчеты эффективной диэлектрической проницаемости макроскопически изотропного пенопласта с полимерным связующим на основе ЭД-20 ($\boldsymbol{\varepsilon}_2 \approx 3{,}8$ [10]) и полостями, заполненными фреоном ($\boldsymbol{\varepsilon}_1 \approx 1$), в зависимости от кажущейся (средней по объему) плотности материала, которая вычисляется по формуле

$$\langle \rho \rangle = f\rho_1 + (1-f)\rho_2,$$

где $\rho_1 \approx 3$ кг/м^3 – плотность фреона [11]; $\rho_2 \approx 1250$ кг/м^3 – плотность полимерного связующего [10].

Результаты расчетов, полученные различными методами, приведены на рисунке.



Зависимости эффективной диэлектрической проницаемости пенопласта на основе отвержденной ЭД-20 с порами, заполненными фреоном, от кажущейся плотности материала, полученные по первой модели (*1* – приближение Максвелла – Гарнетта; *2* – метод самосогласования; *3* – асимметричное уравнение Бруггемана) и по второй модели (*4–7*). Кривые *4*, *5* получены для слабовытекшего многогранника (α_r = 0,1); *6*, *7* – для сильновытекшего многогранника (α_r = 0,8); *4*, *6* – обобщенные приближения Максвелла – Гарнетта; *5*, *7* – метод самосогласования

Dependencies of the effective permittivity of a polyepoxide foam material based on a solidified ED-20 with pores filled with freon, depending on the apparent density of the material, obtained from the first model (*1* – Maxwell – Garnett approximation; *2* – self-consistent method; *3* – asymmetrical Bruggeman's equation) and from the second model (*4–7*). Curves *4* and *5* were obtained from a model of weakly leaked polyhedron (α_r = 0,1), *6* and *7* obtained from a model of heavily leaked polyhedron (α_r = 0,8); curves *4* and *6* obtained using the Maxwell – Garnett approximation, curves *5* and *7* – using self-consistent method

Расчеты проведены на основе полученных модельных выражений (5) и (6) в обобщенном сингулярном приближении при параметре среды сравнения, равном параметру матрицы (данный вариант эквивалентен обобщенному приближению Максвелла – Гарнетта [6, 8]), и методом самосогласования ($\boldsymbol{\varepsilon}^c = \boldsymbol{\varepsilon}^*$). На основе второй модели расчеты проведены для двух вариантов формы ячейки пенопласта – слабовытекшего (α_r = 0,1) или сильновытекшего (α_r = 0,8) многогранника. Также эффективная характеристика вычислялась по асимметричному уравнению Бруггемана [6, 12]:

$$\left(\varepsilon^*/\varepsilon_2\right)^{1/3} = \frac{1}{1-f}\,\frac{\varepsilon_1-\varepsilon^*}{\varepsilon_1-\varepsilon_2}. \qquad (7)$$

Приведенные на рисунке зависимости показывают качественное соответствие экспериментальным данным [2]. Для конкретного материала лучшее количественное соответствие может дать какой-то определенный метод. В частности, диэлектрическая проницаемость пенопласта ПЭ-2Т при изменении кажущейся плотности материала от 80 до 250 кг/м^3 меняется в пределах 1,12–1,40. Наилучшее соответствие для него показывают зависимости *3* (по асимметричному уравнению Бруггемана (7)), *4* и *5* (вторая модель, случай слабовытекшего многогранника). Следует отметить, что при расчете по второй модели значения ε^*, полученные для формы ячеек в виде слабовытекшего многогранника, выше, чем для формы ячеек в виде сильновытекшего многогранника.

Заключение. С помощью предложенных подходов к прогнозированию диэлектрической проницаемости пенополиэпоксидного материала, основанных на обобщенном сингулярном приближении, получены модельные расчетные выражения (5) и (6).

Проведенные модельные расчеты эффективной диэлектрической проницаемости пенопласта на основе отвержденной ЭД-20 с порами, заполненными фреоном, показывают качественное соответствие полученных результатов экспериментальным.

Литература

1. ***Чухланов В.Ю., Панов Ю.Т., Синявин А.В., Ермолаева Е.В.*** Газонаполненные пластмассы. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. 152 с.

2. ***Берлин А.А., Шутов Ф.А.*** Пенополимеры на основе реакционноспособных олигомеров. М.: Химия, 1978. 296 с.

3. ***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. 305 с.

4. ***Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю.*** Оценки диэлектрической проницаемости сферопластика // Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электрон. журн. 2016. № 3. С. 29–46.

5. ***Шермергор Т.Д.*** Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.

6. ***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. С. 58–65.

7. ***Фокин А.Г.*** О границах для эффективной диэлектрической проницаемости неоднородных материалов // ЖТФ. 1973. Т. 43. Вып. 1. С. 71–77.

8. ***Завгородняя М.И., Лавров И.В., Фокин А.Г.*** Аналитический подход к вычислению эффективных диэлектрических характеристик гетерогенных текстурированных материалов со случайной формой включений // Изв. вузов. Электроника. 2014. № 5. С. 3–14.

9. ***Борен К., Хафмен Д.*** Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.

10. ***Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В.*** Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. 232 с.

11. Химическая энциклопедия: в 5 т. / гл. ред. Н.С. Зефиров. М.: Большая российская энциклопедия, 1998. Т. 5. 784 с.

12. ***Bruggeman D.A.G.*** Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen // Ann. Physik. 1935. B. 24. S. 636–664.

Поступила в редакцию 09.11.2020 г.; после доработки 09.11.2020 г.; принята к публикации 08.02.2021 г.

Лавров Игорь Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики № 2 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), iglavr@mail.ru

Бардушкин Владимир Валентинович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики № 2 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), bardushkin@mail.ru

Яковлев Виктор Борисович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики № 2 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), главный научный сотрудник, начальник отдела Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (Россия, 115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а, стр. 11), yakvb@mail.ru

Бардушкин Андрей Владимирович – инженер-электроник кафедры высшей математики № 2 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер ООО «Альфачип» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1, стр. 8), i170k@yandex.ru

References

1. Chukhlanov V.Yu., Panov Yu.T., Sinyavin A.V., Yermolayeva E.V. *Gas-filled plastics.* Vladimir, Vladimir State Univ. Publ., 2008. 152 p. (In Russian).

2. Berlin A.A., Shutov F.A. *Foam-polymers on the base of reaction-able oligomers*. Moscow, Chemistry Publ., 1978. 296 p. (In Russian).

3. 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. Doct. Tech. Sci. Moscow, 2018. 305 p. (In Russian).

4. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N., Savelyeva I.Yu. The spheroplastic permittivity estimates. *Radiooptika. MGTU im. N.E. Baumana. Elektronnyy zhurnal = Radiooptics. Electronic journan of Bauman MSTU*, 2016, no. 3, pp. 29–46. (In Russian).

5. Shermergor T.D. *Micromechanics of inhomogeneous medium*. Moscow, Science Publ., 1977, 399 p. (In Russian).

6. 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, pp. 58–65. (In Russian).

7. Fokin A.G. On bounds for the effective permittivity of inhomogeneous materials. *Soviet Physics: Technical Physics*, 1973, vol. 18, p. 44.

8. Zavgorodnyaya M.I., Lavrov I.V., Fokin A.G. Analytical approach to calculating the effective dielectric characteristics of heterogeneous textured materials with randomly shaped inclusions. *Semiconductors*, 2015, vol. 49, no. 13, pp. 1718–1726.

9. Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and scattering of light by small particles*. Weinheim, Wiley-VCH Publ., 1998. 544 p.

10. Chernin I.Z., Smekhov F.M., Zherdev Yu.V. *Epoxy polymers and compositions*. Moscow, Chemistry Publ., 1982. 232 p. (In Russian).

11. *Chemical Encyclopedia:* in 5 v.: Vol. 5. Ed. by. N.S. Zefirov. Moscow, Bol'shaya rossiyskaya Entsiklopediya, 1998. 784 p. (In Russian).

12. Bruggeman D. A. G. Calculation of various physical constants of heterogeneous substances. I. Dielectric constants and conductivities of the mixture of isotropic substances. *Ann. Physics*, 1935, vol. 24. pp. 636–664. (in German).

Received 09.11.2020; Revised 09.11.2020; Accepted 08.02.2021.

Information about the authors:

Igor V. Lavrov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the High Mathematics-2 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), iglavr@mail.ru

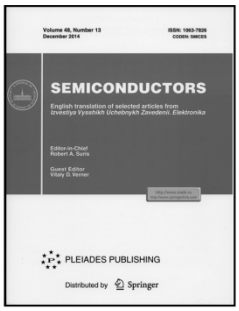
Vladimir V. Bardushkin – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the High Mathematics-2 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), bardushkin@mail.ru

Victor B. Yakovlev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the High Mathematics-2 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Chief Researcher, Head of Department, Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences (Russia, 115487, Moscow, Nagatinskaya st., 16a, bld. 11), yakvb@mail.ru

Andrey V. Bardushkin – Hardware Engineer of the High Mathematics-2 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Engineer, LLC «Alphachip» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1, bld. 8), i170k@yandex.ru

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



SEMICONDUCTORS

Vol. 54, *No.* 13, 2020. - ISSN PRINT: 1063-7826,
ISSN ONLINE: 1090-6479,
в котором опубликованы избранные статьи журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».

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

УДК 539.23:535.343.9:[546.26-462-022.532] DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-123-131

Влияние инкапсуляции фуллеренов на оптические и термоэлектрические свойства углеродных нанотрубок

Е.В. Морозова, Д.А. Тимкаева

Ульяновский государственный университет, г.Ульяновск, Россия

kat-valezhanina@yandex.ru

Гибридные системы на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и фуллеренов перспективны для применений в наноэлектронике. При незначительных вариациях диаметра УНТ происходит изменение геометрии фуллеренов. Упорядоченно расположенные фуллерены внутри нанотрубки представляют собой набор квантовых точек в одномерной сверхрешетке. Изменяя концентрацию фуллеренов внутри нанотрубки, типы фуллеренов, можно модулировать зонную структуру системы УНТ – фуллерен и управлять ее электронными и фононными характеристиками. В работе исследованы оптические и термоэлектрические свойства УНТ с инкапсулированными молекулами фуллерена C_{60}. С помощью первопринципных методов рассчитаны коэффициенты поглощения, оптической проводимости, теплопроводности, термоэлектрической добротности для металлической УНТ с фуллеренами, периодически расположенными внутри нанотрубки на разных расстояниях друг от друга. Установлено, что при уменьшении расстояния между фуллеренами оптическая проводимость системы УНТ – C_{60} на высоких частотах подавляется. Показано, что кондактанс структур с фуллеренами меньше, чем кондактанс чистой нанотрубки, и приблизительно одинаковый для расстояний между фуллеренами, равных 12,3 и 19,7 Å. Выяснено, что теплопроводность УНТ вследствие инкапсуляции фуллеренов существенно (в 3–4 раза) уменьшается для системы УНТ (8,8) – C_{60}.

Ключевые слова: углеродная нанотрубка; фуллерен; оптическое поглощение; проводимость; теория функционала плотности; термоэлектрические свойства

Для цитирования: Морозова Е.В., Тимкаева Д.А. Влияние инкапсуляции фуллеренов на оптические и термоэлектрические свойства углеродных нанотрубок // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 2. С. 123–131. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-123-131

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание 0830-2020-0009).

© Е.В. Морозова, Д.А. Тимкаева, 2021

Influence of Encapsulation of Fullerenes on Optical and Thermoelectric Properties of Carbon Nanotubes

E.V. Morozova, D.A. Timkaeva

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

kat-valezhanina@yandex.ru

Abstract: The hybrid systems based on the carbon nanotubes (CNT) and fullerenes (nanopipodes) are promising for applications in nanoelectronics. With insignificant variation of the CNT diameter the change of the fullerenes geometry takes place. The periodically located inside fullerenes represent a set of quantum points in the one-dimensional super-lattice. Using the variation of inside fullerenes it is possible to modulate the zone structure of the CNT – fullerene system and to control the electronic and phonon characteristics of nanopipodes. In the work the optical and thermoelectric properties of CNT with encapsulated molecules of C_{60} fullerene have been investigated. Using the first-principle methods the coefficients of absorption, optical conductivity, thermal conductivity, thermoelectric figure of merit for CNT with fullerenes, periodically located inside the nanotubes at different distances from each other, have been calculated. It has been shown that with decreasing the distance between fullerenes the optical conductivity of CNT – C_{60} is suppressed at high frequencies. It has been determined that the conductance of the structures with fullerenes is less than the conductance of a clean tube, and approximately equal for considered distances (12.3 and 19.7 Å) between fullerenes. The CNT thermal conductivity due to the encapsulation of fullerenes considerably (3–4 times) decreases for the considered CNT (8.8) – C_{60} systems.

Keywords: carbon nanotube; fullerene; optical absorption; conductivity; density functional theory; thermoelectric properties

For citation: Morozova E.V., Timkaeva D.A. Influence of encapsulation of fullerenes on optical and thermoelectric properties of carbon nanotubes. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 123–131. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-123-131

Funding: the study has been supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state program 0830-2020-0009).

Введение. Модуляция свойств углеродных нанотрубок (УНТ) значительно улучшает характеристики материала и открывает новые области их применения. Важным свойством УНТ является наличие наноразмерной внутренней полости. Это позволяет вводить во внутреннее пространство УНТ различные материалы, в частности молекулы фуллерена [1, 2].

В гибридных системах на основе УНТ и фуллеренов, называемых также углеродными нанопиподами [3, 4], при незначительных вариациях диаметра УНТ происходит изменение геометрии фуллеренов. Такие гибридные системы, связанные ван-дер-ваальсовым взаимодействием, перспективны для применений в наноэлектронике [4–9]. Упорядоченно расположенные фуллерены внутри нанотрубки представляют собой набор квантовых точек в одномерной сверхрешетке. С помощью изменения концентрации

фуллеренов внутри нанотрубки и типов фуллеренов можно модулировать зонную структуру системы УНТ – фуллерен и управлять ее электронными и фононными характеристиками.

В работе [10] проанализировано влияние на теплопроводность материала при различных температурных условиях введения инкапсулированных фуллеренов C_{60} в УНТ. Результаты сканирующей туннельной микроскопии (зондирование непосредственно над инкапсулированными фуллеренами C_{60}) показали радикальную модификацию локальной электронной структуры полупроводника. Отмечено, что возмущение присутствует в зоне проводимости. Это приводит к резкому увеличению плотности локализованных состояний.

Поиск новых термоэлектрических материалов – важное направление исследований, связанное с возможным применением в системах производства электроэнергии и охлаждения. Проводимые исследования указывают на важную роль квазиодномерной геометрии в улучшении термоэлектрических свойств наносистем [10].

В настоящей работе с помощью первопринципных методов рассчитываются оптические и термоэлектрические свойства металлических УНТ с фуллеренами, периодически расположенными внутри нанотрубки на разных расстояниях друг от друга.

Оптические свойства системы УНТ (8,8) – C_{60}. Исследованы металлические УНТ с хиральностью (8,8). Расстояния R между фуллеренами C_{60} равны 12,3 и 19,7 Å, что соответствует 5 и 8 продольным размерам элементарной ячейки (2,46 Å) кресельной УНТ. Диаметр фуллерена C_{60} равен 7,1 Å, что составляет примерно три ширины элементарной ячейки кресельной УНТ. Наименьшее расстояние от фуллерена до стенки УНТ равно 1,875 Å (рис.1).

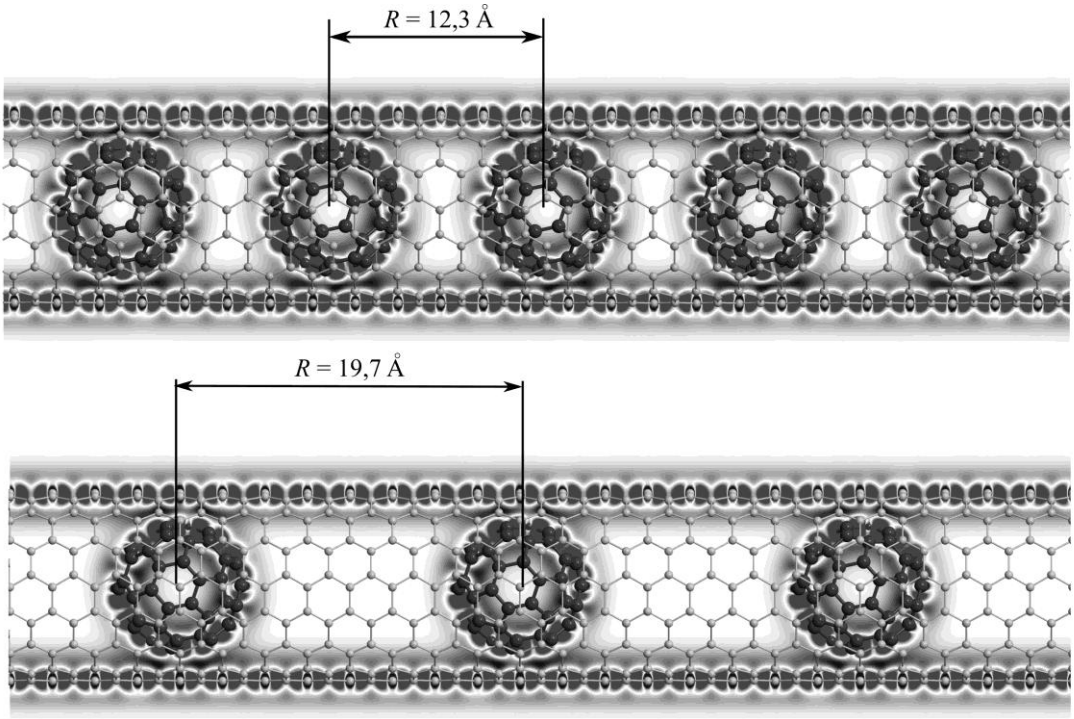


Рис.1. Геометрия задачи и электронная плотность состояния системы УНТ (8,8) – C_{60}
Fig.1. Geometry of the system and electron density of CNT (8,8) with encapsulated fullerenes

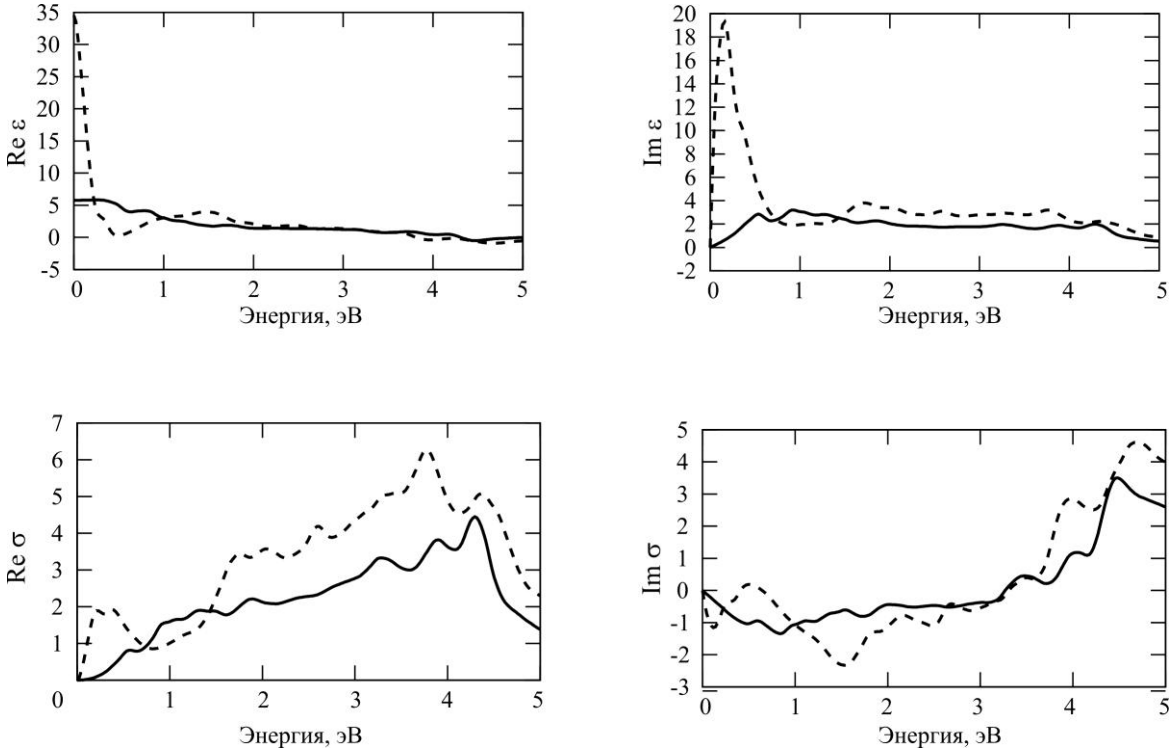


Рис.2. Оптические свойства системы УНТ (8,8) – C_{60} с расстоянием между центрами фуллеренов R = 19,7 Å (—— *xx*; – – – *yy*)

Fig.2. Optical properties of CNT (8,8) – C_{60} system for distance between fullerene centers R = 19,7 Å (—— *xx*; – – – *yy*)

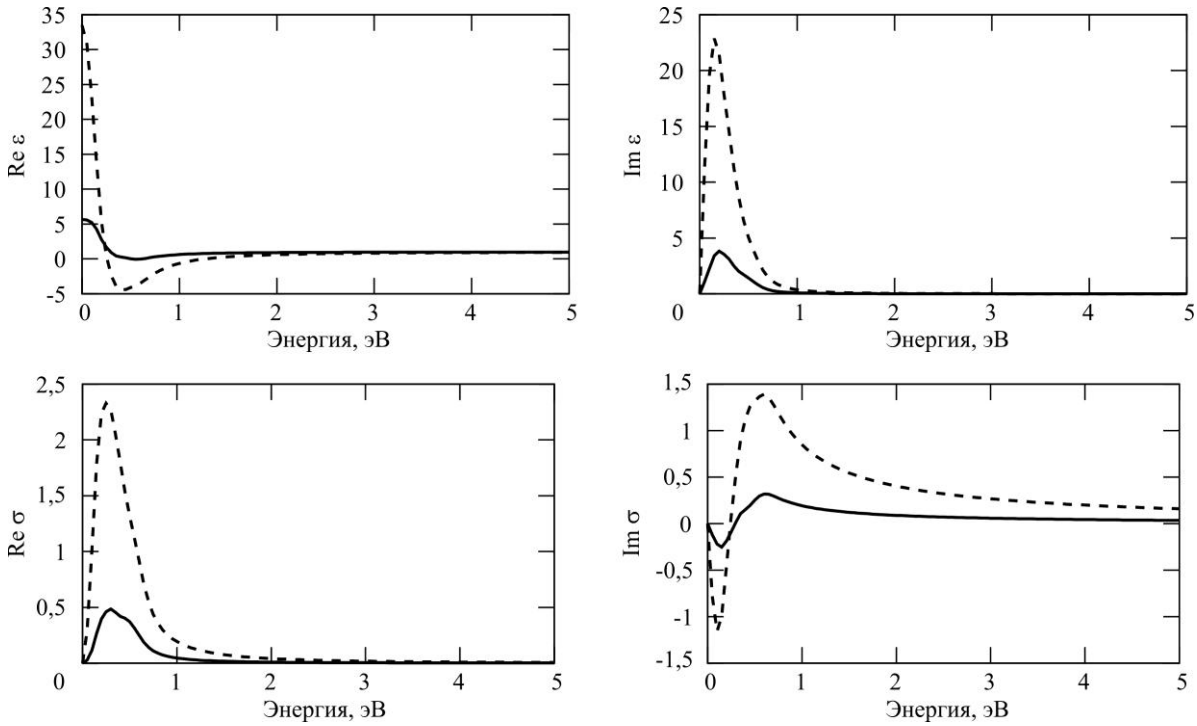


Рис.3. Оптические свойства системы УНТ (8,8) – C_{60} с расстоянием между центрами фуллеренов R = 12,3 Å (—— *xx*; – – – *yy*)

Fig.3. Optical properties of CNT (8,8) – C_{60} system for distance between fullerene centers R = 12,3 Å (—— *xx*; – – – *yy*)

Оптимизация систем УНТ (8,8) – C_{60} проведена с использованием метода функционала плотности (DFT), реализованного в программе QuantumATK компании Synopsys. Энергия отсечки электронных волновых функций составляет 500 эВ. Критерии надежной сходимости для полной энергии и силы равны 10^{-6} эВ и 0,01 эВ/Å соответственно. Эффекты электронного обмена и корреляции описаны с помощью приближения Пердью – Бурка – Эрнзерхофа, обобщенного на случай твердых тел (GGA-PBEsol) [11]. Для генерации k точек в зоне Бриллюэна для всех УНТ применен метод Монкхорста – Пака [12] с сеткой 1×1×24.

От диэлектрической восприимчивости и геометрии зависят оптические свойства УНТ. С использованием подхода Кубо – Гринвуда [13] и теории функционала плотности в программе QuantumATK рассчитаны диэлектрическая проницаемость и оптическая проводимость металлических одностенных УНТ. Согласно формуле Кубо – Гринвуда тензор восприимчивости равен:

$$\chi_{ij}(\omega) = -\frac{e^2\hbar^4}{m^2\varepsilon_0 V\omega^2}\sum_{nm}\frac{f(E_m)-f(E_n)}{E_{nm}-\hbar\omega-\Gamma}\pi^i_{nm}\pi^j_{nm},$$

где π^i_{nm}, π^j_{nm} – i-я и j-я соответственно конфигурации диполя в матрице элементов между уровнями n и m.

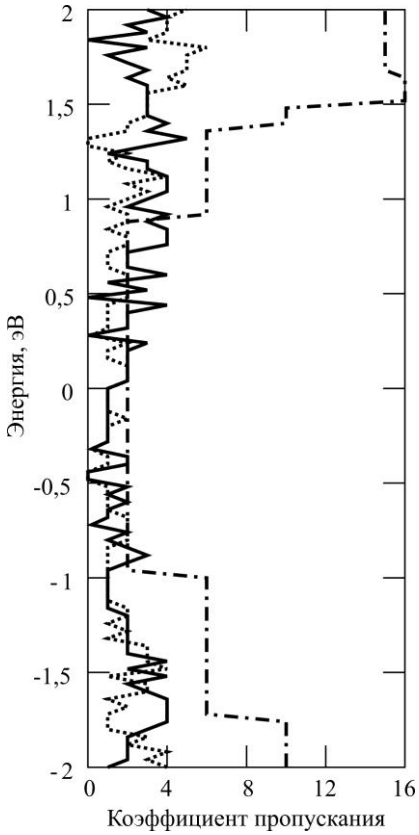


Рис.4. Спектры пропускания системы УНТ (8,8) – C_{60} с расстояниями между центрами фуллеренов R = 12,3 Å (——), R = 19,7 Å (– · – · –) и чистой УНТ (8,8) (– – –)
Fig.4. Transmission spectra of the CNT (8,8) – C_{60} system for different distances between fullerene centers R = 12,3 Å (——), R = 19,7 Å (– · – · –) and pristine CNT (8,8) (– – –)

В работах [14, 15] для исследования оптических свойств графениленовых и октографеновых УНТ выбрана ориентация по оси z, плоскость xy перпендикулярна оси УНТ. Аналогичная ориентация выбрана для металлической УНТ с инкапсулированными фуллеренами. Оптическая проводимость, комплексный показатель преломления и коэффициент поглощения рассчитываются по следующим формулам:

$$\sigma = -i\omega\varepsilon_0\chi(\omega); \quad n+i\kappa = \sqrt{1+i\frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega}}; \quad \alpha = 2\frac{\omega}{c}\kappa.$$

На рис.1 показаны геометрия задачи и электронная плотность состояния УНТ (8,8) с фуллереном C_{60}. Ван-дер-ваальсово взаимодействие УНТ и фуллерена может привести к радикальным изменениям электронных и транспортных свойств нанотрубки. Проведем моделирование образца УНТ и фуллерена, инкапсулированного внутрь нанотрубки. При изменении расстояния между фуллеренами меняется их концентрация внутри нанотрубки. Рассмотрим, как влияет концентрация фуллеренов на оптические и термоэлектрические свойства моделируемой структуры (рис.2 и 3).

Из рис.2 и 3 видно, что при уменьшении расстояния между фуллеренами оптическая проводимость системы УНТ – C_{60} на высоких частотах подавляется.

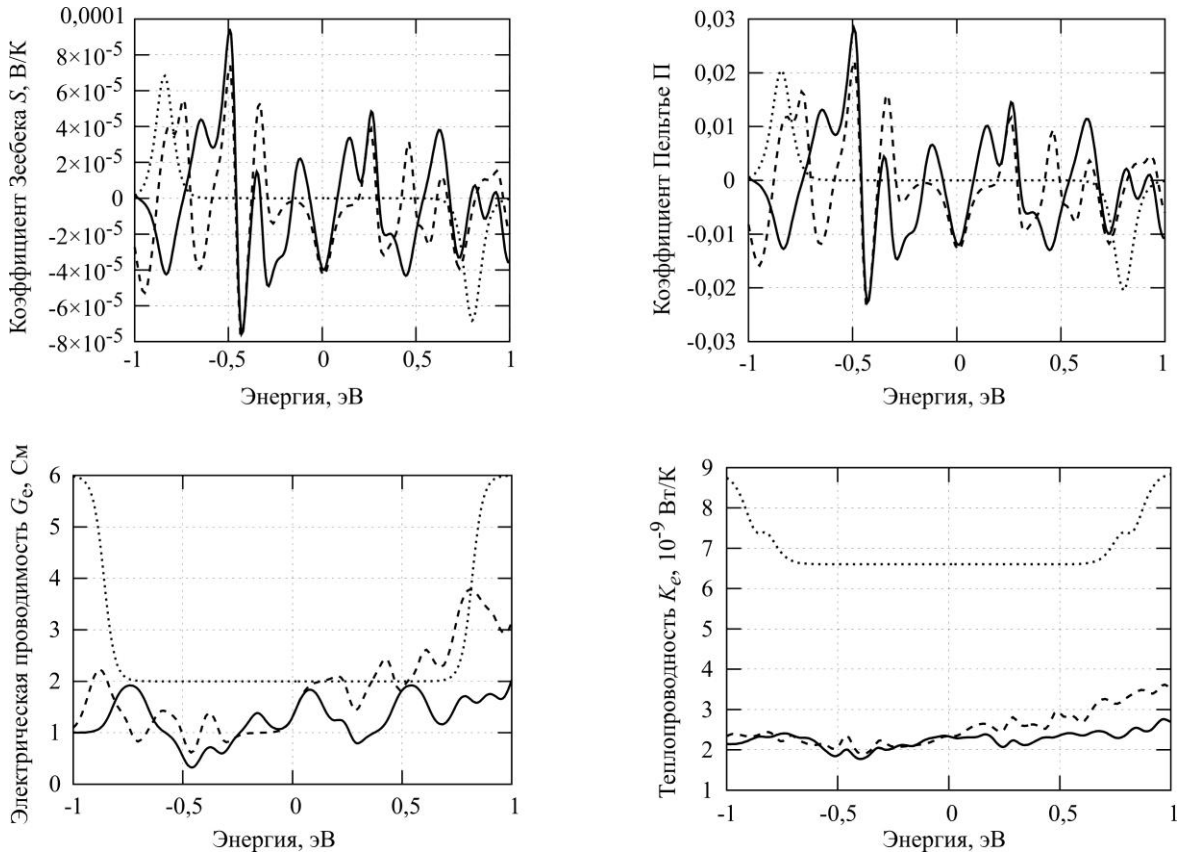


Рис.5. Термоэлектрические коэффициенты системы УНТ (8,8) – C_{60} с расстояниями между центрами фуллеренов R = 12,3 Å (——), R = 19,7 Å (– · – · –) и чистой УНТ (8,8) (– – –)
Fig.5. Thermoelectric coefficients of CNT (8,8) – C_{60} system for distances between fullerene centers R = 12,3 Å (——), R = 19,7 Å (– · – · –) and pristine CNT (8,8) (– – –)

На рис.4 представлены спектры пропускания система УНТ – C_{60} с расстояниями между центрами фуллеренов, равными 12,3 и 19,7 Å и чистой УНТ. Спектр пропускания напрямую связан с кондактансом (рис.5). Кондактанс структур с фуллеренами меньше, чем кондактанс чистой нанотрубки, и приблизительно одинаковый (в пределах флуктуаций) для рассматриваемых расстояний между фуллеренами.

Термоэлектрические свойства системы УНТ (8,8) – C_{60}. В программе QuantumATK 2018.06 проведено моделирование термоэлектрических свойств системы УНТ (8,8) – C_{60}. Определены значения коэффициентов Зеебека S, Пельтье П, добротности ZT, электрической проводимости G_e, электронной λ_e и фононной λ_{ph} теплопроводностей. Для расчета коэффициентов переноса использованы метод неравновесных функций Грина (NEGF), метод DFT и неравновесная молекулярная динамика. Применена стандартная модель, в которой центральная часть нанотрубки соединена с полубесконечными левым и правым электродами. Программа QuantumATK вычисляет указанные термоэлектрические коэффициенты и коэффициент Пельтье в соответствии с теорией линейного отклика:

$$G_e = \left.\frac{dI}{dV_{bias}}\right|_{dT=0}; \quad S = -\left.\frac{dV_{bias}}{dT}\right|_{I=0}; \quad \lambda_e = \left.\frac{dI_Q}{dT}\right|_{I=0}; \quad \Pi = \left.\frac{I_Q}{I}\right|_{dT=0} = SV_{bias}.$$

Термоэлектрическую проводимость материалов принято определять, исходя из безразмерного коэффициента добротности *ZT*, включающего в себя термоэлектрические и электрические характеристики [16]:

$$ZT = \frac{S^2 GT}{\lambda},$$

где S – коэффициент Зеебека; G – электрическая проводимость, равная сумме электронной λ_e и фононной λ_{ph} теплопроводностей. Коэффициент Зеебека S определяется как отношение развиваемого напряжения к градиенту температуры ($\Delta V/\Delta T$).

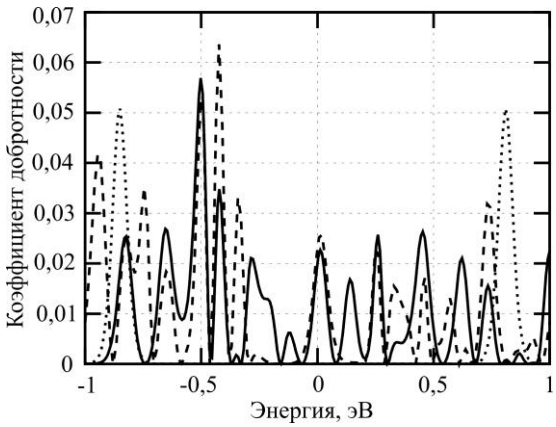


Рис.6. Коэффициент добротности системы УНТ (8,8) – C_{60} с расстояниями между центрами фуллеренов R = 12,3 Å (——), R = 19,7 Å (– · – · –) и чистой УНТ (8,8) (– – –)

Fig.6. Figure of merit *ZT* for CNT (8,8) – C_{60} system for distances between fullerene centers R = 12,3 Å (——), R = 19,7 Å (– · – · –) and pristine CNT (8,8) (– – –)

На рис.5 и 6 показаны результаты вычислений термоэлектрических коэффициентов при температуре T = 300 К. В зависимости от расстояния между центрами двух соседних фуллеренов в УНТ меняются значения электрической проводимости, теплопроводимости, коэффициентов Зеебека, Пельтье, добротности *ZT*.

Заключение. Результаты расчетов коэффициентов поглощения, оптической проводимости, теплопроводности, термоэлектрической добротности для металлической УНТ с фуллеренами, периодически расположенными внутри нанотрубки на разных расстояниях друг от друга, показали следующее.

При уменьшении расстояния между фуллеренами оптическая проводимость системы УНТ – C_{60} на высоких частотах подавляется. Кондактанс структур с фуллеренами чуть меньше, чем кондактанс чистой нанотрубки, и приблизительно одинаковый для расстояний между фуллеренами 12,3 и 19,7 Å.

Теплопроводность УНТ вследствие инкапсуляции фуллеренов существенно уменьшается. Коэффициент Зеебека УНТ существенно возрастает после инкапсуляции молекул фуллерена вследствие сильного взаимодействия между УНТ и инкапсулированными молекулами C_{60}. При этом полученные значения добротности недостаточны для термоэлектрических применений систем УНТ – C_{60}.

Литература

1. Optical band gap modification of single-walled carbon nanotubes by encapsulated fullerenes / ***T. Okazaki, S. Okubo, T. Nakanishi et al.*** // Journal of the American Chemical Society. 2008. Vol. 130. No. 12. P. 4122–4128.

2. Modulation of thermal and thermoelectric transport in individual carbon nanotubes by fullerene encapsulation / ***T. Kodama, M. Ohnishi, W. Park et al.*** // Nature materials. 2017. Vol. 16. No. 9. P. 892–897.

3. ***Jaroenapibal P., Chikkannanavar S., Luzzi, D., Evoy S.*** Nanomechanical resonance studies of carbon nanotube peapod bundles // Journal of Applied Physics. 2005. Vol. 98. No. 4. P. 044301.

4. Повышение показателей качества радиоэлектронных систем нового поколения за счет применения резонансно-туннельных нанодиодов / ***Ю.А. Иванов, С.А. Мешков, В.Ю. Синякин и др.*** // Наноинженерия. 2011. № 1. С. 34–44.

5. ***Smith B.W., Monthioux M., Luzzi D.E.*** Encapsulated C_{60} in carbon nanotubes // Nature. 1998. Vol. 396. No. 6709. P. 323–324.

6. Carbon nanotubes: solution for the therapeutic delivery of siRNA / ***D. Kirkpatrick, M. Weiss, A. Naumov et al.*** // Materials. 2012. Vol. 5. No. 2. P. 278–301.

7. Superconductivity in single crystals of the fullerene C_{70} / ***J.H. Schön, C. Kloc, T. Siegrist et al.*** // Nature. 2001. Vol. 413. No. 6858. P. 831–833.

8. Photodissociation of polycrystalline and amorphous water ice films at 157 and 193 nm / ***A. Yabushita, D. Kanda, N. Kawanaka et al.*** // The Journal of Chemical Physics. 2006. Vol. 125. No. 13. P. 133406.

9. ***Chadli H., Fergani F., Rahmani A.*** Structural and vibrational properties of C_{60} and C_{70} fullerenes encapsulating carbon nanotubes // Fullerenes and Relative Materials: Properties and Applications. London, United Kingdom: IntechOpen, 2018. P. 69–94.

10. ***Ouyang Y., Guo J.*** A theoretical study on thermoelectric properties of graphene nanoribbons // Applied Physics Letters. 2009. Vol. 94. No. 26. P. 263107.

11. Assessing the performance of recent density functionals for bulk solids / ***G.I. Csonka, J.P. Perdew, A. Ruzsinszky et al.*** // Physical Review B. 2009. Vol. 79. No. 15. P. 155107.

12. ***Monkhorst H.J., Pack J.D.*** Special points for Brillouin-zone integrations // Physical Review B. 1976. Vol. 13. No. 12. P. 5188.

13. ***Pendry J.B., MacKinnon A.*** Calculation of photon dispersion relation // Physical Review Letters. 1992. Vol. 69. P. 2772–2775. DOI: 10.1103/PhysRevLett.69.2772

14. Optical and thermoelectric properties of graphenylene and octagraphene nanotubes from first-principles calculations / ***Kochaev A.I. et al.*** // Computational Materials Science. 2021. Vol. 186. P. 109999.

15. ***Meftakhutdinov R.M., Sibatov R.T., Kochaev A.I.*** Graphenylene nanoribbons: electronic, optical and thermoelectric properties from first-principles calculations // Journal of Physics: Condensed Matter. 2020. Vol. 32. No. 348. P. 345301.

16. ***Af J.*** Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling. London, United Kingdom: Infosearch Limited London, 1957. 184 p.

Поступила в редакцию 03.12.2020 г.; после доработки 22.01.2021 г.; принята к публикации 08.02.2021 г.

Морозова Екатерина Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики Ульяновского государственного университета (Россия, 432700, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42), kat-valezhanina@yandex.ru

Тимкаева Диана Абдулхаковна – аспирант кафедры теоретической физики Ульяновского государственного университета (Россия, 432700, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42), dianatimkaeva@mail.ru

References

1. Okazaki T., Okubo S., Nakanishi T., Joung S., Saito T., Otani M., Okada S., Bandow S., Iijima S. Optical band gap modification of single-walled carbon nanotubes by encapsulated fullerenes. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, vol. 130, no. 12, pp. 4122–4128.

2. Kodama T., Ohnishi M., Park W., Shiga T., Park J., Shimada T., Shinohara H., Junichiro Shiomi J., Goodson K. Modulation of thermal and thermoelectric transport in individual carbon nanotubes by fullerene encapsulation. *Nature Materials*, 2017, vol. 16, no. 9, pp. 892–897.

3. Jaroenapibal P., Chikkannanavar S., Luzzi, D., Evoy S. Nanomechanical resonance studies of carbon nanotube peapod bundles. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 98, no. 4, p. 044301.

4. Ivanov Yu.A., Meshkov S.A., Sinyakin V.Yu., Fedorkova N.V., Fedorov I.B., Shashurin V.D., Fedorenko I.A. Improving quality indicators of new generation of electronic systems through the use of resonant-tunneling nano-diodes. *Nanoengineering*, 2011, no. 1, pp. 34–44. (In Russian).

5. Smith B.W., Monthioux M., Luzzi D.E. Encapsulated C_{60} in carbon nanotubes. *Nature*, 1998, vol. 396, no. 6709, pp. 323–324.

6. Kirkpatrick D., Weiss M., Naumov A., Bartholomeusz G., Weisman R., Gliko O. Carbon nanotubes: solution for the therapeutic delivery of siRNA. *Materials*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 278–301.

7. Schön J.H., Kloc C., Siegrist T., Steigerwald M., Svensson C., Batlogg B. Superconductivity in single crystals of the fullerene C_{70}. *Nature*, 2001, vol. 413, no. 6858, pp. 831–833.

8. Yabushita A., Kanda D., Kawanaka N., Kawasaki M., Ashfold M.N. Photodissociation of polycrystalline and amorphous water ice films at 157 and 193 nm. *The Journal of Chemical Physics*, 2006, vol. 125, no. 13, p. 133406.

9. Chadli H., Fergani F., Rahmani A. Structural and vibrational properties of C_{60} and C_{70} fullerenes encapsulating carbon nanotubes. *Fullerenes and Relative Materials: Properties and Applications*, London, United Kingdom, IntechOpen, 2018, pp. 69–94.

10. Ouyang Y., Guo J. A theoretical study on thermoelectric properties of graphene nanoribbons. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, no. 26, p. 263107.

11. Csonka G.I., Perdew J.P., Ruzsinszky A., Philipsen P., Lebègue S., Paier J., Vydrov O.A., Ángyán J.G. Assessing the performance of recent density functionals for bulk solids. *Physical Review B*, 2009, vol. 79, no. 15, p. 155107.

12. Monkhorst H.J., Pack J.D. Special points for Brillouin-zone integrations. *Physical Review B*, 1976, vol. 13, no. 12, p. 5188.

13. Pendry J.B., MacKinnon A. Calculation of photon dispersion relation. *Phys. Rev. Lett*., 1994, vol. 69, p. 2772. DOI: 10.1103/PhysRevLett.69.2772

14. Kochaev A.I. et al. Optical and thermoelectric properties of graphenylene and octagraphene nanotubes from first-principles calculations. *Computational Materials Science*, 2021, vol. 186, p. 109999.

15. Meftakhutdinov R.M., Sibatov R.T., Kochaev A. I. Graphenylene nanoribbons: electronic, optical and thermoelectric properties from first-principles calculations. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2020. vol. 32, no. 348, p. 345301.

16. Af J. *Semiconductor thermoelements and thermoelectric cooling, infosearch*. London, United Kingdom, Infosearch Limited London, 1957. 184 p.

Received 03.12.2020; Revised 22.01.2021; Accepted 08.02.2021.

Information about the authors:

Ekaterina V. Morozova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Theoretical Physics Department, Ulyanovsk State University (Russia, 432700, Ulyanovsk, Leo Tolstoy, 42), kat-valezhanina@yandex.ru

Diana A. Timkaeva – PhD student of the Theoretical Physics Department, Ulyanovsk State University (Russia, 432700, Ulyanovsk, Leo Tolstoy, 42), dianatimkaeva@mail.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ
TECHNOLOGICAL PROCESSORS AND ROUTES

УДК 533.932:021.3.049.77 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-132-143**

Зондовая диагностика физических процессов в магнитодинамической плазме

Ю.В. Кубарев[1], В.А. Котельников[2], М.В. Котельников[2]

[1]Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова, г. Москва, Россия
[2]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

mvk_home@mail.ru

Плазменные потоки, истекающие из космических двигателей, взаимодействуют с другими системами жизнеобеспечения космических станций, в частности с солнечными батареями. Магнитоплазмодинамический двигатель является источником разреженной низкотемпературной плазмы и может применяться в производстве полупроводниковых приборов, интегральных микросхем и в других областях. Оптимизация такого источника плазмы предполагает использование электрических зондов для диагностики плазменных образований. Проведенные исследования выполнены на основе натурных и вычислительных экспериментов. Представлены оригинальные методики обработки зондовых экспериментов в плазменных потоках, включая применение плоских и цилиндрических ориентированных зондов, а также нестационарных зондов, что позволяет расширить возможности зондового метода диагностики плазмы. Рассмотрены вопросы оптимизации зондовых измерительных схем. Приведены результаты зондовых измерений в струях как в стендовых условиях, так и в условиях ионосферы Земли. Полученные результаты имеют важное значение для плазмодинамических технологий в микроэлектронике и для радиосвязи с космическими аппаратами на плазмодинамических двигателях.

Ключевые слова: разреженная плазма; магнитоплазмодинамический двигатель; зондовая диагностика; плоские и цилиндрические ориентированные зонды; нестационарный зонд; плазменные технологии; микроэлектроника

Для цитирования: Кубарев Ю.В., Котельников В.А., Котельников М.В. Зондовая диагностика физических процессов в магнитодинамической плазме // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 2. С. 132–143. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-132-143

© Ю.В. Кубарев, В.А. Котельников, М.В. Котельников, 2021

Probe Diagnostics of Physical Processes in Magneto-Dynamic Plasma

***Yu.V. Kubarev*[1], *V.A. Kotelnikov*[2], *M.V. Kotelnikov*[2]**

[1]*Prokhorov Academy of Engineering Sciences, Moscow, Russia*
[2]*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

mvk_home@mail.ru

Abstract: Plasma streams flowing from space engines interact with other life-support systems of space stations, in particular with solar panels. The magneto-plasmadynamic motor is a source of rarefied low-temperature plasma and can be used in production of semiconductor devices, integrated circuits and in a number of other areas. At the same time, the optimization of such a plasma source involves the active use of electric probes for diagnosis of plasma formations. In the work the original methods for processing the probe experiments in plasma flows, including the use of flat and cylindrical oriented probes as well as the non-stationary probes, which allows expanding the capabilities of the probe method for plasma diagnostics, have been presented. The optimization of the probe measurement schemes has been discussed. The results of probe measurements in jets, both in the bench conditions and in conditions of the Earth' ionosphere, have been presented. The study has been carried out using both full-scale and computational experiments. In the work the original methods for processing the probe experiments in plasma flows, including the use of flat and cylindrical oriented probes, as well as non-stationary probes, which allows expanding the capabilities of the probe method of plasma diagnostics, have been presented. The studies have been carried out using the bench and computational schemes. The results obtained are important for plasmadynamic technologies in microelectronics and for radio communication with spacecraft powered by plasmadynamic engines.

Keywords: rarefied plasma; magnetoplasmadynamic engine; probe diagnostics; flat and cylindrical oriented probes; non-stationary probe; plasma technologies; microelectronics

For citation: Kubarev Yu.V., Kotelnikov V.A., Kotelnikov M.V. Probe diagnostics of physical processes in magneto-dynamic plasma. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 132–143. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-132-143

Введение. Создание космических летательных аппаратов, включая оптимизацию по весовым, габаритным и энергетическим параметрам радиотехнического и электронного оборудования, производство различных типов электрореактивных двигателей, используемых на космических летательных аппаратах, предполагает активное применение электрических зондов для диагностики как ионосферной плазмы, так и плазменных образований, возникающих в результате работы электрореактивных двигателей.

В последние годы в литературе по космической тематике большое внимание уделено взаимодействию плазменных потоков, истекающих из двигателей, с другими системами жизнеобеспечения космических станций, например с солнечными батареями. Для минимизации такого воздействия необходима диагностика, в том числе зондовая, физических процессов в двигателях и в истекающих из них плазменных потоках. Диаг-

ностика плазмы (зондовая) – это измерение в исследуемой точке таких параметров плазмы, как концентрация ионов и электронов, температура ионов и электронов, потенциал «плавающего тела» и пространства, направленная скорость плазмы и т.д. Измерение осуществляется путем внесения в плазму электрического зонда, связанного с зондовой измерительной схемой. При этом снимается ВАХ и численно обрабатывается с помощью специальных зондовых методик.

Плазменные технологии широко применяются в микроэлектронике, когда источник разреженной низкотемпературной плазмы должен быть оптимизирован для соответствующего технологического процесса. В связи с этим использование и усовершенствование различных зондовых методов диагностики плазмы, включая создание и усовершенствование зондовых электронных измерительных схем, актуальны.

Описание магнитоплазмодинамического двигателя. Рассмотрим магнитоплазмодинамический двигатель (МПДД), являющийся источником разреженной низкотемпературной плазмы. Внешний вид МПДД представлен на рис.1. Исследования МПДД проводились в МФТИ, МАИ, НПО «Энергия», НИИ тепловых процессов. Впервые он был предложен, сконструирован и испытан Ю.В. Кубаревым в 1957–1963 гг. Результаты исследований опубликованы в научно-техническом отчете МФТИ–НИИТП № 1844 и оформлены в виде научного открытия [1].

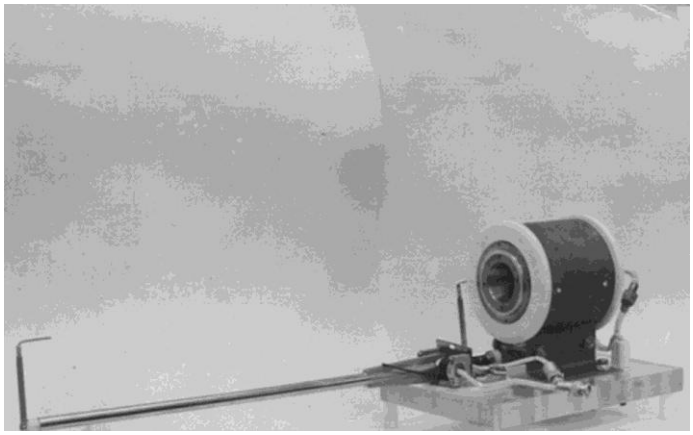


Рис.1. Внешний вид МПДД с зондами в сборе
Fig.1. Appearance of the MPDD with probes assembled

МПДП имеет систему электропитания, включающую в себя блоки электронагрева катода, зажигания дуги низкого давления между катодом и анодом, питания обмотки соленоида для создания осесимметричного магнитного поля, а также систему подачи рабочего газа, при необходимости систему охлаждения, систему диагностического оборудования для исследования физических процессов внутри двигателя и в истекающей из него струе плазмы. Поскольку двигатель предназначен для работы в ионосфере, он помещен в специальную вакуумную камеру с соответствующей системой вакуумного оборудования. Конструктивные особенности двигателя, принципы ускорения плазмы и перспективы его использования при освоении космического пространства описаны в работах [1–7].

До настоящего времени МПДД модернизировали по тяговым характеристикам, ресурсным возможностям, оптимизировали по весовым, габаритным и энергетическим параметрам. Все это требует детальной диагностики физических процессов внутри двигателя и истекающей из него струи разреженной плазмы.

Зондовая диагностика МПДД. К началу проведения зондовых экспериментов на МПДД по теории зондов были известны работы Ленгмюра, Бома, Лафрамбуаза и других авторов [8, 9]. Сведения об измерениях в плазменных потоках на тот момент отсутствовали. Впервые такие измерения проведены в НИИ тепловых процессов (г. Москва) в 1966–1968 гг. В связи с отсутствием надежной теории зонды перед измерениями в потоках плазмы тарировали путем сравнения зондовых измерений с измерениями оптическими методами и методами СВЧ-просвечивания плазмы. Теоретические основы зондовой диагностики плазменных потоков разработаны значительно позднее [10–14]. Диагностику плазменных потоков рационально проводить зондами плоской геометрии. При этом зондовый блок должен состоять из двух независимых зондов, собирающие поверхности которых располагаются навстречу потоку и вдоль потока. Можно использовать и один зонд, расположив его активную поверхность навстречу потоку, но тогда усложнится методика обработки ВАХ зонда. В обоих случаях кроме традиционно определяемых параметров струи плазмы измеряли локальные значения направленной скорости ионов. Аналогичных результатов можно достичь, используя зондовый блок, состоящий из двух скрещенных цилиндрических зондов, если ось одного цилиндра направить перпендикулярно, а ось другого – параллельно потоку [10]. При перемещении зонда вдоль радиуса струи и измерении распределения концентрации ионов n_i и их направленной скорости $u_{\text{н}}$ вдоль радиуса струи секундный расход ионов через поперечное сечение струи S равен:

$$G_i = \int_S n_i u_{\text{н}} dS.$$

Зная секундный расход газа $G_{\text{г}}$, подаваемого в МПДД, можно оценить степень ионизации плазмы: $\alpha = G_i / G_{\text{г}}$.

Математическое моделирование взаимодействия зондов с окружающей их плазмой [10] и математическое моделирование потока плазмы, истекающего из МПДД [15], позволяют получить дополнительную информацию о характерном времени релаксации плазмы τ и характерной толщине слоя объемного заряда Δ вблизи заряженного до заданного потенциала φ тела, внесенного в плазму.

Если перемещать зонд вдоль оси струи плазмы от среза сопла и измерять распределение потенциала вдоль оси, можно обнаружить вблизи сопла МПДД положительный скачок потенциала, который распространяется на расстояние (60–80)r_D от сопла (r_D – радиус Дебая). Амплитуда скачка положительного потенциала может достигать нескольких десятков вольт и зависит от направленной скорости потока $u_{\text{н}}$, отношения температуры ионов и электронов $\varepsilon = T_i / T_e$ и радиуса сопла R. Математическое моделирование плазменной струи позволяет объяснить природу этого явления. Когда плазма из МПДД достигает среза сопла, то электроны, как более легкие и скоростные частицы, быстрее ионов покидают сопло и образуют отрицательно заряженное облако, в которое происходит истечение струи. Структура электронного облака и положительно заряженной струи регулируется самосогласованным электрическим полем. Положительный заряд замедляет движение ионов из сопла, их скорость уменьшается, и этот эффект пропадает на расстоянии (60–80)r_D, где скорость выходит на свое начальное значение, которое имело место на срезе сопла. Если измерять тягу двигателя весами, то в зависимости от расположения весов относительно сопла двигателя можно получить существенно различающиеся результаты.

Отметим, что с зонда, находящегося под «плавающим» потенциалом, сигнал подавался на пластины осциллографа, где обнаружены хаотические колебания потенциала. В исследуемом диапазоне давлений ($5\cdot10^{-2}$– 1) Па и магнитных полей (H = 0 – $8\cdot10^4$ А/м) частота колебаний менялась в пределах 5–150 кГц при максимальной амплитуде ~1 В [16]. Объяснить причину этих колебаний удалось в работе [1].

Также отметим принципиальную возможность зондового метода измерять кроме электронной температуру ионов T_i. Для определения T_i необходимо экспериментально измерить время релаксации плазмы $\tau_{эксп}$ вблизи зонда после импульсного изменения его потенциала. Теоретические значения $\tau_{теор}$ в зависимости от характерных параметров задачи $r_0 = r_з / r_D$ и $\varepsilon = T_i / T_e$ ($r_з$ – геометрический размер зонда, T_e – температура электронов) приведены в работах [2, 10]. Если $\tau_{эксп}$ измерить в зондовом эксперименте и сравнить с $\tau_{теор}$, то можно получить T_i. Физическое объяснение данного результата состоит в том, что время релаксации плазмы определяется тяжелыми частицами – ионами, а в $\tau_{теор}$ входит T_i.

Для получения зондовой характеристики используется электронная измерительная схема. При проведении зондовых измерений на гиперзвуковых летательных аппаратах следует иметь в виду, что:

- с учетом высокой стоимости каждого эксперимента схема должна характеризоваться повышенной надежностью;
- схема должна иметь развязку с бортовым источником питания и телеметрией;
- количество используемых каналов телеметрии должно быть минимальным. Поскольку телеметрия передает сигналы в интервале $0 < U_{тел} < 6$ В, должно быть проведено согласование зондовых сигналов с телеметрией;
- при высокой скорости гиперзвуковых летательных аппаратов время проведения зондового эксперимента должно быть сокращено до минимума;
- весовые, геометрические и мощностные характеристики должны быть минимизированы;
- схема должна пройти испытания на повышенные вибрации, перегрузки, колебания температуры, давления и т.д.;
- к зондовой схеме относят и блоки, преобразующие электрические сигналы в коды вычислительной машины. Это позволяет осуществить автоматическую обработку зондовой характеристики и управлять зондовым экспериментом.

На рис.2 приведена блок-схема варианта электронного зондового устройства.

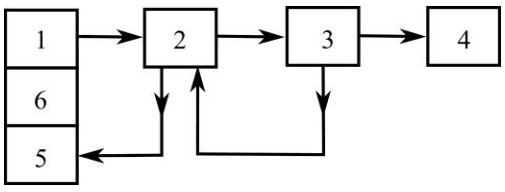


Рис.2. Блок-схема электронного зондового устройства: 1 – зонд; 2 – измеритель зондовых токов; 3 – устройство ввода-вывода; 4 – компьютер; 5 – противозонд; 6 – плазменное образование

Fig.2. Block diagram of the electronic probe device: 1 – probes; 2 – probe current meter; 3 – I/O device; 4 – computer; 5 – anti-probe; 6 – plasma formation

Плазма омывает зонд и противозонд. Она является проводником, замыкающим электрическую цепь зонда. Противозондом могут быть катод или анод источника плазмы, а также любое другое большое проводящее тело (по сравнению с размером зонда), внесенное в плазму. Между зондом и противозондом создается определенная разность потенциалов. Возникающий при этом зондовый ток поступает на устройство измерителя токов. Выходные сигналы этого устройства – напряжения, прямо пропорциональные зондовым токам. Напряжения подаются на устройства ввода-вывода (УВВ) марки IUSDAQ-U 120816, ко-

торые переводят их в цифровую форму в виде кодов напряжения. Устройство измерителя токов позволяет также определять плавающий потенциал зонда. Напряжения в форме кодов запоминаются в памяти компьютера для последующей обработки информации. По заложенной в компьютер программе на зонды задаются последующие значения потенциалов. Управляющие сигналы поступают через УВВ и переводят устройство измерителя токов в состояние выполнения заданного алгоритма. Формирование потенциалов, поступающих на противозонд, осуществляется в устройстве измерителя токов с помощью сигналов широкополосного модулятора, приходящих от УВВ. Поскольку УВВ формирует широкополосный модулятор только положительной полярности, для подачи отрицательного потенциала на зонд это устройство формирует специальный управляющий сигнал, который позволяет менять полярность потенциалов. В [17] представлены принципиальная схема электронного зондового устройства, его компоновочная схема и блок согласования электронной схемы с ЭВМ.

Методики обработки зондовых характеристик, полученных в потоке плазмы, истекающем из МПДД. Предположим, что в эксперименте применяется только один плоский зонд большого размера ($r_з \geq 10^3 r_D$), расположенный перпендикулярно потоку плазмы. В этом случае при обработке используются обе ветви ВАХ – ионная и электронная.

Положим, что площадь зонда $S_з$, масса ионов плазмообразующего газа m_i, температура ионной компоненты T_i (T_i оценивается из дополнительных соображений либо находится экспериментально по методике нестационарного зонда), экспериментальная ВАХ плоского зонда, включая ионную и электронную ветви, известны.

ВАХ обрабатывается в приведенной последовательности.

1. Определяют «плавающий» потенциал $\varphi_{пл}$ как потенциал точки, в которой суммарный ток на зонд равен нулю.

2. Определяют потенциал пространства $\varphi_{пр}$ по точке перехода возрастающего участка ВАХ в электронный ток насыщения. Для более точного определения $\varphi_{пр}$ используют зависимость производной $dI_e / d\varphi$ от потенциала φ. Максимум этой зависимости определяют как $\varphi_{пр}$.

3. Вычисляют электронную температуру T_e по формуле [9]:

$$T_e = \left(\varphi_{пр} - \varphi_{пл}\right)\frac{e}{k}\left\{\ln\left[\frac{1}{3,2}\left(\frac{4}{\pi}\frac{m_i}{m_e}\right)^{1/2}\right]\right\}^{-1},$$

где e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; m_i – масса иона; m_e – масса электрона.

4. Находят функцию распределения электронов по энергиям Дрювестейна $f(W)$:

$$f\left(W\right) = \frac{4}{e^3 S}\left(\frac{m_e W}{2}\right)^{1/2}\frac{d^2 I}{d\varphi^2},$$

где W – энергия электронов; вторая производная $\frac{d^2 I}{d\varphi^2}$ находится из возрастающего участка ВАХ.

5. Проводят нормировку функции $f(W)$:

$$f_{норм}\left(W\right) = f\left(W\right)\left[\int_0^\infty f\left(W\right)dW\right]^{-1}.$$

6. По нормированной функции $f_{\text{норм}}(W)$ находят среднюю энергию электронов и их среднюю температуру:

$$\langle W \rangle = \int_0^\infty W f_{\text{норм}}(W)\, dW, \qquad \langle T_e \rangle = \frac{2}{3}\frac{\langle W \rangle}{k}.$$

Последняя формула для T_e более точная, чем приведенная в п. 3 алгоритма, поскольку определение $\varphi_{\text{пр}}$ осуществляется с погрешностью.

7. Определяют концентрацию электронов:

$$n_e = n_i = \frac{1}{\langle W \rangle}\int_0^\infty W f(W)\, dW .$$

8. Из ионной ветви ВАХ вычисляют направленную скорость ионов по формуле Ленгмюра [8]:

$$u_{\text{н}} = \left[\left(\frac{(I_{\text{з}})_i}{e n_i S_{\text{з}}}\right)^2 - \frac{2e|\varphi_{\text{з}}|}{m_i}\right]^{1/2},$$

где $(I_{\text{з}})_i$ – ионный ток при потенциале $\varphi_{\text{з}}$.

9. Находят параметры τ, Δ, T_i по данным работ [9, 10].

Методики обработки ВАХ двух ориентированных зондов приведены в [10].

Результаты зондовых измерений в потоке плазмы, истекающей из МПДД. ***Зондовые измерения в стендовых условиях.*** Плоский зонд в форме диска из нержавеющей стали установлен на оси струи на расстоянии 6 см от среза сопла. Оценки показали, что безразмерный радиус зонда $r_0 = \frac{r_{\text{з}}}{r_D} \cong 250$. Это означает, что краевыми эффектами можно пренебречь, поэтому пропадает зависимость зондового тока от геометрии зонда. Условия разряда, при которых проводился эксперимент, следующие: ток разряда в источнике плазмы $I_{\text{разр}}$ = 1,5 А; напряжение разряда $U_{\text{разр}}$ = 48 В; давление в рабочей камере $P = 8\cdot10^{-4}$ торр; плазмообразующий газ – воздух.

Обработка экспериментальных ВАХ проведена по изложенной методике. Получены следующие результаты обработки:

Температура электронов T_e ..... 13,1 эВ
Концентрация заряженных частиц $n_{i,e}$ ..... $3{,}2 \cdot 10^{16}$ м$^{-3}$
Скорость направленного движения по оси струи $u_{\text{н}}$ ..... 16 км/с
Потенциал пространства $\varphi_{\text{пр}}$ ..... 50 В
Толщина слоя объемного заряда у зонда Δ ..... $0{,}5\cdot10^{-3}$ м
Характерное время релаксации в плазме τ ..... $0{,}2 \cdot 10^{-6}$ с

Отметим, что с использованием автоматизированной системы проведения эксперимента время измерения составило несколько минут. За это время тепловые потоки на зонд не приводили к его перегреву, поэтому никакого принудительного охлаждения не требовалось.

Зондовые измерения в условиях ионосферы. После исследования в стендовых условиях МПДД испытан в условиях ионосферы [18, 19]. Проведена его минимизация по весу, габаритам и энергозатратам. Электрическая мощность источника составила 3 кВт, масса (без источника питания) 3,5 кг, время активной работы 300 с, расход рабочего газа (воздуха) 1–3 мг/с. Электрические зонды располагались на расстояниях 10, 50

и 550 мм от среза сопла (см. рис.1). Ближайший к соплу зонд плоский с активной поверхностью 1,5 мм^2, остальные два зонда цилиндрические. Дальний зонд устанавливался на штанге, которая разворачивалась при открытии створок ракеты. Зондовая измерительная схема отличалась большим диапазоном измеряемых зондовых токов, имела развязку с бортовым источником питания и согласование с телеметрией. МПДД устанавливался на метеорологическую ракету, которая поднималась до высоты ~160 км над поверхностью Земли, где включались двигатель и зондовая измерительная система. Далее ракета двигалась по инерции, постепенно теряя высоту, и на высоте ~50 км питание двигателя отключалось.

На рис.3 приведены результаты измерений параметров плазмы, истекающей из МПДД в ионосферное пространство, при первом запуске, на рис.4 – при втором запуске.

При первом запуске створки, закрывающие контейнер с МПДД, отошли лишь при повторной команде с Земли на 249-й секунде, в то время как двигатель был включен на 184-й секунде и работал внутри замкнутого объема. Это отразилось на кривых распределения параметров струи плазмы.

На основании приведенных на рис.3 и 4 распределений, а также характеристик магнитных полей, состава газа и плазмы, данных по регистрации ионизирующего излучения в зависимости от высоты и времени полета, места расположения, размера и геометрической формы используемых электрических зондов и другого измерительного оборудования (кроме МПДД и зондов на несущей платформе располагались магнитометр, импедансный зонд, два масс-спектрометра, счетчик Гейгера) можно сделать следующие выводы:

- режим работы двигателя (в частности, напряжение и ток разряда) существенно зависит от давления на срезе сопла. С увеличением давления разрядный ток растет, а концентрация заряженных частиц синхронно изменяется вместе с изменением тока разряда; обнаружено несколько характерных режимов работы двигателя;

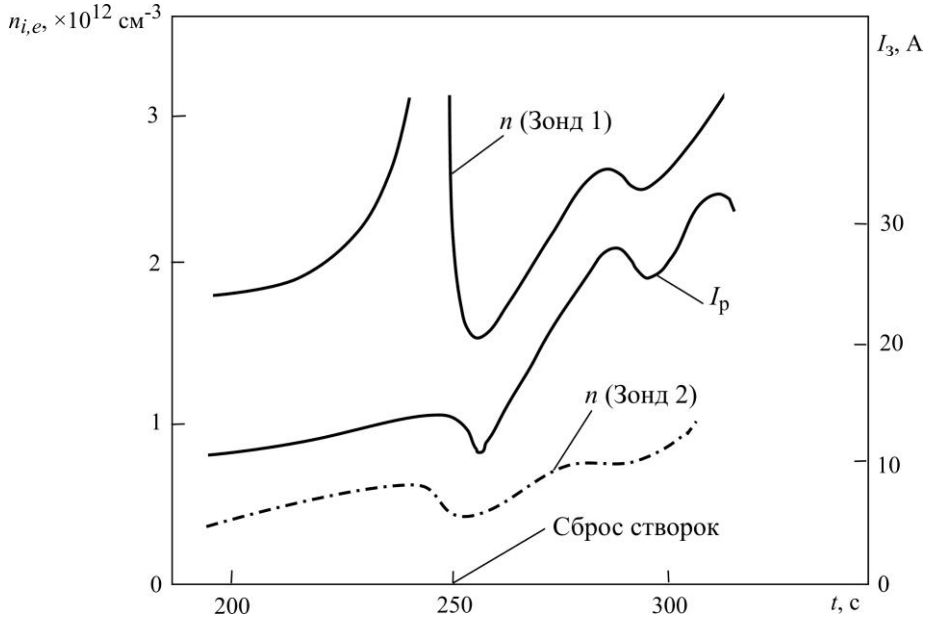


Рис.3. Зависимость концентрации ионов n_i и ионного тока $I_з$ в искусственном плазменном образовании от времени (первый запуск)

Fig.3. Dependence of the ion concentration n_i and ion current $I_р$ in the artificial plasma formation on time (first launch)

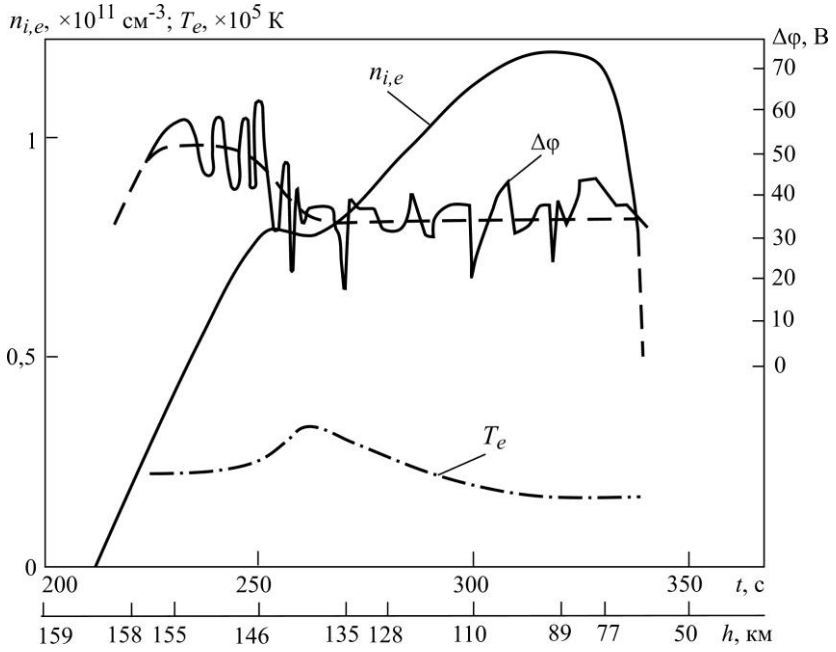


Рис.4. Зависимость концентрации заряженных частиц $n_{i,e}$, температуры электронов T_e, разности потенциалов между корпусом ракеты и окружающей средой Δφ искусственного плазменного образования от времени t и высоты h (второй запуск)

Fig.4. Dependence of parameters the concentration of charged particles $n_{i,e}$, electron temperature T_e, potential difference between the rocket body and the environment Δφ of artificial plasma formation on time t and altitude h (second launch)

- с изменением давления на срезе сопла с высотой меняется и объемный заряд струи. Оказался возможным избыток как ионной, так и электронной компоненты плазмы в струе на различных высотах;

- потенциал ракеты, связанной с корпусом двигателя, значительно меняется в процессе полета. Масштаб изменения потенциала ~ 20 В;

- в процессе работы двигателя потенциал корпуса совершает колебания относительно потенциала пространства с частотой несколько герц и амплитудой около 10 В;

- истекающая из сопла двигателя плазма существенно влияет на другие приборы, находящиеся на несущей платформе.

Также установлены режимы работы двигателя, при которых струя плазмы отдаляется от корпуса ракеты и занимает значительные объемы. При других режимах этого не происходит.

Заключение. Результаты исследования МПДД с помощью плоских и цилиндрических ориентированных зондов позволили оптимизировать режимы его работы и расширить области его применения в современных наукоемких технологиях, в полупроводниковой микроэлектронике, в частности:

- в плазмохимических технологиях производства интегральных микросхем, поскольку многие химические реакции могут эффективно осуществляться в плазменных струях, истекающих из МПДД;

- при напылении специальных покрытий на различные изделия в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, если в плазмообразующее вещество вводить соответствующие добавки;

- для компенсации электрических зарядов, возникающих на высотных спутниках связи, с целью поддержания нормального режима работы и продления срока службы радиотехнического и микроэлектронного оборудования;

- при создании в ионосфере кольцевых антенн большого диаметра. Если поток плазмы из МПДД направить перпендикулярно силовым линиям магнитного поля Земли, то под действием силы Лоренца поток плазмы будет двигаться по окружности. Такие антенны необходимы для обеспечения специальной связи.

Литература

1. ***Кубарев Ю.В.*** Закономерность возникновения электростатической неустойчивости плазмы, движущейся в неоднородных электрических и магнитных полях. Открытие № 14 // Бюл. ВАК РФ. 1995. № 6.

2. ***Кубарев Ю.В., Котельников В.А., Котельников М.В.*** Зондовый метод диагностики нестационарной плазмы // Изв. вузов. Электроника. 1997. № 1. С. 103–106.

3. ***Кубарев Ю.В.*** Полет на Марс, электрореактивные двигатели настоящего и будущего // Наука и технология в промышленности. 2006. № 2. С. 19–35.

4. ***Кубарев Ю.В.*** Источник газоразрядной плазмы // А. с. СССР № 166974. 1964. Бюл. № 24.

5. ***Кубарев Ю.В., Соловьев Е.Г., Черник В.Н., Ташаев Ю.Н.*** Ускоритель плазмы // А. с. СССР № 1210604. 1984. Бюл. № 1.

6. ***Кубарев Ю.В., Черник В.Н.*** Магнитоплазмодинамический ускоритель, его применение в наземных и космических условиях. Ч. 1: Применение МПД-ускорителя для наземных испытаний материалов наружных поверхностей космических аппаратов // Наука и технологии в промышленности. 2008. № 4. С. 7–18.

7. ***Кубарев Ю.В., Коршаковский С.И., Черник В.Н.*** Магнитоплазмодинамический ускоритель, его применение в наземных и космических условиях. Ч. 2: Применение МПДУ для разработки систем плазменной нейтрализации электростатических зарядов космических аппаратов // Наука и технологии в промышленности. 2009. № 1. С. 12–26.

8. ***Чан П., Тэлбот Л., Турян К.И.*** Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме: Теория и применение. М.: Мир, 1978. 202 с.

9. ***Алексеев Б.В., Котельников В.А.*** Зондовый метод диагностики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 239 с.

10. ***Котельников В.А., Котельников М.В.*** Зондовая диагностика плазменных потоков. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2016. 440 с.

11. ***Котельников М.В., Котельников В.А.*** Вольт-амперные характеристики плоского зонда в потоке разреженной плазмы // Теплофизика высших температур. 2016. Т. 54. № 1. С. 23–28.

12. Определение плотности плазмы по данным ионного тока на цилиндрический и плоский зонд / ***Д.Г. Волошин, А.Н. Васильева, А.С. Ковалев и др.*** // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 12. С. 1099–1108.

13. ***Котельников М.В., Котельников В.А.*** Использование формулы Бома и ее аналогов в зондовой диагностике. Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 4. С. 493–497.

14. ***Игнахин В.С., Сысун В.И.*** Моделирование ионного тока на зонд в плазме с учетом ионизации и столкновений с атомами. Ч. 2: Цилиндрический зонд // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 10. С. 812–819.

15. ***Котельников В.А., Морозов А.В., Котельников М.В.*** Математическое моделирование взаимодействия потока разреженной плазмы с магнитным полем. М.: Изд-во МАИ, 2015. 167 с.

16. ***Кубарев Ю.В., Котельников В.А.*** Низкочастотные резонансные электрические колебания в потоке неизотермической плазмы // ЖТФ. 1968. Т. 38. Вып. 11. С. 69–70.

17. ***Котельников М.В.*** Плоский электрический зонд: теория и приложения. М.: Изд-во МАИ, 2015. 212 с.

18. ***Kubarev J.V., Kotelnikov V.A., Thasovitin J.K.*** Mass-spectrometer probe measurements of characteristics of the magnetoplasmodynamics source operating in the upper atmosphere // XVI Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Dusseldorf, 1983. С. 440–441.

19. ***Кубарев Ю.В., Котельников В.А., Часовитин Ю.Г.*** Измерения концентрации заряженных частиц в эксперименте «Куст» // Тезисы доклада IV Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. М., 1978. С. 388–391.

Поступила в редакцию 30.11.2020 г.; после доработки 18.01.2021 г.; принята к публикации 08.02.2021 г.

Кубарев Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор, вице-президент Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова (Россия, 123557, г. Москва, Пресненский вал, 19), kubarev.mgupi@ya.ru

Котельников Вадим Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной математики и программирования Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), mvk_home@mail.ru

Котельников Михаил Вадимович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики и программирования Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Россия, 125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4), mvk_home@mail.ru

References

1. Kubarev Yu.V. Regularity of the occurrence of electrostatic instability of plasma moving in inhomogeneous electric and magnetic fields. Discovery No. 14. *Bullet. HAC of the Russian Federation*. Moscow, 1995. (In Russian).

2. Kubarev Yu.V., Kotelnikov V.A., Kotelnikov M.V. Probe method of diagnostics of unsteady plasma. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 1997, no. 1, pp. 103–106. (In Russian).

3. Kubarev Yu.V. Mission to Mars, electric propulsion systems present and future. *Nauka i tekhnologiya v promyshlennosti = Science and technology in industry*, 2006, no. 2, pp. 19–35. (In Russian).

4. Kubarev Yu.V. *Source of gas-discharge plasma*. Copyright certificate of the USSR, no. 166974. 1964. (In Russian).

5. Kubarev Yu.V., Solovyov E.G., Chernik V.N., Tashaev Yu.N. *The plasma accelerator*. Copyright certificate of the USSR no. 1210604. 1984. (In Russian).

6. Kubarev Yu.V., Chernik V.N. Magnetoplasmodynamic accelerator, its application in ground and space conditions. Part 1. Application of the MPD accelerator for ground testing of materials of outer surfaces of spacecraft. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti = Science and Technology in Industry*, 2008, no. 4, pp. 7–18. (In Russian).

7. Kubarev Yu.V., Korshakovsky S.I., Chernik V.N. Magnetoplasmodinamic accelerator, its application in ground and space conditions. Part 2. Application of MPDU for the development of systems for plasma neutralization of electrostatic charges of spacecraft. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti = Science and Technology in Industry*, 2009, no. 1, pp. 12–26. (In Russian).

8. Chung P.M., Talbot L., Touryan K.J. *Electric probes in stationary and flowing plasmas: theory and application.* New York, Springer-VerLag, 1975. xvi, 150 p. DOI: 10.1007/978-3-642-65888-4

9. Alekseev B.V., Kotelnikov V.A. *Probe method of plasma diagnostics*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 239 p. (In Russian).

10. Kotelnikov V.A., Kotelnikov M.V. *Probe diagnostics of plasma flows*. Moscow, Izhevsk, Regular and chaotic dynamics Publ., 2016, 440 p. (In Russian).

11. Kotelnikov M.V., Kotelnikov V.A. Volt-ampere characteristics of a flat probe in a rarefied plasma flow. *Teplofizika vysokikh temperatur = Thermophysics of High Temperatures*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 23–28. (In Russian).

12. Voloshin D.G., Vasilyeva A.N., Kovalev A.S., Mankelevich Yu.A., Rakhimova T.V. Determination of plasma density from ion current data on a cylindrical and flat probe. *Fizika plazmy = Plasma Physics*, 2016, vol. 42, no. 12, pp. 1099–1108. (In Russian).

13. Kotelnikov M.V., Kotelnikov V.A. The use of the Bohm formula and its analogues in probe diagnostics. *Teplofizika vysokikh temperatur = Thermophysics of High Temperatures*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 493–497. (In Russian).

14. Ignakhin V.S., Sysun V.I. Modeling of ion current on a probe in plasma taking into account ionization and collisions with atoms. Part 2. Cylindrical probe. *Fizika plazmy = Plasma Physics*, 2018, vol. 44, no. 10, pp. 812–819. (In Russian).

15. Kotelnikov V.A., Morozov A.V., Kotelnikov M.V. *Mathematical modeling of the interaction of a rarefied plasma flow with a magnetic field*. Moscow, MAI Publ., 2015, 167 p. (In Russian).

16. Kubarev Yu.V., Kotelnikov V.A. Low-frequency resonant electric oscillations in a non-isothermal plasma flow. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*, 1968, vol. 38, iss. 11, pp. 69–70. (In Russian).

17. Kotelnikov M.V. *Flat electric probe: theory and applications*. Moscow, MAI Publ., 2015, 212 p. (In Russian).

18. Kubarev J.V., Kotelnikov V.A., Thasovitin J.K. Mass-spectrometer probe measurements of characteristics of the magnetoplasmodynamics source operating in the upper atmosphere. *XVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases.* Dusseldorf, 1983, pp. 440–441.

19. Kubarev Yu.V., Kotelnikov V.A., Chasovitin Yu.G. Measurements of the concentration of charged particles in the experiment «Kust». *Theses of the report of the IV All-Soviet Conference on Plasma Accelerators and Ion Injectors.* Moscow, 1978, pp. 388–391. (In Russian).

Received 30.11.2020; Revised 18.01.2021; Accepted 08.02.2021.

Information about the authors:

Yuri V. Kubarev – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice President of Prokhorov Academy of Engineering Sciences (Russia, 123557, Moscow, Presnensky val, 19), kubarev.mgupi@ya.ru

Vadim A. Kotelnikov – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Computational Mathematics and Programming Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125080, Moscow, Volokolamsk Highway, 4), mvk_home@mail.ru

Mikhail V. Kotelnikov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof. of the Computational Mathematics and Programming Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Russia, 125080, Moscow, Volokolamsk Highway, 4), mvk_home@mail.ru

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

С тематическими указателями статей за 1996 - 2020 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

http://ivuz-e.ru

СХЕМОТЕХНИКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
CIRCUIT ENGINEERING AND DESIGN

УДК 621.3.087.92:001.891.573SystemVerilog **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-144-153**

Real Number Modeling Flow of Digital to Analog Converter

***V.Sh. Melikyan*[1], *V.D. Hovhannisyan*[2,3], *M.T. Grigoryan*[1,3], *A.A. Avetisyan*[1,3], *H.T. Grigoryan*[1,3]**

[1]*Synopsys Armenia CJSC, Yerevan, Armenia*
[2]*Aragats LTD, Yerevan, Armenia*
[3]*National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Armenia*

vazgenm@synopsys.com

Abstract: This work introduces a flow of digital to analog (DAC) implementation in digital environment of SystemVerilog. Unlike the classical Verilog models, this digital to analog converter behavioral model is analog. Such type of model creation in general is called real number modeling. The DAC model is verified by the HSPICE and SystemVerilog Co-simulations which show its applicability in different register transfer level verification environments. The digital environment with real number modeled DAC runs around 8 times faster than the same environment with SPICE model. At the same time, the output signal's voltage difference between RNM and SPICE models is less than 2 mV.

Keywords: digital to analog converter; SystemVerilog; real number modeling; Co-simulation

For citation: Melikyan V.Sh., Hovhannisyan V.D., Grigoryan M.T., Avetisyan A.A., Grigoryan H.T. Real number modeling flow of digital to analog converter. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 144–153. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-144-153

© V.Sh. Melikyan, V.D. Hovhannisyan, M.T. Grigoryan, A.A. Avetisyan, H.T. Grigoryan, 2021

Маршрут моделирования цифроаналогового преобразователя на действительных числах

В.Ш. Меликян[1], В.Д. Ованнисян[2,3], М.Т. Григорян[1,3], А.А. Аветисян[1,3], А.Т. Григорян[1,3]

[1]Учебный департамент Синопсис Армения, г. Ереван, Армения
[2]ООО «Арагац», г. Ереван, Армения
[3]Национальный политехнический университет Армении, г. Ереван, Армения

vazgenm@synopsys.com

Конструкции современных цифровых сложных систем в основном моделируются на нескольких языках описания аппаратных средств, например Verilog/VHDL, Spice, Verilog-A и др. Подобные языки предназначены для описания только цифрового поведения системы. Такой подход значительно ускоряет процесс проектирования и верификации. Однако аналоговые блоки, находящиеся в среде верификации, вызывают различные функциональные неточности, поскольку они не описываются должным образом. В работе предложено использовать моделирование цифроаналогового преобразователя (ЦАП) на действительных числах. Концепция заключается в описании требуемых аналоговых моделей на языке SystemVerilog и использовании их при верификации UVM вместо SPICE-моделей. Модель ЦАП проверена совместным моделированием HSPICE и SystemVerilog. Показана его применимость в средах проверки RTL. Установлено, что цифровая среда с ЦАП, смоделированная на действительных числах, работает примерно в 8 раз быстрее, чем такая же среда с моделью SPICE. В то же время разница в напряжении выходного сигнала между моделями на действительных числах и SPICE составляет менее 2 мВ.

Ключевые слова: цифроаналоговый преобразователь; SystemVerilog; моделирование на действительных числах; совместная симуляция

Для цитирования: Маршрут моделирования цифроаналогового преобразователя на действительных числах / В.Ш. Меликян, В.Д. Ованнисян, М.Т. Григорян и др. // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 2. С. 144–153. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-144-153

Introduction. The designs of modern digital complex systems are mostly modeled in several hardware description languages. The most common used hardware description languages are Verilog/VHDL, SPICE, Verilog-A, etc. Each language is unique in terms of simulation speed and signal description accuracy (abstract diagram is shown in Fig.1). Verilog/VHDL and similar languages are designed to describe only the digital behavior of the system. Signals have only 0,1, X and Z states and any analog signal levels are being ignored. Such approach significantly speeds up the design and verification process. However, the analog blocks which are considered to be in verification environments cause different functional inaccuracies as they are not being properly described.

Input languages of circuit level simulators are the opposite extreme. The models described by them are very accurate, they consider many physical aspects during the calcula-

tions and have small mistake probability. The main drawback is low design – verification speed. The accuracy of Verilog-A type languages is between those two languages. They use simple descriptions of digital logic and more complex analog cell descriptions. Modern IC Design companies perform system verification, however in some cases Verilog/VHDL description level is not enough. The problems are occurring in analog cells which are usually described as black boxes with pure behavioral descriptions. One of the modern solutions of this problem is the Co-simulation where the analog part of the design is instantiated as a SPICE cell and the digital part – as Verilog/VHDL cell [1]. The whole environment then is driven by a mixed-mode simulator which allows to combine two conceptually different models in one simulation.

However, the Co-simulation also has several problems. In practice digital environments are verified by universal verification methodology (UVM) regressions with thousands of simulations and each with randomized inputs and parameters. The Co-simulation cannot afford a big number of simulations, because the analog part of the environment is very resource consuming, hence the simulation time is a lot bigger compared to a fully digital environment.

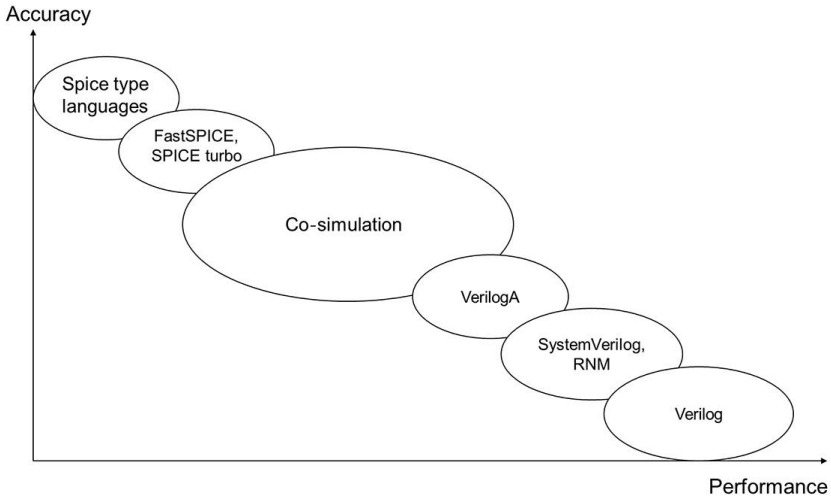


Fig.1. Simulation accuracy to performance ratios

To avoid mentioned problems, the real number modeling is used instead of Co-simulation. The concept is to describe required analog models in SystemVerilog language and use them during UVM verification instead of SPICE models. The SystemVerilog language is not intended for real number modeling, however due to its flexibility it fits all the requirements. The SystemVerilog is used as a base for RNM because the most widespread digital environment verification tool is the UVM. It is also written in SystemVerilog and is easily compatible with Verilog language. The user can replace digital models with RNM without additional tuning.

Real number model-based environment runs much faster than the one based on Co-simulation, hence allowing to keep the randomized regressions in place and greatly increasing the verification coverage. Also, the verification coverage is higher compared to the digital environment, because the suggested real number models also provide PVT randomization.

Digital to analog architecture. There are several common submodules which were implemented and used during the digital to analog (DAC) design: digital to analog converter; *RC*-filter; resistance ladder; analog multiplexer. The presented RNM DAC is based on the thermometer-coded DAC circuit [2] described in HSPICE [3]. The main advantage of such DAC is the high-precision voltage step. The main disadvantage is the number of components

resulting more occupied area on silicon. Voltage buffer connected to the output can be accounted while it is not mandatory in terms of RNM vs HSPICE verification. In Fig.2, the block-diagram of 128 bit thermometer-coded DAC is presented. This architecture has been implemented for both SystemVerilog and SPICE formats for further research.

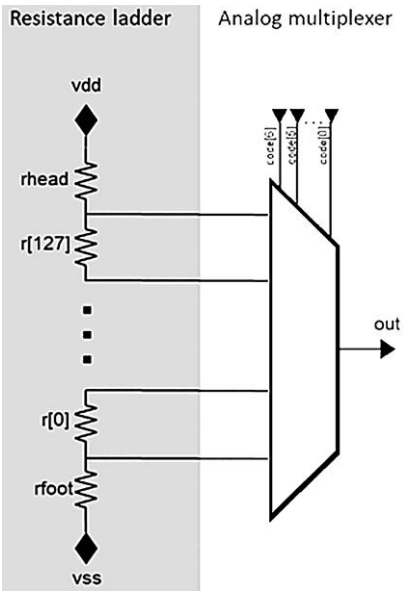


Fig.2. Thermometer-coded DAC architecture

Problem description. The target is the creation of a functional RNM DAC model and its verification through comparison of RNM DAC signals versus the equivalent SPICE model. Several suggested RNM milestones should be met during model creation. The RNM and SPICE models should be simulated using the same SystemVerilog testbench.

Submodule descriptions. Digital to analog converter converts the input digital signals to the output analog voltage. Variables can be changed during the simulation via the cross-module reference assignments.

«Rise_time» and «fall_time» variables control on the positive and negative edges of output signal. «High_volt» and «low_volt» variables control output voltage levels. «x_state» and «z_state» variables show output values when the input signal is at «X» or «Z» states. «Level» variable determines simulation output accuracy vs simulation time ratio. Higher «level» (from 1 to 6) provides lower number of datapoints, hence less simulation accuracy and faster simulations. Fig.3 and 4 show configuration variables' effects on the output signal.



Fig.3. DAC «rise_time», «fall_time», «high_volt», «low_volt» configuration variables and their effects on the output signal in SystemVerilog simulator

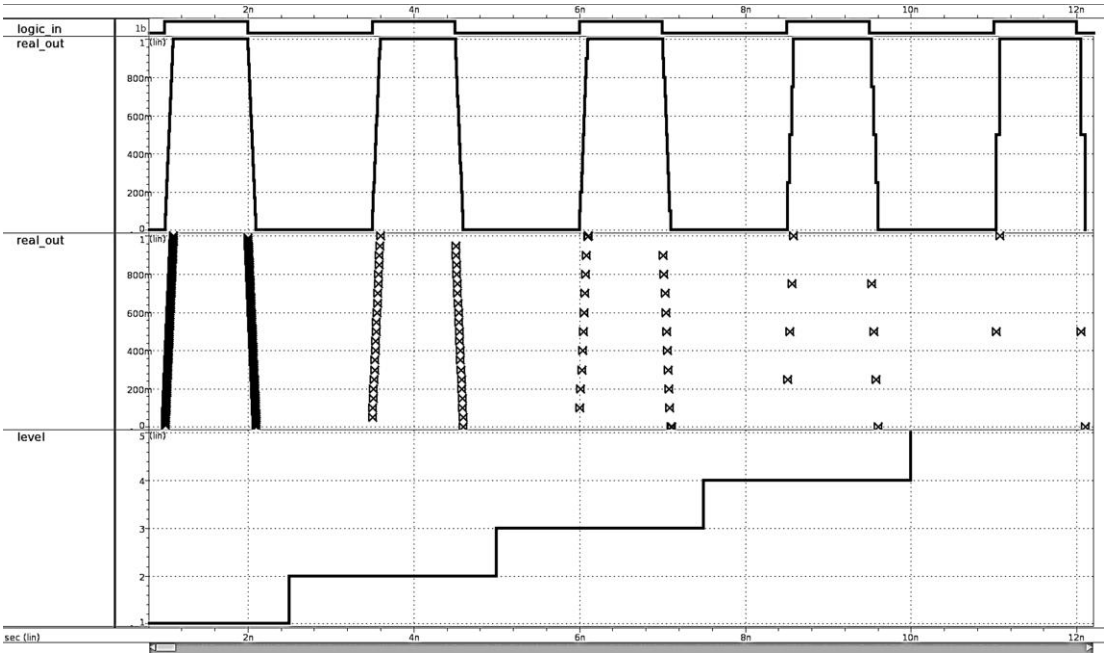


Fig.4. DAC «level» variable effect on the output

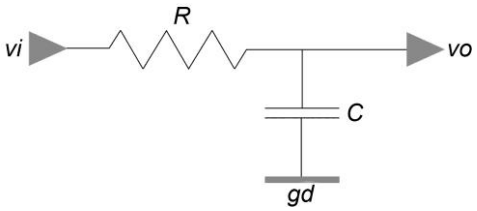


Fig.5. RC-filter model

RC-filter model is used as a load model. It has 4 inputs and 1 output. «r» and «c» inputs show the *RC*-filter's resistance and capacitance values and the «vi» and «gd» inputs are the source. *RC*-filter's input and the ground node's potential. The «vo» output is the *RC*-filter's output. Fig.5 presents *RC*-filter module's block scheme with according parameters.

Also, there is a «level» variable like the d2a converter's which control the simulation accuracy versus speed ratio. The core code of the *RC*-filter is the exponential dependency equations of voltage commutation. Fig.6 shows the commutation code written in the SystemVerilog model [4]. Fig.7 presents the effects of the 4 inputs and the «level» variable onto the *RC*-filter's output «vo».

```
always @ (clk)
  begin
    if (vi >= gd)
      begin
        if (vo < vi)
          begin
          vo = vo_prev + (vi - vo_prev) * (1 - $exp(-t/(r*Cfilt)));
          vo_prev = vo;
          end
        else if (vo > vi)
          begin
          vo = (vo_prev - vi) * $exp(-t/(r*Cfilt)) + vi;
          vo_prev = vo;
          end
      end
    else if (vi < gd)
      begin
        if (vo < gd)
          begin
          vo = vo_prev + ((gd - vi) - vo_prev) * (1 - $exp(-t/(r*Cfilt)));
          vo_prev = vo;
          end
        else if (vo > gd)
          begin
          vo = (vo_prev - gd) * $exp(-t/(r*Cfilt)) + gd;
          vo_prev = vo;
          end
      end
  end
```

Fig.6. RC-filter behavioral model



Fig.7. RC-filter input effects onto the output

Resistance ladder outputs 128 analog signals based on the analog VDD supply voltage. The ladder has «rhead» and «rfoot» resistances which limit the maximum and minimum output voltages and 128 step resistors which provide 128 voltage steps. Resistance ladder block scheme is shown on Fig.2 connected with analog multiplexer.

Also, in real circuit there is a PVT factor. The PVT factor is represented as a «res_scale» variable. During the verification, the «res_scale» variable should be randomized in the range of (–1, 1), where 0 provides the nominal resistance values, –1 – (nominal – 10 %) and +1 – (nominal + 10 %). User can also exceed the range if there is a need. Fig.8 presents resistance ladder's analog functionality. It has 2 analog inputs – VDD, VSS and a 128 real bus outputs which later will go into the analog multiplexer.

Analog multiplexer receives 128 analog inputs from resistance ladder and 7 digital select bits. Based on the select bits it outputs one of the 128 analog inputs. Multiplexer's block scheme is shown in Fig.2, connected to the resistance ladder. Fig.9 presents the analog multiplexer's SystemVerilog model.

There were several milestones which this project was meant to achieve during model creation:

- keep as many inputs digital as possible;
- keep as much internal logic digital as possible;
- make the model PVT dependent;
- analog features (for example resistances) and internal structure of the model (number of interconnections) should be like the SPICE model;
- do not restrict the model with parameters so it can be changed during the simulation.

Listed milestones allow to create a universal model which can be used in many digital environments. Of course, in practice it should be integrated and changed for every digital environment, however the efforts of integration should not be very high. On the other hand, by keeping the model close to SPICE and adding PVT randomization we are sure that the verification will bring out any crucial functionality mismatches.

The DAC model has 3 inputs – VDD, VSS, code, and 1 output – Q (VDD, VSS are the source nodes and are digital; «code» signal bus is the 7 bit select code of the DAC; «Q» is an analog output).

```
//------------------------------------------------------
//
//------------------------------------------------------

`timescale 1ps/1ps

module resistance_ladder (
input  real      VDD,
input  real      VSS,
output real n[127:0]
);

real res_scale = 0;
real r_filt  ;

real rstep   ;
real rhead   ;
real rfoot   ;

assign rstep   = (res_scale > 0 ) ? 220   - res_scale * 22   : 220   - res_scale * 22    ;
assign rfoot   = (res_scale > 0 ) ? 12600 - res_scale * 1260 : 12600 - res_scale * 1260  ;
assign rhead   = (res_scale > 0 ) ? 2730  - res_scale * 273  : 2730  - res_scale * 273   ;

real vmax, vmin, vstep;
assign vmax  = VSS + ( 128 * rstep + rfoot)  * (VDD - VSS)  / (rhead + 128 * rstep + rfoot);
assign vmin  = VSS + ( rfoot * (VDD - VSS) ) / (rhead + 128 * rstep + rfoot);
assign vstep = ( vmax - vmin ) / 128 ;

genvar i;

generate
for (i = 0 ; i < 128 ; i = i + 1 ) begin
  assign n[i] = (i + 1) * vstep + vmin ;
end
endgenerate

endmodule
```

Fig.8. Resistance ladder module

```
//
//------------------------------------------------------

`timescale 1ps/1ps

module multiplexer (
input               VDD,
input               VSS,
input  [6:0]     select,
input  real   in[127:0],
output real          Q
);

assign Q = (~VDD & VSS) ? 0 : in[select];

endmodule
```

Fig.9. Analog multiplexer module

There are 5 submodules instantiated in the DAC cell. Two d2a converters, a resistance ladder, an analog multiplexer and an *RC*-filter. According to the mentioned milestones the input source ports – VDD, VSS – are digital. However, the resistance ladder expects analog VDD and VSS inputs. To convert the signals, there are two d2a converters. The purpose of resistance ladder and the analog multiplexer is pretty straight forward – those 2 together are the DAC's core. The *RC*-filter acts as an analog load by filtering the «ideal» analog signal from the multiplexer (it can be seen from «vi» and «vo» signals from Fig.7 as an example). This is an important detail connected with the *RC*-filter's resistance. It should be calculated based on the resistance ladder's current select code. Fig.10 shows the detailed calculation of the *RC*-filter's resistance.

Also, there are several variables which should be configured from the top cells through a cross-module references. At the same time, the configuration variables are passed to the internal submodules. There are four configuration variables – «VDD_value», «VSS_value», «c_filt» and «level».

«initial» block passes configuration variable values to the internal submodules.

```
assign rtop    = resladd.rhead + (code + 1)*resladd.rstep;
assign rbottom = resladd.rfoot + (127 - code)*resladd.rstep;

assign r_filt   = (rtop * rbottom) / (rtop + rbottom);
```

Fig.10. RC-filter's resistance calculation

The «VDD_value» variable is passed to the VDD converters and affect the VDD signal's high level. In general, it is recommended to randomize this signal too as the voltage is also part of the PVT. Additionally, user can add noise to the VDD signal which in theory may lead to some interesting tests, like noise dependency or jitter measurements. The «VSS_value» variable is similar to the «VDD_value» except it is responsible for the VSS signal. «c_filt» variable is the output load which is passed as an input to the *RC*-filter module. «simulation_level» is passed to the d2a converters and the *RC*-filter. The effects of this variables are described in appropriate paragraphs.

Model verification. To have a reliable verification, the RNM model must be compared with SPICE model in exact same conditions. To execute such comparison a Co-simulation environment with SystemVerilog top testbench was created. The testbench is common between SPICE and RNM models and calls them in parallel. RTL testbench is also responsible for passing the RNM configuration variables to the RNM model. Fig.11 shows an abstract scheme of our Mixed-Signal verification environment.

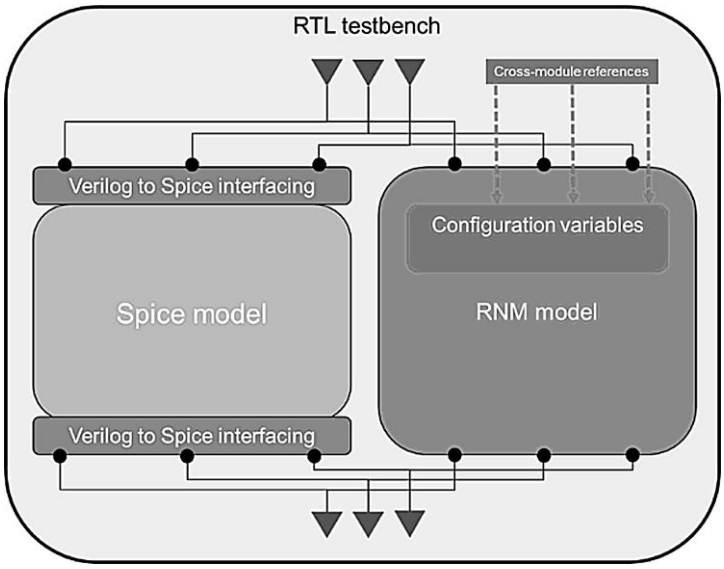


Fig.11. DAC RNM model verification environment

Fig.12 illustrates the SPICE model's schematic. It includes resistance ladder and a TG based multiplexer. All RNM resistors are matched with the SPICE resistors. The capacitive load is also matched. RNM model does not include TG resistances and internal transistor parasitic which however should not cause big differences.

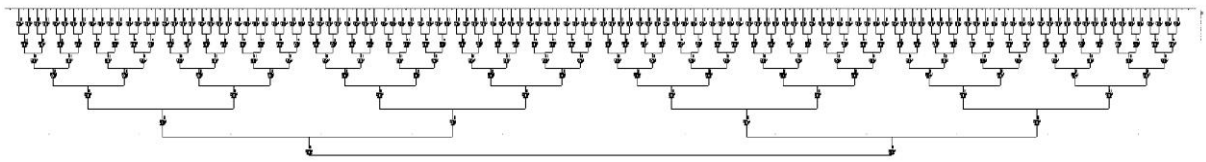


Fig.12. SPICE TG based DAC model

Simulation Results. Simulation checks all possible input code combinations. The resulting analog outputs are presented on Fig.13. There are glitches at the MSB code switching moments and they do not appear in the RNM simulation. The rest parts of the simulation are very close. The mean difference of the «ladder» part is 1.36 mV including the glitches which is a pretty good result.

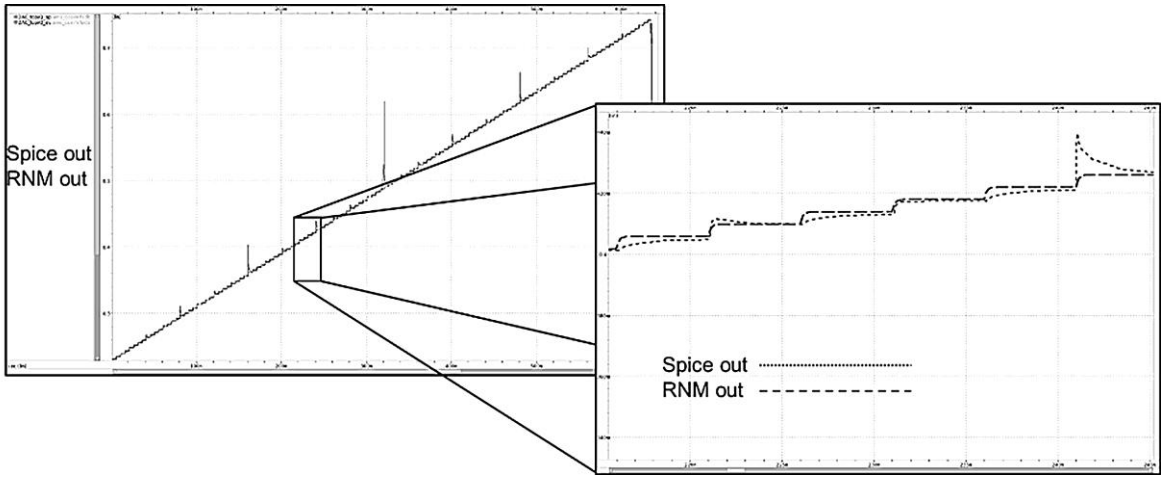


Fig.13. SPICE vs Verilog wave to wave comparison

Table presents the results of several Co-simulations. First line shows the run time and the resulting wave file size of SPICE model. The rest of the lines show RNM model usage with different simulation level parameters.

Simulation results

Model	Analog output's mean error against SPICE model, mV	Simulation duration, s	Resulting wave file (fsdb) size, MB
SPICE model	0	8789.74	3784
RNM level 1	1.36	1096.89	4458
RNM level 2	1.54	232.33	999
RNM level 3	1.64	122.01	0.0537
RNM level 4	1.81	63.73	0.0281
RNM level 5	2.25	26.58	0.0119
RNM level 6	2.93	14.01	0.0063

Conclusion. An RNM DAC was implemented and verified against a similar SPICE model. Despite the introduced 2.93 mV across PVT mean error (which is acceptable in the most cases), the RNM DAC provides 8–628 times higher simulation speed compared to the SPICE. At the same time, the RNM model exists only in SystemVerilog domain which greatly simplifies its integration into already existing digital environments.

References

1. Melikyan V. *Simulation and optimization of digital circuits*: *Considering and mitigating destabilizing factors*. 1st ed. Basingstoke, Springer Nature, 2018, pp. 1–124, 213–289. DOI: 10.1007/978-3-319-71637-4

2. *Mixed-signal simulation user guide*. Mountain View, CA. Synopsys Inc., 2014, pp. 1–134, 151–156, 213–259, 268–269.

3. Baker J.R. *CMOS circuit design, layout, and simulation*. 3rd ed. Hoboken, NJ, John Wiley and & Sons, 2010, pp. 965–970.

4. *HSPICE reference manual*. Mountain View, CA, Synopsys Inc., 2020, pp. 126–263, 374–401.
5. Kasatkin A.S., Nemcov M.V. *Elektrotekhnica, Uchebnik dlya vuzov = College Textbook on Electrical Engineering*. 9th ed. Moscow, Academia Publishing center, 2003, pp. 129–156. (In Russian).
6. Taraate V. *System Verilog for hardware description – RTL design and verification*. Gateway East, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020, pp. 11–45.
7. Cavanagh J. *Verilog HDL design examples*. Boca Raton, FL, Taylor & Francis Group, LLC, 2018, pp. 1–109, 146–176.
8. *Verilog-A reference manual*. Palo Alto, CA, Agilent Technologies, Sept. 2004, pp. 2-1–5-4.

Received 02.02.2021; Revised 02.02.2021; Accepted 08.02.2021.

Information about the authors:

Vazgen Sh. Melikyan – Corresponding Member of RA NAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of Educational Department of Synopsys Armenia CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), vazgenm@synopsys.com

Vardan D. Hovhannisyan – student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Engineer at Aragats LTD (Armenia, 375038, Yerevan, Abelyan st., 6-1), v.hovh99@gmail.com

Mushegh T. Grigoryan – student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Analog and Mixed Signal Circuit Design Engineer, Engr. II Synopsys Armenia CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), hgrigo@synopsys.com

Ashot A. Avetisyan – student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Analog and Mixed Signal Circuit Design Engineer, Engr. II Synopsys Armenia CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), aavet@synopsys.com

Hayk T. Grigoryan – student of National Polytechnic University of Armenia (Armenia, 0009, Yerevan, Teryan st., 105), Analog and Mixed Signal Circuit Design Engineer, Engr. II Synopsys Armenia CJSC (Armenia, 0026, Yerevan, Arshkunyats st., 41), hgrigo@synopsys.com

Уважаемые авторы и читатели!

Вышел в свет журнал



RUSSIAN MICROELECTRONICS
Vol. 49, *No.* 7, 2020. - ISSN PRINT: 1063-7397,
ISSN ONLINE: 1608-3415,
в котором опубликованы избранные статьи журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника».
http://pleiades.online
http://link.springer.com

УДК 621.3.049.774:621.385.831 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-154-161

Особенности реализации аналогового умножителя на основе базового структурированного кристалла серии 5529

С.О. Белостоцкая, А.А. Лукьянов, А.С. Росляков, А.Н. Семенов, Р.А. Федоров

НПК «Технологический центр», г. Москва, Россия

A.Semenov@tcen.ru

При обработке аналоговых сигналов снижение энергопотребления при высокой точности обработки – важная задача. Одним из способов ее решения является применение аналоговых сложнофункциональных блоков. В работе рассмотрен принцип работы ячейки квадратичной функции тока. С использованием арифметической формулы разности квадратов и ячейки квадратичной функции тока построен умножитель аналоговых сигналов, который входит в состав систем ФАПЧ, АРУ, модуляторов и смесителей. На основе элементов базового структурированного кристалла серии 5529 проведены моделирование умножителя аналоговых сигналов и оценка его точности. Полученный аналоговый сложнофункциональный блок умножения сигналов является частью стратегии развития библиотеки базового структурированного кристалла серии 5529.

Ключевые слова: аналоговый умножитель; ячейка квадратичной функции тока; базовый кристалл; БМК; БСК 5529

Для цитирования: Особенности реализации аналогового умножителя на основе базового структурированного кристалла серии 5529 / С.О. Белостоцкая, А.А. Лукьянов, А.С. Росляков и др. // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 2. С. 154–161. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-154-161

© С.О. Белостоцкая, А.А. Лукьянов, А.С. Росляков, А.Н. Семенов, Р.А. Федоров, 2021

Implementation Features of an Analog Multiplier Based on 5529 Series Structured ASIC

S.O. Belostotskaya, A.A. Lukyanov, A.S. Roslyakov, A.N. Semenov, R.A. Fedorov

SMC «Technological Centre», Moscow, Russia

A.Semenov@tcen.ru

Abstract: During the analog signals processing one of the key factors is the reduction of power consumption with high accuracy of signal processing. One way of solving this problem is the implementation of analog IP-blocks. PLLs, AGC, modulators often include the analog signal multipliers. In the paper, the principle of quadratic function cell operation has been described in detail. The analog signal multiplier has been constructed on the basis of the difference of squares arithmetic formula and the considered cell of the quadratic current function. On the basis of the elements of 5529 series structured ASIC, the analog signal multiplier has been simulated and its accuracy has been assessed. The resulting analog complex functional IP-block for signal multiplication is a part of the development strategy for 5529 series structured ASIC library.

Keywords: analog multiplier; quadratic current function cell; master chip; gate array; 5529 structured ASIC

For citation: Belostotskaya S.O., Lukyanov A.A., Roslyakov A.S., Semenov A.N., Fedorov R.A. Implementation features of an analog multiplier based on 5529 series structured ASIC. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 154–161. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-154-161

Введение. Для обработки аналоговых сигналов применяются цифровые и аналоговые методы. Цифровой метод обработки основан на переводе аналоговых сигналов в ряд дискретных величин с дальнейшей обработкой с помощью различных логических устройств. Аналоговый метод предполагает непрерывную обработку сигналов аналоговыми средствами [1] с использованием умножителей. Они часто входят в состав схем ФАПЧ, АРУ, модуляторов и смесителей.

Аналоговый умножитель выполняет произведение двух непрерывных сигналов x и y, выдавая на выход сигнал $z = Nxy$, где N – постоянный коэффициент. Схемы умножителей можно классифицировать в зависимости от характеристик [2] на одноквадрантные (входные сигналы x и y являются строго положительными величинами), двухквадрантные (только один сигнал является строго положительным) [3] и четырехквадрантные (оба сигнала могут принимать как положительные, так и отрицательные значения).

Описание схемы возведения тока в квадрат. Построение ячейки квадратичной функции тока основано на характеристиках МОП-транзистора, работающего в области насыщения [4]. В общем виде ток сток-истока такого МОП-транзистора определяется выражением

$$I_{DS} = K\left(V_{GS} - V_t\right)^2 ,$$

где $K = 0,5_{\mu_0} C_{ox}(W/L)$ – удельная крутизна передаточной характеристики транзистора; μ_0 – подвижность носителей; C_{ox} – емкость затвора на единицу площади; W/L – отношение ширины к длине транзистора; $V_{GS} = V_t + \sqrt{\frac{I_{DS}}{K}}$ – напряжение затвор – исток; V_t – пороговое напряжение транзистора.

На рис.1 приведена электрическая схема ячейки квадратичной функции тока (токовые петли выделены серым цветом).

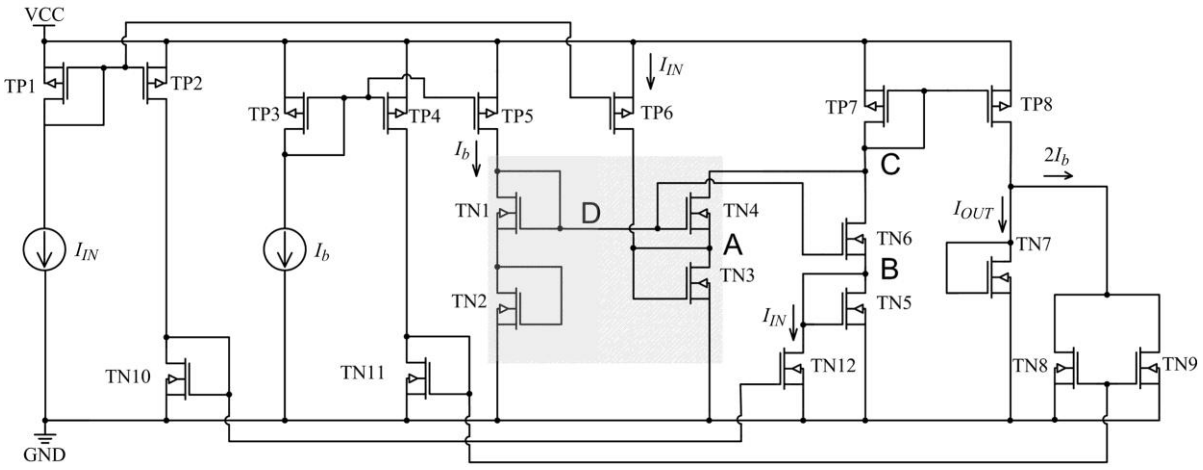


Рис.1. Электрическая схема возведения токов в квадрат
Fig.1. Electric circuit for current squaring

Рассмотрим петлю из транзисторов TN1, TN2, TN3 и TN4. Для точки D можно записать: $V_{GD1} + V_{GD2} = V_{GD3} + V_{GD4}$. При условии, что эти транзисторы хорошо согласованы и имеют одинаковые значения крутизны передаточной характеристики для *n*- и *p*-канальных транзисторов, а также с учетом того, что базовый ток через транзисторы TN1 и TN2 одинаков и равен I_b, получаем

$$\begin{gathered}\sqrt{I_{DS1}} + \sqrt{I_{DS2}} = \sqrt{I_{DS3}} + \sqrt{I_{DS4}}, \\ 2\sqrt{I_b} = \sqrt{I_{DS3}} + \sqrt{I_{DS4}}.\end{gathered} \tag{1}$$

Запишем первый закон Кирхгофа для точки A (см. рис.1):

$$I_{DS3} = I_{DS4} + I_{IN}. \tag{2}$$

Подставляя (2) в (1) и возводя в квадрат два раза обе стороны выражения

$$2\sqrt{I_b} = \sqrt{I_{DS4} + I_{IN}} + \sqrt{I_{DS4}}, \tag{3}$$

имеем

$$16I_b^{\,2} + I_{IN}^2 - 8I_b I_{IN} = 16I_b I_{DS4}.$$

Откуда получим выражение для тока через транзистор TN4:

$$I_{DS4} = \frac{I_{IN}^2}{16I_b} - \frac{I_{IN}}{2} + I_b. \tag{4}$$

Аналогичным образом рассмотрим петлю из транзисторов TN1, TN2, TN5 и TN6. В этом случае для точки D можно записать $V_{GS1}+V_{GS2}=V_{GS5}+V_{GS6}$. Следовательно,

$$\sqrt{I_{DS1}}+\sqrt{I_{DS2}}=\sqrt{I_{DS5}}+\sqrt{I_{DS6}}. \quad (5)$$

Запишем первый закон Кирхгофа для точки B (см. рис.1):

$$I_{DS5}=I_{DS6}-I_{IN}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (7) и учитывая, что ток, протекающий через транзисторы TN1 и TN2, одинаков и равен I_b, получаем

$$2\sqrt{I_b}=\sqrt{I_{DS6}-I_{IN}}+\sqrt{I_{DS6}}. \quad (7)$$

Возведя в квадрат обе стороны выражения два раза, имеем $16I_b{}^2+I_{IN}^2+8I_bI_{IN}=16I_bI_{DS6}$. Таким образом,

$$I_{DS6}=\frac{I_{IN}^2}{16I_b}+\frac{I_{IN}}{2}+I_b. \quad (8)$$

Запишем первый закон Кирхгофа для точки C (см. рис.1):

$$I_{OUT}+2I_b=I_{DS4}+I_{DS6}. \quad (9)$$

Подставляя выражения (8) и (4) в (9) и выражая выходной ток, получаем квадратичную функцию входного тока на выходе ячейки квадратичной функции:

$$I_{OUT}=\frac{I_{IN}^2}{8I_b}.$$

Построение схемы умножителя аналоговых сигналов. Используя схему возведения в квадрат токов и формулу разности квадратов $((x+y)^2-(x-y)^2=4xy)$, можно построить аналоговый токовый умножитель, схема которого представлена на рис.2.

Ток, протекающий через точку A, формируется транзисторами TP6, TP7 через транзистор TN10 и равен сумме токов I_X+I_Y. Ток, протекающий через точку B, формируется транзисторами TP12 и TN12 и равен I_X-I_Y. Контуры, содержащие транзисторы TN1, TN2, TN3 и TN5, а также TN1, TN2, TN4 и TN6, являются квадраторами тока, протекающего через точку A. В то же время контуры, содержащие транзисторы TN1, TN2, TN16 и TN18, а также TN1, TN2, TN15 и TN17, являются квадраторами тока

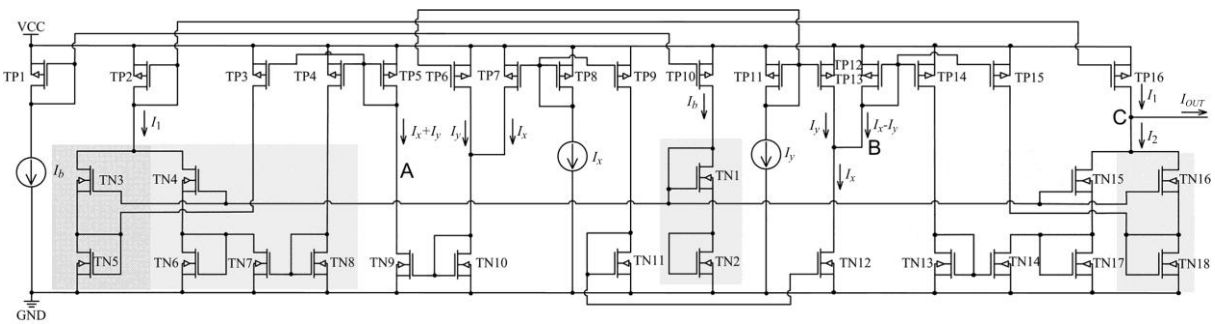


Рис.2. Электрическая схема умножителя аналоговых сигналов
Fig.2. Analog signal multiplier circuit

через точку B. Применение общих для всех контуров транзисторов TN1 и TN2 позволяет сократить общее энергопотреление. Из схемы на рис.2 видно, что

$$I_1 = \frac{(I_X + I_Y)^2}{8I_b}, \tag{10}$$

$$I_2 = \frac{(I_X - I_Y)^2}{8I_b}. \tag{11}$$

В точке C (см. рис.2) происходит вычитание выходных токов:

$$I_{OUT} = I_1 - I_2. \tag{12}$$

Подставляя (10) и (11) в (12), получаем выходной ток умножителя:

$$I_{OUT} = \frac{I_X I_Y}{2I_b}.$$

Моделирование схемы аналогового умножителя. В настоящее время в НПК «Технологический центр» освоены и применяются базовые структурированные кристаллы серии 5529, изготовленные по КМОП-технологии с технологическими нормами 0,25 мкм на структуре кремний на изоляторе. Конструкция базового структурированного кристалла имеет фиксированные периферийную область и цепи, организующие системы питания микросхемы [5].

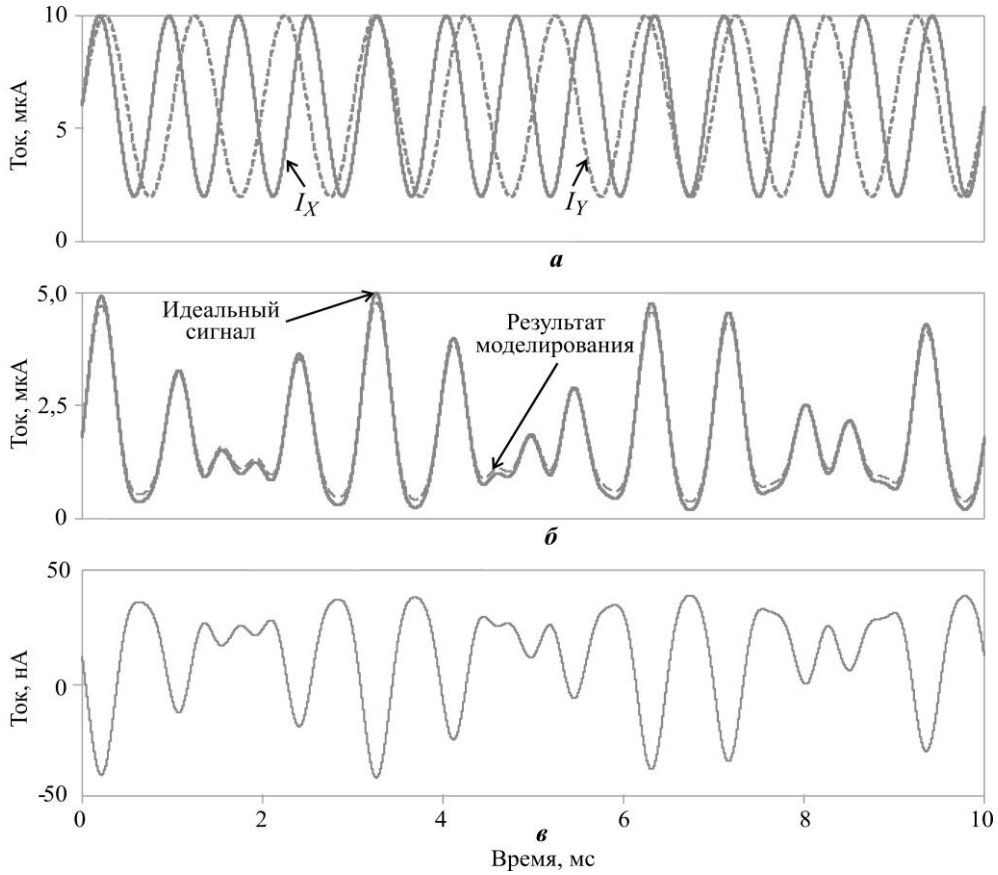


Рис.3. Результаты моделирования: *а* – входные сигналы; *б* – работа умножителя; *в* – значение ошибки
Fig.3. Simulation results: *a* – input signals; *b* – analog signal multiplier product; *c* – error value

Такой подход позволяет создавать как матрицы цифровых транзисторов, так и сложнофункциональные блоки, в том числе микропроцессорные ядра, микроконтроллеры, блоки памяти, блоки аналого-цифровой обработки и др.

На рис.3 показаны результаты моделирования схемы умножителя. Входные сигналы I_X и I_Y имеют частоту 1 и 1,3 кГц соответственно. Амплитудно-частотная характеристика предлагаемого умножителя, представленная на рис.4, показывает, что частота среза составляет 63 МГц при подаче на вход сигналов I_X и I_Y, равных 10 мкА. На рис.5 приведена зависимость коэффициента гармонических искажений от входного тока умножителя для входных сигналов на частотах 100 кГц и 1 МГц. Моделирование показало, что коэффициент гармонических искажений имеет наихудшее значение при входном токе 25 мкА на частоте 1 МГц.

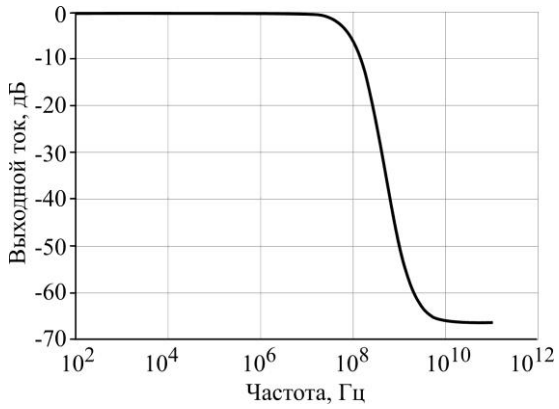


Рис.4. Амплитудно-частотная характеристика
Fig.4. Frequency response

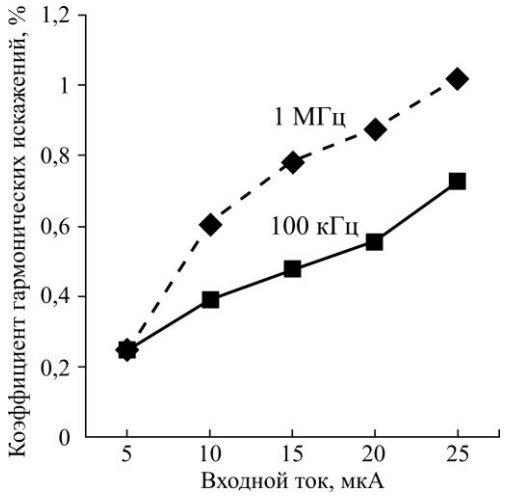


Рис.5. Зависимость коэффициента гармонических искажений от входного сигнала
Fig.5. The dependence of the total harmonic distortion on the input current value

Заключение. Результаты моделирования умножителя аналоговых сигналов на основе элементов базового структурированного кристалла серии 5529 показали, что полученный умножитель можно использовать в составе схем ФАПЧ и АРУ. Максимальная ошибка по току при умножении сигналов на разных частотах составила менее 0,95 %.

Применение библиотеки сложнофункциональных блоков в аналоговых системах позволит снизить энергопотребление за счет отсутствия дискретного преобразования и выполнения вычислений напрямую без использования АЦП.

Литература

1. ***Росляков А.С.*** Исследование возможности создания низкопотребляющих СФ блоков для решения конечно-разностных уравнений в преобразованиях низкочастотных сигналов // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 6. С. 10–11.

2. ***Tohid Aghaei, Ali Naderi Saatlo.*** A new strategy to design low power translinear based CMOS analog multiplier // Integration. 2019. Vol. 69. P. 180–188.

3. ***Филановский И.М., Балтес Х.*** КМОП двухквадрантный множитель с использованием транзисторного триодного режима // IEEE Journal Solid State Circuits. 1992. No. 27. С. 831–833.

4. ***Ali Naderi, Abdollah Khoei, Khayrollah Hadidi, Hadi Ghasemzadeh.*** A new high speed and low power four-quadrant CMOS analog multiplier in current mode // AEU – International Journal of Electronics and Communications. 2009. Vol. 63. Iss. 9. P. 769–775.

5. Микросхемы для аппаратуры космического назначения: практическое пособие / ***В.В. Коняхин, А.Н. Денисов, Р.А. Фёдоров и др.*** / под общ. ред. академика РАН А.Н. Саурова. 2-е изд., испр. и доп. М.: Техносфера, 2017. 388 с.

Поступила в редакцию 24.11.2020 г.; после доработки 11.01.2021 г.; принята к публикации 08.02.2021 г.

Белостоцкая Светлана Олеговна – старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории перспективной электронной компонентной базы и технологических процессов НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), S.Belostotskaya@tcen.ru

Лукьянов Антон Алексеевич – научный сотрудник лаборатории разработки аналого-цифровых БИС НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), A.Lykyanov@tcen.ru

Росляков Алексей Сергеевич – научный сотрудник лаборатории разработки аналого-цифровых БИС НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), A.Roslyakov@tcen.ru

Семенов Александр Николаевич – научный сотрудник лаборатории разработки аналого-цифровых БИС НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), A.Semenov@tcen.ru

Федоров Роман Александрович – кандидат технических наук, начальник лаборатории разработки аналого-цифровых БИС НПК «Технологический центр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), R.Fedorov@tcen.ru

References

1. Roslyakov A.S. Feasibility study of low-power IP-blocks development to solve finite-difference equations in low-frequency signals conversion. *Nano- I mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology*, 2014, no. 6, pp. 10–11. (In Russian).

2. Tohid Aghaei, Ali Naderi Saatlo. A new strategy to design low power translinear based CMOS analog multiplier. *Integration*, 2019, vol. 69, pp. 180–188.

3. Filanovskij I.M., Baltes H. CMOS two-quadrant multiplier using a transistor triode mode. *IEEE J. Solid State Circuits*, 1992, no. 27, pp. 831–833.

4. Ali Naderi, Abdollah Khoei, Khayrollah Hadidi, Hadi Ghasemzadeh. A new high speed and low power four-quadrant CMOS analog multiplier in current mode. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, 2009, vol. 63, iss. 9, pp. 769–775.

5. Koniakhin V.V., Denisov A.N., Fedorov R.A., Vilson A.L., Brazhnikov S.S., Konovalov V.S., Malashevich N.I., Roslyakov A.S. *Microcircuits for space equipment. A practical guide.* Ed by A.N. Saurov. Edition 2 revised and enlarged. Moscow, Technosphera Publ., 2017. 388 p. (In Russian).

Received 24.11.2020; Revised 11.01.2021; Accepted 08.02.2021.

Information about the authors:

Svetlana O. Belostotskaya – Senior Scientist of the Scientific Research Laboratory for Prospective Electronic Component Base and Technological Procedures, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), S.Belostotskaya@tcen.ru

Anton A. Lukyanov – Research Scientist of the Analog-Digital LSI Development Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), A.Lykyanov@tcen.ru

Alexey S. Roslyakov – Research Scientist of the Analog-Digital LSI Development Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), A.Roslyakov@tcen.ru

Alexander N. Semenov – Research Scientist of the Analog-Digital LSI Development Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), A.Semenov@tcen.ru

Roman A. Fedorov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Analog-Digital LSI Development Laboratory, SMC «Technological Centre» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), R.Fedorov@tcen.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на печатную версию журнала можно оформить:

- **по объединенному каталогу** «Пресса России» ООО «Агентство «Книга-Сервис» в любом почтовом отделении. Подписной индекс 38934
- **по каталогу** «Периодические издания. Газеты и журналы» ООО «УП Урал-Пресс». Подписной индекс 38934
- **через редакцию** - с любого номера и до конца года

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

БИОМЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
BIOMEDICAL ELECTRONICS

УДК 615.47:005.53:004 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-162-171**

Управление и поддержка принятия решений в системе персонализированной инсулинотерапии

Е.Л. Литинская

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

zheka101993yandex.ru

Разработка безопасного и эффективного алгоритма управления замкнутой системой, позволяющей поддерживать концентрацию глюкозы в крови в нормальном диапазоне, – основная цель исследователей и разработчиков таких систем. Для решения данной задачи разрабатываются методы и системы управления с обратной связью. В работе система персонализированной инсулинотерапии рассмотрена как замкнутая система управления, основанная на принципах обратной связи и компенсации внешних возмущений. Автоматическое управление гликемией по обратной связи основано на пропорциональном регулировании скорости введения базального инсулина относительно оптимизированного набора пороговых значений в пределах целевого диапазона. При двустороннем регулировании гликемии предложено использовать методы управления на основе прогнозирующих моделей для расчета не только оптимального профиля введения болюса, но и рекомендуемой корректирующей дозы углеводов. Реализован сравнительный анализ трендов, наблюдаемых в профилях измеренных и прогнозируемых значений концентрации глюкозы в крови для детектирования и компенсации ее непредвиденных отклонений. Результаты испытаний разработанных алгоритмов *in silico* на девяти виртуальных пациентах в течение 72 ч показали возможность поддержания гликемии в целевом диапазоне в течение всего времени работы системы.

Ключевые слова: автоматизированная инсулинотерапия; поддержка принятия решений; замкнутая система управления; сахарный диабет

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-37-90028).

Для цитирования: Литинская Е.Л. Управление и поддержка принятия решений в системе персонализированной инсулинотерапии // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 2. С. 162–171. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-162-171

© Е.Л. Литинская, 2021

Control and Decision-Making Support in a Personalized Insulin Therapy System

E.L. Litinskaia

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

zheka101993@yandex.ru

Abstract: Insulin therapy automation is an actual research line in the glycemic control of diabetes mellitus type 1 patients. Development of closed-loop systems and methods will allow blood glucose maintaining in the physiological range. The work proposes the personalized insulin therapy system considered as a closed-loop control system based on feedback and external disturbances compensation principles. Automatic feedback-based glycemic control includes proportional regulation of basal insulin infusion rate in relation to optimized thresholds inside the target range. To achieve bidirectional glycemic regulation the author proposes model predictive control for calculation of not only optimal profile of bolus infusion but also recommended corrective dose of carbohydrates. Besides, the comparative analysis of trends in measured and predicted profiles of blood glucose allows detecting and compensation of its unpredicted deviations. *In silico* testing of developed algorithms on nine virtual adults for 72 hours shows an ability for glucose maintaining in the target range for whole system operation time.

Keywords: automated insulin therapy; decision-making support; closed-loop control system; diabetes mellitus

For citation: Litinskaia E.L. Control and decision-making support in a personalized insulin therapy system. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 162–171. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-162-171

Funding: the study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-37-90028).

Введение. Автоматизированная (помповая) инсулинотерапия – наиболее эффективный способ лечения сахарного диабета первого типа. Задачи такой персонализированной инсулинотерапии следующие: поддержание концентрации глюкозы в крови (КГК) в нормальном диапазоне, осуществляемое путем длительного непрерывного введения инсулина с небольшой амплитудой (базального инсулина); компенсация резкого роста КГК путем кратковременного введения инсулина с большой амплитудой (болюсного инсулина).

В настоящее время активно ведутся разработки замкнутых систем персонализированной инсулинотерапии (СПИ) [1] разного уровня автоматизации: полуавтоматические системы, требующие участия пользователя при введении болюса; автоматические и автоматические бигормональные системы, позволяющие также вводить глюкагон, вызывающий рост КГК. Обратная связь в замкнутых СПИ осуществляется за счет датчика обратной связи – непрерывного монитора глюкозы, на основе показаний которого формируется текущая скорость введения инсулина. Исполнительным устройством СПИ является насос инсулина. В существующих замкнутых системах используются различные методы управления, основанные на пропорционально-интегрально-дифферен-

цирующем регулировании, прогнозирующих моделях (УПМ), а также нечеткой логике и искусственном интеллекте [2].

Основной показатель эффективности СПИ – доля времени нахождения КГК в диапазоне 70–180 мг/дл. При этом эффективность управления зависит от таких критериев, как быстрота реакции системы, время регулирования, перерегулирование. Большинство существующих СПИ, наиболее близких к решению задачи автоматического управления гликемией (разработки компаний Medtronic, Tandem, OmniPod, Diabeloop), полуавтоматические. Это связано с опасностью чрезмерного перерегулирования при ошибке автоматического управления. При резком изменении КГК необходимо значительно скорректировать управляющее воздействие, т.е. текущую скорость введения инсулина. Однако ввиду фармакологических особенностей инсулина эффект воздействия достигается с задержкой. Это вызывает запаздывание в линии обратной связи и может привести к значительному перерегулированию. Современные СПИ показывают перспективные результаты в поддержании гликемии. Большинство систем позволяют поддерживать КГК в целевом диапазоне в течение 70–75 % времени согласно показаниям непрерывного монитора глюкозы [3–5]. Тем не менее недостаточная эффективность и безопасность СПИ препятствуют их широкому использованию в медицинской практике.

Разработка новых подходов к автоматизации инсулинотерапии, а также оптимизация и модернизация существующих методов являются актуальными задачами.

Синтез системы персонализированной инсулинотерапии. Рассмотрим СПИ как систему управления, основанную на принципе обратной связи. Он заключается в автоматической коррекции управляющего воздействия в зависимости от динамики КГК, контроль которой осуществляется по данным датчика обратной связи. Однако такой подход позволяет решить задачу поддержания гликемии в нормальном диапазоне только при относительно небольших флуктуациях управляемого параметра. При резких изменениях КГК вследствие, например, такого внешнего возмущения, как прием пищи, требуется более интенсивное управляющее воздействие, направленное на компенсацию возмущения – коррекционный болюс. В целях минимизации перерегулирования и обеспечения безопасности в разрабатываемой системе управления гликемией используется принцип компенсации внешних возмущений, реализуемый методами поддержки принятия решений. Пациент – лицо, принимающее решение (ЛПР), – вводит данные о приеме пищи, по которым рассчитывается рекомендуемая доза болюса. ЛПР может либо подтвердить ее, либо ввести дозу, рассчитанную вручную. Решить проблему запаздывания обратной связи в рамках принципа компенсации внешних возмущений предлагается методом прогнозирующих моделей, реализующим прогнозирование динамики КГК на основе математической модели влияния управляющего воздействия на объект управления. Данный подход позволяет заблаговременно рассчитать оптимальные дозу, время и длительность введения болюса. Инсулинотерапия оказывает одностороннее воздействие на управляемый параметр, позволяя только снижать КГК за счет введения инсулина. Для реализации двунаправленного воздействия на КГК используется поддержка принятия решений: своевременно рекомендовать пользователю принять необходимое количество углеводов, минимизируя перерегулирование.

К внешним возмущениям системы можно отнести и различные ситуации нарушения функционирования или эксплуатации системы, такие как отсутствие данных о приеме пищи или нарушение работы исполнительного устройства. Алгоритмы и методы поддержки принятия решений также могут позволить компенсировать возмуще-

ния. Детектирование данных ситуаций осуществляется по отклонению измеренных значений от прогноза, после чего ЛПР предлагаются соответствующие рекомендации.

Таким образом, синтезируемая СПИ представляет собой автоматизированную замкнутую систему управления гликемией, основанную на принципах обратной связи и компенсации внешних возмущений методами поддержки принятия решений. Первичная конфигурация СПИ представлена на рис.1.

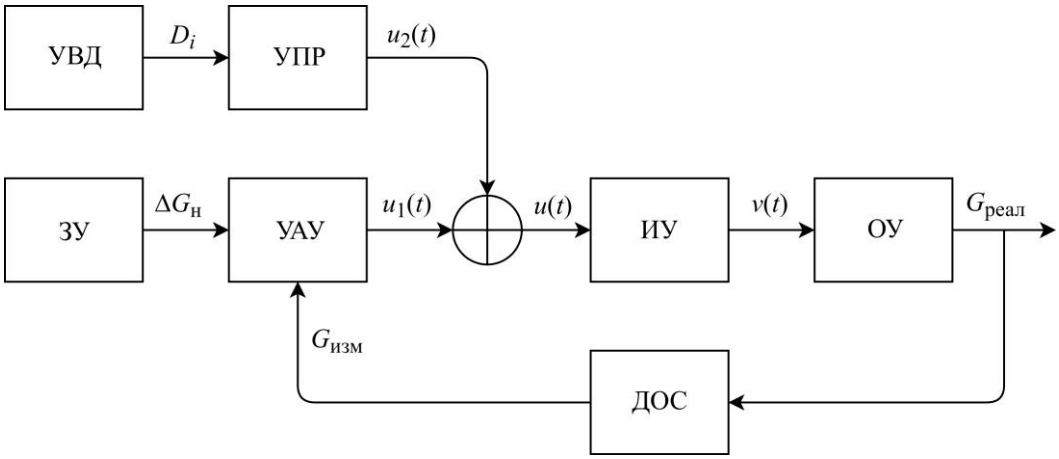


Рис.1. Структура системы персонализированной инсулинотерапии: ЗУ – задающее устройство; УАУ – устройство автоматического управления; УПР – устройство принятия решений; УВД – устройство ввода данных; ИУ – исполнительное устройство; ОУ – объект управления; ДОС – датчик обратной связи

Fig.1. System of personalized insulin therapy configuration: ЗУ – reference-input unit, УАУ – automatic controller; УПР – decision making unit; УВД – input data unit; ИУ – effector; ОУ – control object; ДОС – feedback sensor

Задающее устройство определяет целевой диапазон, в рамках которого необходимо поддерживать КГК. На основе показаний датчика обратной связи $g_{fb}(t)$ устройство автоматического управления формирует управляющее воздействие $u_1(t)$, которое определяет скорость введения базального инсулина. Датчиком обратной связи служит подкожный монитор глюкозы, обеспечивающий непрерывный контроль КГК при достаточной точности измерения [6]. Средством регистрации внешних возмущений является устройство ввода данных, с помощью которого происходит взаимодействие системы с пользователем – ЛПР. На основе данных, вводимых ЛПР, и его реакций на рекомендации системы УПР формирует управляющее воздействие $u_2(t)$, включающее выбранную пользователем дозу болюса, а также команды, требующие остановки инсулинотерапии при неисправности системы. На основе управляющих воздействий $u_1(t)$ и $u_2(t)$ формируется результирующее воздействие $u(t)$, подаваемое на исполнительное устройство. После обработки управляющего воздействия насос вводит инсулин со скоростью $v(t)$, снижая значение управляемого параметра $g(t)$.

Регулирование инфузии инсулина. В основе УАУ лежит алгоритм автоматического регулирования инфузии базального инсулина на основе обратной связи по КГК [7]. Задача алгоритма – поддержание гликемии в диапазоне, определяемом его минимальной G_x и максимальной G_n границами. Ввиду запаздывающего эффекта управляющего воздействия внутри целевого диапазона введен супернормальный диапазон, определяемый границами $G_x' < G_x$ и $G_n' > G_n$, внутри которого нет необходимости корректировать скорость введения базального инсулина $v_{bas}(t)$. В этом случае инсулин вводится с базовой скоростью v_0, заданной врачом для конкретного пациента.

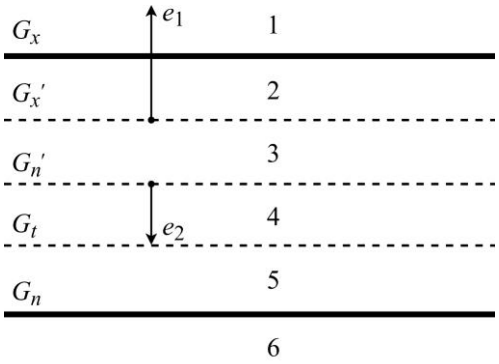


Рис.2. Зоны регулирования внутри целевого диапазона: 1, 2 – зоны ускорения; 3 – супернормальный диапазон; 4 – зона торможения; 5, 6 – зоны остановки

Fig.2. Blood glucose regulation subranges: 1, 2 – acceleration zones; 3 – supernormal deep range; 4 – braking zone; 5, 6 – stopping zones

Если измерения КГК выходят за супернормальный диапазон, управляющее воздействие корректируется пропорционально отклонениям e_1 и e_2 измеренных значений от границ диапазона (рис.2). Для ограничения перерегулирования в области гипогликемии, вызванного запаздыванием обратной связи, дополнительно введено пороговое значение G_t, при приближении к которому воздействие пропорционально снижается и по достижении которого останавливается. Тогда математическая модель УАУ будет иметь вид

$$v_{bas} = k_1 e_1 \eta(e_1)\eta(\varepsilon_1 - e_1) - k_2 e_2 \eta(e_2)\eta(\varepsilon_2 - e_2) + \\ + v_0 \eta(e_2 - \varepsilon_2) + (v_{\max} - v_0)\eta(e_1 - \varepsilon_1),$$

где $e_1 = g_{fb}(t) - G_x'$, $e_2 = G_n' - g_{fb}(t)$ – отклонения измеренных значений от границ диапазона; $\varepsilon_2 = G_n' - G_t$ – максимальное отклонение e_2; ε_1 – максимальное отклонение e_1 при некоторой максимально допустимой скорости введения базального инсулина $v_{\max}$; $k_1 = (v_{\max} - v_0)/\varepsilon_1$, $k_2 = v_0/\varepsilon_2$ – коэффициенты.

Управляющее воздействие $u_2(t)$ определяется работой алгоритма принятия решений, основанного на сравнении прогнозируемых и измеренных значений КГК. В зависимости от наблюдаемого тренда и величины отклонения треков друг от друга предполагается несколько характерных ситуаций (таблица). В зависимости от детектированной ситуации УПР предлагает ЛПР соответствующие рекомендации по ее компенсации.

Тренды анализируются по нескольким измеренным значениям КГК $g_{fb}(t)$ и соответствующим им прогнозируемым значениям $g_{pr}(t)$. При этом для определения типа тренда и отклонения используются понятия плавного, среднего и резкого трендов (убывающий и растущий) и отклонений. Отклонения рассчитываются асимметрично для обеспечения более высокой чувствительности алгоритма в области низких значений КГК при достаточной чувствительности и специфичности в области высоких значений КГК:

$$\delta = \begin{cases} \dfrac{g_{fb}(t) - g_{pr}(t)}{g_{pr}(t)} & \text{для } g_{fb}(t) > g_{pr}(t), \\ \dfrac{g_{pr}(t) - g_{fb}(t)}{g_{fb}(t)} & \text{для } g_{pr}(t) > g_{fb}(t). \end{cases}$$

Алгоритм принятия решений также контролирует приближение измеренных и прогнозируемых значений к границам целевого диапазона. В случае риска перерегулирования, а также в ряде ситуаций, связанных с неисправностью системы, УПР предлагает ЛПР приостановить подачу инсулина.

Классификация ситуаций по отклонению измерений от прогноза
Event classification in relation to measurements and prognosis divergence

Тип отклонения	Тип тренда	Ситуация
Отклонение измеренных значений от постоянного прогноза	Средний или резкий растущий тренд	Отсутствие данных о приеме пищи Стресс Неисправность глюкометра Непредвиденный рост
	Средний или резкий убывающий тренд	Отсутствие данных о ручном вводе инсулина Неисправность глюкометра Непредвиденный спад
	Равнозначное смещение вверх	Смещение прогноза Неисправность глюкометра
	Равнозначное смещение вниз	Смещение прогноза Неисправность глюкометра
	Резкий колебательный тренд	Неисправность глюкометра Непредвиденные колебания
Отклонение измеренных значений от непостоянного прогноза	Измерения – постоянный или убывающий тренд Прогноз – растущий тренд	Введены данные о приеме пищи, но прием пищи не осуществлен Неисправность глюкометра Непредвиденное отклонение или спад
	Измерения – постоянный или растущий тренд Прогноз – убывающий тренд	Повреждение инфузионной системы Данные о введении инсулина, но инсулин не введен Неисправность глюкометра Непредвиденное отклонение или рост
Отклонение изменяющегося трека измеренных значений от изменяющегося прогноза	Растущий тренд измерений ниже растущего прогноза	Некорректные данные о приеме пищи Неисправность датчика глюкозы Смещение прогноза
	Растущий тренд измерений выше растущего прогноза	
	Убывающий тренд измерений выше убывающего прогноза	Некорректные данные о ручном введении инсулина Неисправность инфузионной системы Неисправность датчика глюкозы Смещение прогноза
	Убывающий тренд измерений ниже убывающего прогноза	
	Равнозначное смещение вверх	Смещение прогноза Неисправность датчика глюкозы
	Равнозначное смещение вниз	

Согласно законам управления УАУ и УПР управляющие воздействия $u_1(t)$ и $u_2(t)$ в некоторых случаях могут быть равны нулю. На результирующее управляющее воздействие $u(t)$ могут оказывать влияние нарушения функционирования исполнительного устройства или других элементов системы, вызванные внутренними ошибками (закончился инсулин в резервуаре, необходимо заменить расходные материалы и др.) или внешними воздействиями (пережатие или обрыв трубки, ошибки эксплуатации и др.). Для регистрации нарушений в насосе инсулина в системе управления предусмотрена обратная связь по датчику тока и энкодеру. Слишком низкая скорость вращения мотора

и выход потребляемого тока за установленный диапазон свидетельствуют о неисправности насоса. Для обозначения наличия любого вида ошибок введена логическая переменная E, определяемая посредством конъюнкции логических переменных. Такие переменные соответствуют ошибкам, детектируемым датчиком тока, энкодером, УПР, и внутренним ошибкам элементов системы.

Фактическая скорость введения инсулина насосом пропорциональна скорости вращения вала микродвигателя, регулируемой параметрами широтно-импульсной модуляции. В свою очередь, скважность широтно-импульсной модуляции $s(t)$ пропорциональна сумме скоростей введения базального инсулина $v_{bas}(t)$ и болюса $v_{bol}(t)$, определяемых управляющими воздействиями УАУ и УПР, и равна нулю при наличии ошибок. Тогда математическая модель исполнительного устройства будет иметь вид

$$\begin{cases} v(t) = k_u s(t), \\ s(t) = k_s \left(v_{bas}(t) + v_{bol}(t) \right) E, \end{cases}$$

где k_u и k_s – коэффициенты пропорциональности.

Математическая модель объекта управления основана на физиологических моделях Э. Крэгена [8] и К. Далла Ман [9] и определяет динамику КГК в зависимости от введения инсулина и приема пищи. Модель также рассматривает естественный рост управляемого параметра и его установившееся значение, характерное для пациентов с сахарным диабетом первого типа [7]. Моделирование датчика глюкозы сводится к добавлению случайной погрешности к значениям КГК, получаемым на выходе математической модели объекта управления, а также задержки в обновлении измеренных значений.

Оптимизация параметров системы персонализированной инсулинотерапии. Параметрами, влияющими на управляющее воздействие, формируемое УАУ, являются границы супернормального диапазона G_x', G_n', пороговое низкое значение КГК G_t, а также максимальная скорость введения базального инсулина $v_{\max}$. Параметр $v_{\max}$ зависит от задающего параметра v_0, определяющего базовую скорость введения инсулина через коэффициент пропорциональности k_{vx}. Для повышения эффективности УАУ проведена оптимизация данных параметров.

Ввиду того что компенсация внешних возмущений осуществляется путем взаимодействия с пользователем и влияет на управляющее воздействие только при необходимости введения болюса или отключения подачи инсулина, задача оптимизации параметров УПР сводится к определению оптимальных параметров введения болюса: дозы, времени начала, длительности и профиля введения инсулина.

Эффективность СПИ определяется отклонением КГК от границ целевого диапазона, а общая функция эффективности зависит от следующих критериев: перерегулирования в области низких значений КГК L; максимального значения КГК M; показателя J, который определяет интегральный эффект гипергликемии и коррелирует с временем регулирования системы. Для оптимизации параметров УПР также используется критерий удобства введения ЛПР информации о приеме пищи C, которая определяет начало введения болюса.

Задача оптимизации – максимизация общих функций эффективности:

$$F_{\text{УАУ}} = \left(LM \right) / J, \quad F_{\text{УПР}} = \left(LMC \right) / J.$$

Все критерии эффективности, за исключением J, нормированы на отрезок [0, 1], оптимизация проведена методом наискорейшего спуска. Определены следующие оп-

тимальные параметры УАУ: $G_x' = 140$ мг/дл; $G_n' = 110$ мг/дл; $G_t = 70$ мг/дл; $k_{vx} = 0{,}85$. В качестве оптимального профиля введения болюса выбрано двойное введение инсулина с амплитудами 0,7 и 0,3 от дозы болюса длительностью по 10 мин за 20 мин до приема пищи и в момент приема пищи соответственно.

Испытания системы персонализированной инсулинотерапии. Для проведения испытаний разработанной системы *in silico* использован симулятор виртуальных пациентов UVA/Padova T1DMS [10], позволяющий моделировать объект управления, исполнительное устройство и датчик обратной связи. Разработанные алгоритмы программно реализованы в среде Simulink и интегрированы в симулятор.

Испытания проводили на девяти виртуальных взрослых пациентах. В качестве датчика обратной связи выбран непрерывный монитор глюкозы с погрешностью порядка 15 %, а в качестве исполнительного устройства – стандартный инсулиновый насос. В течение 72-часовой симуляции моделировалось по четыре приема пищи с заданными массами углеводов в сутки: 40 г – в 7:00, 60 г – в 12:00, 40 г – в 17:00, 30 г – в 22:00. Длительность каждого приема пищи составляла 15 мин.

Результаты симуляции представлены на рис.3. Из рисунка видно, что все пики с учетом стандартного отклонения не выходят за целевой диапазон. Среднее время регулирования с использованием алгоритмов управления равно 130 мин, при управлении без обратной связи – 146 мин. Небольшие приемы пищи вызвали незначительные флуктуации без выхода значений КГК за границы супернормального диапазона. В течение симуляции наблюдается перерегулирование, вызванное введением болюса в ответ на прием пищи.

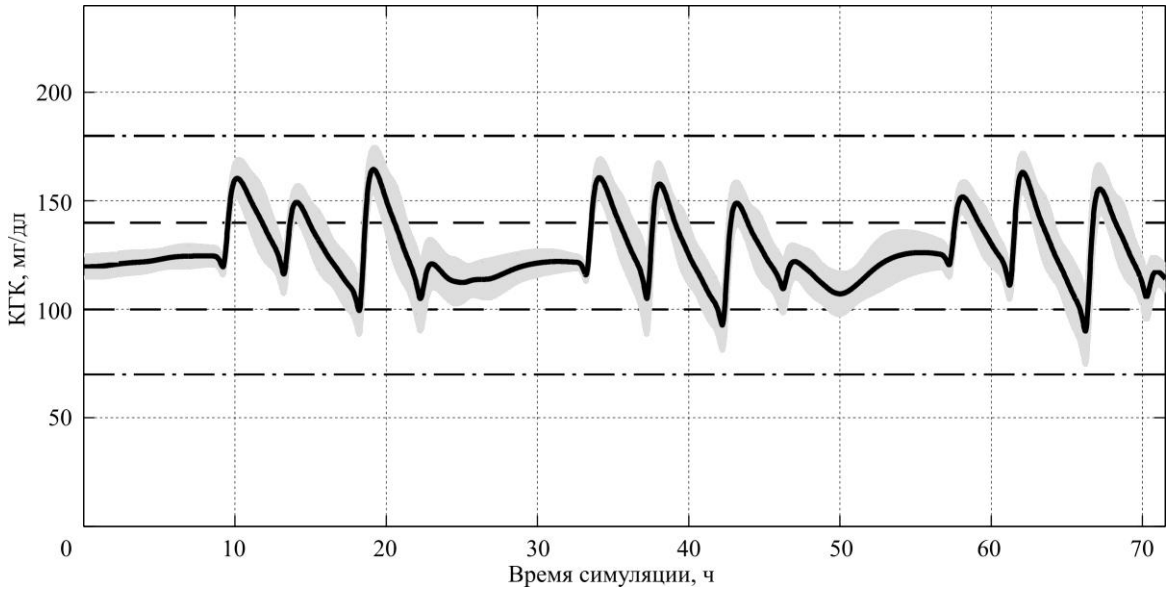


Рис.3. Среднее значение КГК для девяти взрослых пациентов: – – – супернормальный диапазон; ■ – стандартное отклонение; —— среднее значение; —·—·— целевой диапазон

Fig.3. Average BG for nine adult patients: – – – supernormal range; ■ – standard deviation; —— mean BG; —·—·— target range

Клиническая безопасность используемых алгоритмов управления определяется шкалой соотношения максимального и минимального значений КГК, представленной на рис.4 [11]. Как видно из рисунка, данное соотношение у восьми из девяти пациентов находится в зоне А, что соответствует высокой безопасности применения.

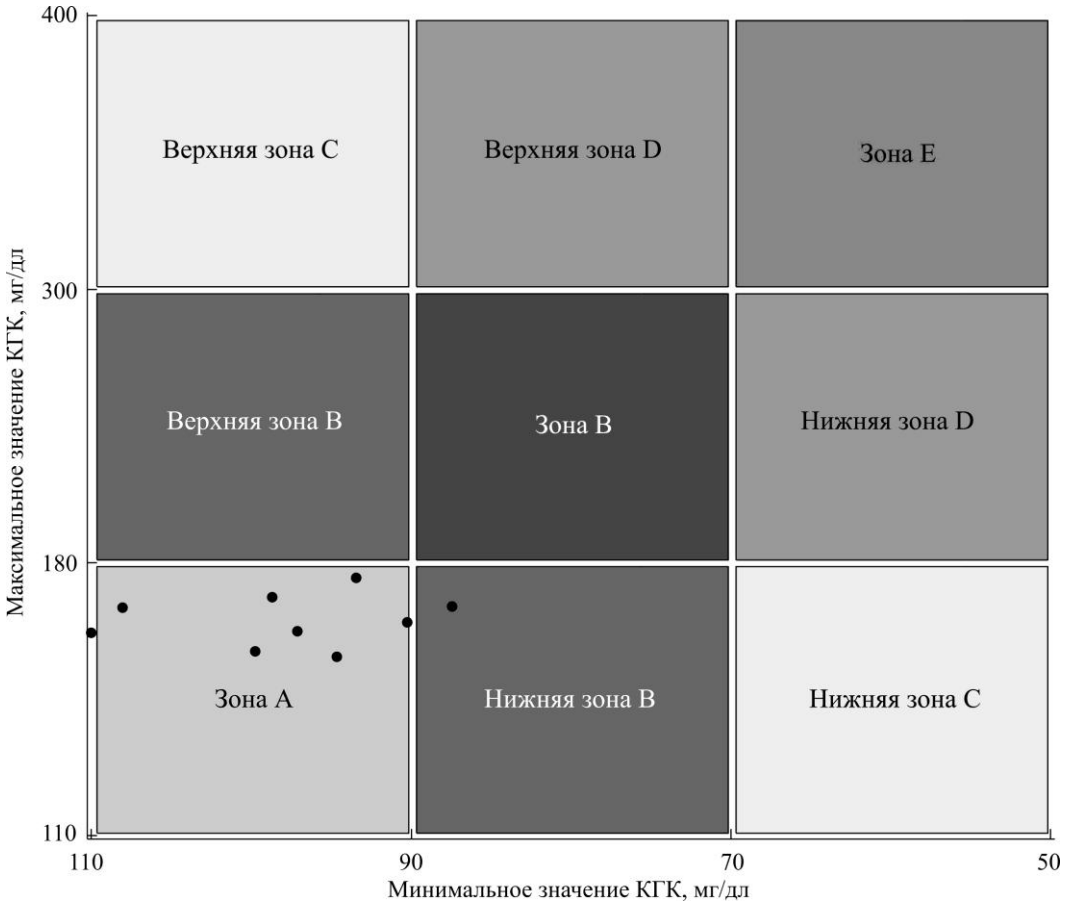


Рис.4. Шкала клинических последствий регулирования: зона A – 89 %; зона B – 11 %; зона C – 0 %; зона D – 0 %; зона E – 0 %
Fig.4. Control variability analysis grid: zone A – 89 %; zone B – 11 %; zone C – 0 %; zone D – 0 %; zone E – 0 %

Заключение. Проведенные исследования показали следующее. Разработанная замкнутая система автоматизированной персонализированной инсулинотерапии позволяет эффективно управлять гликемией пациента с сахарным диабетом первого типа. Однако для обеспечения безопасности системы требуется дальнейшая доработка алгоритмов управления с целью минимизировать перерегулирование после приема пищи.

Литература

1. ***Fabris C., Kovatchev B.P.*** The closed-loop artificial pancreas in 2020 // Artificial Organs. 2020. Vol. 44. No. 7. P. 671–679. DOI: 10.1111/aor.13704

2. ***Trevitt S., Simpson S., Wood A.*** Artificial pancreas device systems for the closed-loop control of type 1 diabetes // J. of Diabetes Science and Technology. 2016. Vol. 10. No. 3. P. 714–723. DOI: 10.1177/1932296815617968

3. Safety of a hybrid closed-loop insulin delivery system in patients with type 1 diabetes / ***R. Bergenstal, S. Garg, S. Weinzimer et al.*** // JAMA. 2016. Vol. 316. No. 13. P. 1407–1408. DOI: 10.1001/jama.2016.11708

4. Six-month randomized, multicenter trial of closed-loop control in type 1 diabetes / ***S.A. Brown, B.P. Kovatchev, D. Raghinaru et al.*** // New England Journal of Medicine. 2019. Vol. 381. No. 18. P. 1701–1717.

5. Feasibility of long-term closed-loop control: a multicenter 6-month trial of 24/7 automated insulin delivery / ***B.P. Kovatchev, P. Cheng, S.M. Anderson et al.*** // Diabetes Technology & Therapeutics. 2017. Vol. 19. No. 1. P. 18–24. DOI: 10.1089/dia.2016.0333

6. ***Litinskaia E.L., Bazaev N.A., Pozhar K.V.*** Control methods in automated glycemia maintaining system // Proc. of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg: IEEE, 2020. P. 2406–2410. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039391

7. ***Литинская Е.Л., Пожар К.В., Полякова Е.А.*** Метод автоматического регулирования инфузии базального инсулина в системе персонализированной инсулинотерапии // Медицинская техника. 2020. № 5(323). С. 51–54.

8. ***Kraegen E.W., Chisholm D.J.*** Insulin responses to varying profiles of subcutaneous insulin infusion: kinetic modelling studies // Diabetologia. 1984. Vol. 26. No. 3. P. 208–213.

9. ***Dalla Man C., Rizza R.A., Cobelli C.*** Meal simulation model of the glucose-insulin system // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2007. Vol. 54. No. 10. P. 1740–1749. DOI: 10.1109/TBME.2007.893506

10. ***Visentin R., Dalla Man C., Kovatchev B.P., Cobelli C.*** The University of Virginia / Padova type 1 diabetes simulator matches the glucose traces of a clinical trial // Diabetes Technology & Therapeutics. 2014. Vol. 16. No. 7. P. 428–434.

11. ***Clarke W., Kovatchev B.P.*** Statistical tools to analyze continuous glucose monitor data // Diabetes Technology & Therapeutics. 2009. Vol. 11. P. 45–54. DOI: 10.1089/dia.2008.0138

Поступила в редакцию 09.11.2020 г.; после доработки 09.11.2020 г.; принята к публикации 08.02.2021 г.

Литинская Евгения Львовна – инженер, ассистент Института биомедицинских систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), zheka101993@yandex.ru

References

1. Fabris C., Kovatchev B.P. The closed-loop artificial pancreas in 2020. *Artificial Organs*, 2020, vol. 44, no. 7, pp. 671–679. DOI: https://doi.org/10.1111/aor.13704

2. Trevitt S., Simpson S., Wood A. Artificial pancreas device systems for the closed-loop control of type 1 diabetes. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 714–723. DOI: https://doi.org/10.1177/1932296815617968

3. Bergenstal R., Garg S., Weinzimer S. et al. Safety of a hybrid closed-loop insulin delivery system in patients with type 1 diabetes. *JAMA*, 2016, vol. 316, no. 13, pp. 1407–1408. DOI: https://doi.org/10.1001/jama.2016.11708

4. Brown S.A., Kovatchev B.P., Raghinaru D. et al. Six-month randomized, multicenter trial of closed-loop control in type 1 diabetes. *New England Journal of Medicine*, 2019, vol. 381, no. 18, pp. 1701–1717.

5. Kovatchev B.P., Cheng P., Anderson S.M. et al. Feasibility of long-term closed-loop control: a multicenter 6-month trial of 24/7 automated insulin delivery. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 2017, vol. 19, no. 1, pp. 18–24. DOI: https://doi.org/10.1089/dia.2016.0333

6. Litinskaia E.L., Bazaev N.A., Pozhar K.V. Control methods in automated glycemia maintaining system. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus).* St. Petersburg: IEEE, 2020, pp. 2406–2410. DOI: https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039391

7. Litinskaia E.L., Pozhar K.V., Polyakova E.A. A method of basal insulin infusion automatic regulation in the personalized insulin therapy system. *Meditsinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2020, vol. 5, pp. 51–54. (In Russian).

8. Kraegen E.W., Chisholm D.J. Insulin responses to varying profiles of subcutaneous insulin infusion: kinetic modelling studies. *Diabetologia*, 1984, vol. 26, no. 3, pp. 208–213.

9. Dalla Man C., Rizza R.A., Cobelli C. Meal simulation model of the glucose-insulin system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2007, vol. 54, no. 10, pp. 1740–1749. DOI: https://doi.org/10.1109/TBME.2007.893506

10. Visentin R., Dalla Man C., Kovatchev B.P., Cobelli C. The University of Virginia/Padova type 1 diabetes simulator matches the glucose traces of a clinical trial. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 2014, vol. 16, no. 7, pp. 428–434. DOI: https://doi.org/10.1089/dia.2013.0377

11. Clarke W., Kovatchev B.P. Statistical tools to analyze continuous glucose monitor data. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 2009, vol. 11, pp. 45–54. DOI: https://doi.org/10.1089/dia.2008.0138

Received 09.11.2020; Revised 09.11.2020; Accepted 08.02.2021.

Information about the author:

Evgeniia L. Litinskaia – Engineer, Assistant of Institute of Biomedical Systems, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), zheka101993@yandex.ru

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК: 004.02 **DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-172-183**

Параллельно-конвейерная обработка видеоинформации в многопроцессорных гетерогенных системах на кристалле

Е.С. Янакова[1], Г.Т. Мачарадзе[2,3], Л.Г. Гагарина[1], А.А. Швачко[3]

[1]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
[3]АО НПЦ «ЭЛВИС», г. Москва, Россия

gagar@bk.ru

Переход от гомогенных архитектур к гетерогенным позволяет добиться преимущества в производительности, размере, весе и потребляемой мощности, что особенно важно для встраиваемых решений. Однако разработка параллельного программного обеспечения для гетерогенных вычислительных систем – достаточно сложная задача ввиду требований высокой производительности, легкой программируемости и масштабируемости. В работе исследована эффективность параллельно-конвейерной обработки видеоинформации в многопроцессорных гетерогенных системах на кристалле (СнК). Описана математическая модель используемых структур, сформулированы критерии достижения эффективной обработки видеоданных, на основе которых построена целевая функция. Приведена типовая схема параллельно-конвейерной обработки видеоданных с использованием различных ускорителей поточной обработки видеоинформации (DSP, GPU, ISP, VDP, VPU и др.). Разработана схема параллельно-конвейерной обработки видеоданных на гетерогенной СнК 1892ВМ248. Предложена методика эффективной параллельно-конвейерной обработки видеоинформации в гетерогенных вычислительных СнК, включая стек программного обеспечения, состоящий из уровня операционной системы, уровня технологий программирования и уровня приложений. Проведен сравнительный анализ наиболее распространенных технологий программирования гетерогенных СнК, таких как OpenCL, OpenMP, MPI, OpenAMP. Результаты анализа показали, что в зависимости от назначения конечного устройства следует применять две парадигмы программирования: на основе технологии OpenCL (для встраиваемых систем) и технологию MPI (для межъядерного и межпроцессорного взаимодействий). Полученные результаты параллельно-конвейерной обработки в рамках задачи распознавания лиц подтвердили эффективность выбранных решений.

© Е.С. Янакова, Г.Т. Мачарадзе, Л.Г. Гагарина, А.А. Швачко, 2021

Ключевые слова: системы на кристалле; обработка видеоинформации; технологии программирования; проблемно ориентированные ядра; гетерогенные вычислительные системы; процессор 1892ВМ248

Для цитирования: Янакова Е.С., Мачарадзе Г.Т., Гагарина Л.Г., Швачко А.А. Параллельно-конвейерная обработка видеоинформации в многопроцессорных гетерогенных системах на кристалле // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 2. С. 172–183. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-172-183

Parallel-Pipelined Video Processing in Multicore Heterogeneous Systems on Chip

E.S. Yanakova[1], G.T. Macharadze[2,3], L.G. Gagarina[1], A.A. Shvachko[3]

[1]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
[2]National Research University «MPEI», Moscow, Russia
[3]JSC SPC «ELVEES», Moscow, Russia

gagar@bk.ru

Abstract: A turn from homogeneous to heterogeneous architectures permits to achieve the advantages of the efficiency, size, weight and power consumption, which is especially important for the built-in solutions. However, the development of the parallel software for heterogeneous computer systems is rather complex task due to the requirements of high efficiency, easy programming and the process of scaling. In the paper the efficiency of parallel-pipelined processing of video information in multiprocessor heterogeneous systems on a chip (SoC) such as DSP, GPU, ISP, VDP, VPU and others, has been investigated. A typical scheme of parallel-pipelined processing of video data using various accelerators has been presented. The scheme of the parallel-pipelined video data on heterogeneous SoC 1892VM248 has been developed. The methods of efficient parallel-pipelined processing of video data in heterogeneous computers (SoC), consisting of the operating system level, programming technologies level and the application level, have been proposed. A comparative analysis of the most common programming technologies, such as OpenCL, OpenMP, MPI, OpenAMP, has been performed. The analysis has shown that depending on the device finite purpose two programming paradigms should be applied: based on OpenCL technology (for built-in system) and MPI technology (for inter-cell and inter processor interaction). The results obtained of the parallel-pipelined processing within the framework of the face recognition have confirmed the effectiveness of the chosen solutions.

Keywords: systems on chip; video processing; programming tools; application-specific cores; heterogeneous systems; processor 1892VM248

For citation: Yanakova E.S., Macharadze G.T., Gagarina L.G., Shvachko A.A. Parallel-pipelined video processing in multicore heterogeneous systems on chip. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 172–183. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-172-183

Введение. Многоядерная архитектура предполагает включение в состав единой вычислительной системы проблемно ориентированных вычислительных узлов, специализирующихся на выполнении конкретного класса задач. Переход от гомогенных

архитектур к гетерогенным позволяет добиться преимущества в производительности, размере, весе и потребляемой мощности, что особенно важно для встраиваемых решений. Однако разработка параллельного программного обеспечения (ПО) для гетерогенных вычислительных систем – достаточно сложная задача ввиду требований высокой производительности, легкой программируемости и масштабируемости.

Обработка видеоданных по сравнению с другими видами сигнальной обработки имеет особенности [1], влияющие на характеристики аппаратно-программных платформ:

- частота поступления задач 30 (или 60) раз в секунду, определяющая максимально допустимое время обработки 33 мс (или 16 мс соответственно);
- огромный поток входной информации и сложность алгоритмов видеообработки налагает ограничения на производительность вычислительной системы;
- высокоинтенсивное развитие алгоритмов обработки видеоданных с развитием алгоритмов машинного обучения.

Цель настоящей работы – анализ и разработка методики эффективной параллельно-конвейерной обработки видеоинформации в гетерогенных вычислительных системах на кристалле (СнК).

Формализация задачи обработки видеоинформации в гетерогенных СнК. Для общей постановки задачи обработки видеоинформации в гетерогенных СнК необходимо определить совокупность моделей, описывающих структуру, ресурсы и входной поток задач (процессов) СнК, а также критерии эффективности распределения ресурсов.

Гетерогенная вычислительная система описывается выражением

$$S = \left\{ S_{\text{в.с}}, S_k, S_p, S_{\text{у}} \right\},$$

где $S_{\text{в.с}}$ – вычислительная подсистема СнК, представляющая собой процессорные ядра (вычислительные узлы); S_k – среда взаимодействия; S_p – протоколы передачи данных и интерфейсы взаимодействия между вычислительными узлами СнК в процессе обработки задач; $S_{\text{у}}$ – система управления СнК.

Вычислительные узлы СнК представляют собой множество $P = \left\{ P_1, \ldots, P_n \right\}$ и могут являться процессорами общего назначения, процессорами специального назначения (например, цифровыми сигнальными процессорами), сопроцессорами, ускоряющими логику, – интегральными схемами специального назначения или программируемыми логическими интегральными схемами. Средой взаимодействия S_k для гетерогенных СнК с архитектурой NUMA (Non-Uniform Memory Architecture, неоднородная архитектура памяти) является общая память. В качестве интерфейсов взаимодействия рассматриваются библиотеки, реализующие схему работы с общей памятью, например ShMem, или стандарты, например MPI. Входной поток задач определяется как множество $I = \left\{ I_1, \ldots, I_n \right\}$ задач (процессов), подлежащих исполнению на СнК с заданным набором ресурсов. Каждая задача из потока задач $I_i \in I$ описывается выражением $I_i = \left\{ S_I, t, R \right\}$. Здесь S_I – источник задачи; t – момент времени поступления задачи в систему; R – ресурсоемкость задачи, определяющая совокупность требований задачи к ресурсам различного типа.

Задача параллельно-конвейерной обработки видеоинформации в многопроцессорных гетерогенных СнК заключается в формировании совокупности программно-аппаратных решений и методики управления ресурсами СнК при реализации конвейера

обработки видеоинформации. Способ распределения ресурсов СнК представляет собой соответствие задач из очереди и вычислительных узлов, а также моментов времени предоставления требуемых ресурсов. Под методикой управления ресурсами СнК подразумевается совокупность программно-аппаратных решений, используемых при реализации параллельно-конвейерной обработки видеоинформации с целью получения наилучших временных результатов обработки информации. Совокупность программно-аппаратных решений определяется: используемым стеком ПО; технологией параллельно-конвейерной обработки данных; алгоритмом запуска и балансировки задач; алгоритмом синхронизации многопоточных процессов.

В качестве критериев эффективности обработки видеоинформации используются такие показатели, как минимум среднего времени обработки задания $t_з$; минимум среднего времени на запуск задания $t_{зап}$; минимум среднего времени на синхронизацию многопоточных процессов $t_{синх}$.

Специфика задач обработки видеоинформации налагает ряд ограничений: суммарное время обработки задания, включая затраты на запуск и синхронизацию, не должно превышать 33 мс в случае, если частота поступления кадров равна 30 кадр/с, и 16 мс при частоте 60 кадр/с. Предположим, что накладные расходы на запуск заданий не должны быть более 3 % от суммарного времени, а накладные расходы на синхронизацию – 1 % от суммарного времени. Исходя из этого, целевая функция определяется следующими условиями:

$$\begin{gathered} T(t_з, t_{зап}, t_{синх}) \to \min, \\ T < \begin{cases} 33 \text{ мс при } F_f = 30 \text{ кадр/с}, \\ 16 \text{ мс при } F_f = 60 \text{ кадр/с}, \end{cases} \\ t_{синх} < 0,01T, \\ t_{зап} < 0,03T. \end{gathered} \quad (1)$$

Таким образом, разработка методики организации параллельно-конвейерной обработки видеоинформации сводится к решению следующих задач:

- анализ способов использования проблемно ориентированных ядер для решения поставленной задачи;
- анализ существующих программных моделей для вычислительных систем и их адаптация на гетерогенные СнК;
- анализ и разработка алгоритмов синхронизации многопоточных процессов;
- анализ производительности на примере системы распознавания лиц.

Применение проблемно ориентированных ядер для решения задач видеообработки. Последовательность обработки видеоинформации зависит от источника исходных данных и приемника обработанной информации. Типовая схема процесса обработки видеоинформации состоит из трех этапов (рис.1).

На первом этапе при приеме видеокадров по сети Ethernet или из памяти проводится их декодирование с помощью видеокодека [2]. Если источником видеоинформации является камера, то выполняется предобработка данных с целью коррекции шума и дефектных пикселей, подстройки яркости, контрастности и т.д. На втором этапе осуществляется аналитическая обработка видеокадра для выделения объектов или признаков на кадре (например, распознавание лиц, прогнозирование событий). На третьем этапе выполняется кодирование кадра, вывод результатов обработки на экран или анализ результатов в системах более высокого уровня. Перечисленные этапы могут выполняться

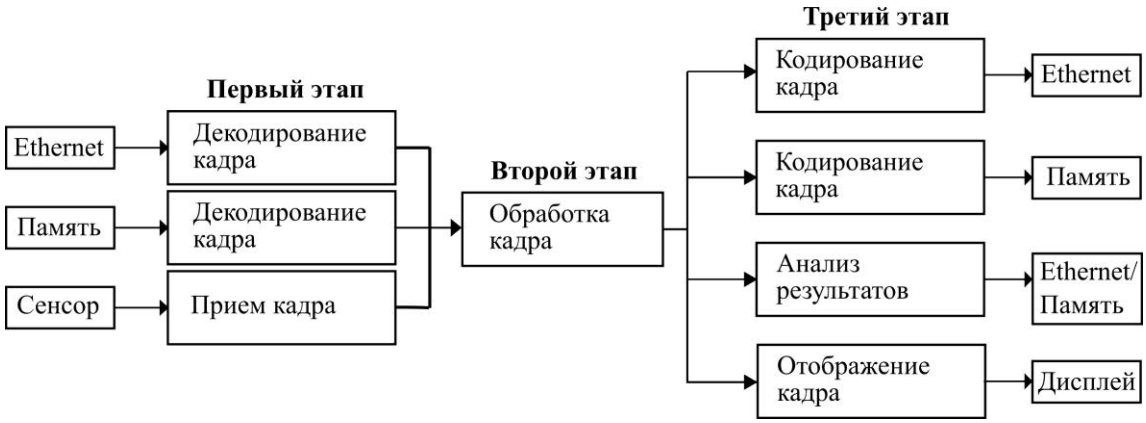


Рис.1. Типовая схема процесса обработки видеоинформации
Fig.1. Typical diagram of the video information processing

как на одном, так и на нескольких вычислительных узлах. В последнем случае можно говорить о конвейерной обработке данных, когда результаты обработки этапа одного вычислительного узла передаются в качестве входных данных другому вычислительному узлу для выполнения следующего этапа обработки видеоинформации.

В настоящее время для обработки видеоинформации существует множество специализированных ускорителей, среди которых можно выделить цифровые сигнальные процессоры (DSP), графические процессоры (GPU), процессоры обработки изображений (ISP), процессоры обработки видео (VPU), процессоры видеодисплеев (VDP) и др.

В качестве целевой платформы выбрана СнК серии «Мультикор» (процессор 1892ВМ248), разрабатываемая российской компанией АО НПЦ «ЭЛВИС» [3]. Гетерогенный процессор 1892ВМ248 предназначен для решения задач компьютерного зрения, в состав которого входят вычислительные узлы, приведенные в табл.1. Все устройства в рамках процессора 1892ВМ248 объединены высокопроизводительной сетью на кристалле NoC (Network on Chip) и имеют общую память в качестве разделяемого ресурса.

Таблица 1

Вычислительные узлы процессора 1892ВМ248

Table 1

Computing nodes of 1892VM248 processor

Вычислительный узел	Краткое описание
CPU	Центральный процессор MIPS64r6 I6500, 8 ядер
DSP	Кластер VELcore3 из 16 сигнальных процессоров ELcore-50, 4 TFlops fp32
GPU	Графический процессор PowerVR Dutton, 600 GFlops fp32
ISP	Процессор обработки изображений PowerVR Felix, 4K@60 FPS
Encoder/Decoder	16 потоков 1080p@60 FPS; кодирование HEVC, H.264; декодирование HEVC, H.264, VP8, VP9, MPEG4, MPEG2
Pixel Display Pipeline (PDP)	Процессор вывода кадров на дисплей Chimera, 4K@60 FPS

Наличие вычислительных устройств разного класса в рамках единой гетерогенной системы требует наличия особых многоуровневых программных средств для построения эффективных приложений, которые будут грамотно задействовать все имеющиеся аппаратные ресурсы.

Организация параллельно-конвейерной обработки видеоинформации. Для эффективной реализации конвейерной обработки видеоинформации в процессоре 1892ВМ248 разработана многоуровневая иерархия программных средств (рис.2).

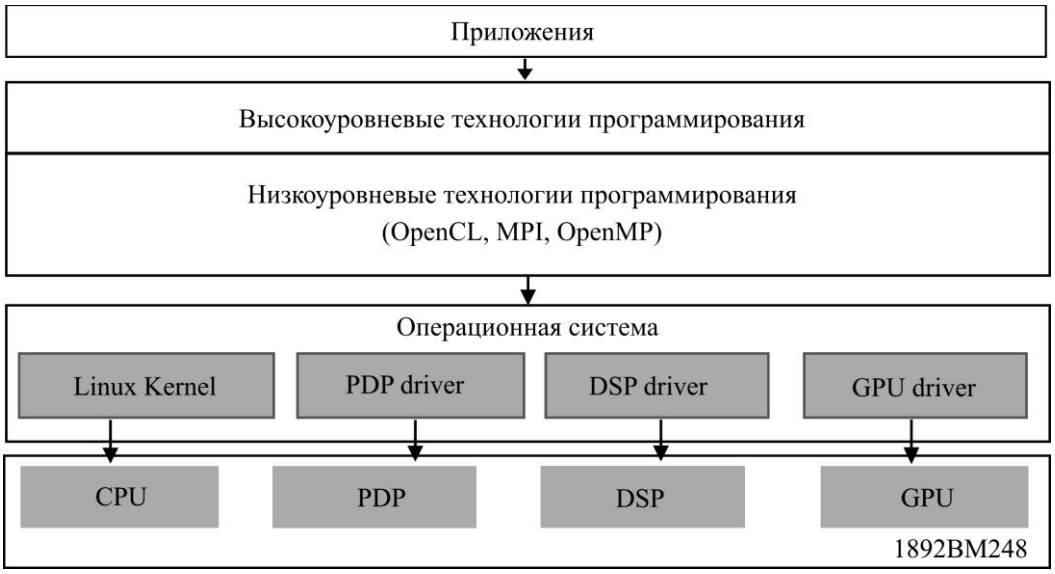


Рис.2. Стек программного обеспечения
Fig.2. Software stack

ОС отвечает за взаимодействие с аппаратным обеспечением процессора 1892ВМ248. Драйверы, являясь частью ОС, реализуют механизм постановки вычислительных задач на процессорные ядра и предоставляют программный интерфейс (API, Application Programming Interface) высокоуровневому ПО. Драйверы реализуют механизм dmabuf [4] во избежание дополнительных копирований данных между различными подсистемами.

Предложена двухуровневая модель программирования с использованием стандартных технологий. Низкоуровневые технологии обеспечивают высокий уровень производительности СнК, но требуют более высокого уровня компетенций разработчика ПО. Высокоуровневые средства имеют высокую гибкость при программировании, что негативно сказывается на производительности. Критериями для сравнительного анализа технологий программирования с целью организации параллельно-конвейерной обработки видеоинформации являются: поддержка крупноблочных, блочных и мелкозернистых алгоритмов; поддержка единого виртуального адресного пространства; наличие механизма управления памятью; универсальность технологии для различных конфигураций СнК; возможность быстрого запуска существующего ПО. В рамках сравнительного анализа рассматриваются технологии OpenMP, MPI, OpenCL и OpenAMP.

OpenMP [5] (Open Multi-Processing) – стандарт директивного программирования для систем с общей памятью. Поддерживает параллелизм на уровне как задач, так и данных, что позволяет реализовывать блочные и мелкозернистые алгоритмы. В стандарте отсутствуют явные механизмы управления памятью.

MPI [6] (Message Passing Interface) – стандарт, описывающий межпроцессное взаимодействие путем отправки сообщений в рамках многопроцессорной системы. Отсутствуют механизмы управления памятью и поддержка единого виртуального адресного пространства. Стандарт не поддерживает параллелизм на уровне данных, поэтому возможна реализация только блочных алгоритмов.

OpenCL [7] (Open Computing Language) – стандарт для гетерогенных вычислений. Поддерживает параллелизм уровня задач и данных, явные механизмы управления памятью и единое адресное пространство, что делает процесс разработки параллельных приложений более гибким, но при этом он существенно усложняется. Универсальность достигается за счет унификации различного класса устройств.

OpenAMP [8] (Open Asymmetric Multi-Processing) – новый стандарт для асимметричных многопроцессорных систем. Он определяет master- и remote-устройства. Устройство master (управляющий процессор асимметричной системы) должен работать под управлением ОС Linux, remote – либо под управлением ОС FreeRTOS, либо без ОС (bare metal). Взаимодействие между master- и remote-устройствами осуществляется с помощью протоколов virtIO и rpmsg. Управление процессами происходит через протокол remoteproc. Стандарт поддерживает параллелизм только на уровне задач, реализация мелкозернистых алгоритмов невозможна. Отсутствуют явные механизмы управления памятью. Стандарт предъявляет ряд требований к аппаратному обеспечению, а именно наличие когерентности памяти, поддержка виртуализации и т.д.

Программирование нескольких вычислительных ядер с моделью общей памяти сводится к синтезу технологий: MPI + OpenCL, OpenMP + OpenCL и OpenCL + OpenMP + MPI. Параллельная обработка в СнК обеспечивается на уровне ядер по MIMD-типу, конвейерная – за счет алгоритмического обеспечения, межпроцессорное взаимодействие строится на уровне MPI-сообщений, включая межпроцессное взаимодействие.

Таким образом, параллельно-конвейерная обработка видеоинформации заключается в следующем:

- определяется назначение системы: встраиваемое решение, сервер для вычисления в составе кластера;
- для встраиваемых решений применяется технология OpenCL-парадигма. CPU-ядра взаимодействуют с вычислительными ядрами (GPU, DSP) с помощью интерфейса OpenCL. Для серверных решений применяется MPI-парадигма для межъядерного и межпроцессорного взаимодействия;
- драйвер ОС, реализующий низкоуровневый интерфейс работы с ускорителями, должен поддерживать управление жизненным циклом заданий (создание, постановка в очередь, запуск, остановка), а также механизмы, позволяющие избегать дополнительных копирований данных между различными подсистемами;
- барьерная синхронизация между вычислительными ядрами выполняется аппаратными средствами, доступ к разделяемым ресурсам (память, порты ввода-вывода) – программно-аппаратными средствами, такими как атомарные операции и спин-блокировка, обеспечивающими высокую скорость работы [9].

Разработанная программная модель, а также стек ПО приняты к реализации в процессоре 1892ВМ248.

Результаты и их обсуждения. Экспериментальное исследование проведено на процессоре 1892ВМ248 при решении задачи распознавания лиц. В качестве вычислительных узлов $S_{в.с}$ использовались четыре DSP-ядра ELcore-50, объединенные в кластер Quelcore, и восьмиядерный CPU MIPS64r6 I6500. Коммуникационная сеть S_k представлена высокопроизводительной сетью на кристалле NoC, которая объединяет все вычислительные узлы $S_{в.с}$. Передача данных между вычислительными узлами S_p выполнялась через общую память и аппаратный блок отправки сообщений. Система на основе процессора 1892ВМ248 является асимметричной, поэтому в качестве системы управления $S_у$ выступает центральный процессор MIPS64r6 из $S_{в.с}$.

Задача распознавания лиц на видеопотоке разбивается на поток подзадач *I*: обнаружение и сопровождение лиц; выравнивание лица; определение черт лица для идентификации и верификации, а также анализ эмоций, возраста и пола. В рамках эксперимента задача статически сбалансирована между четырьмя DSP-ядрами так, чтобы обеспечить максимальную эффективность конвейера. Параллельно-конвейерная схема алгоритмов распознавания лиц представлена на рис.3.

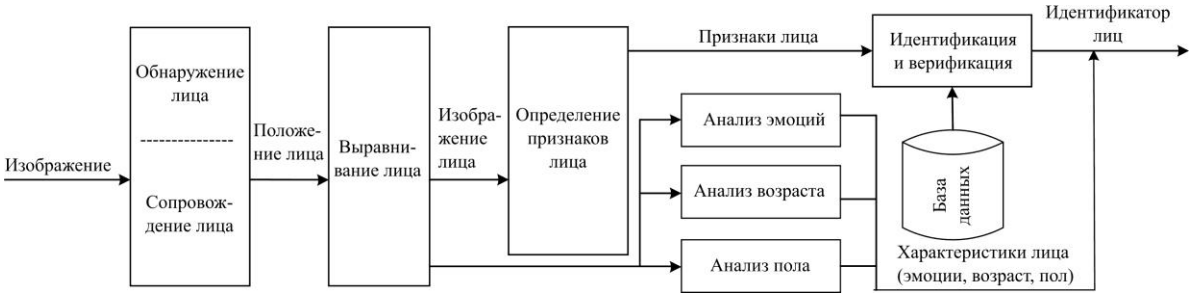


Рис.3. Схема распознавания лиц
Fig.3. Face recognition scheme

Запуск заданий на DSP-ядрах осуществляется с использованием стандарта OpenCL на CPU-ядрах, который реализован поверх драйвера DSP в ОС Linux. Четыре DSP-ядра запускаются одновременно, синхронизация потоков выполняется через примитивы синхронизации. Время (мкс) запуска задания следующее:

Обработка аргументов и ELF-секций задания.....16,7
Настройка виртуального адресного пространства.....15
Загрузка программы в память ..... << 1
Настройка регистров и запуск DSP ..... << 1

Результаты профилирования драйвера показали, что общее время запуска $t_{зап}$ задания не превышает 32 и 128 мкс для одного и четырех DSP-ядер соответственно. Это мало по сравнению с максимальной задержкой, отводимой заданию (33 мс для 30 кадр/с и 16,7 мс для 60 кадр/с).

Алгоритмы распознавания лиц оптимизированы с использованием векторных и VLIW-инструкций DSP, производительность которых приведена в табл.2.

Таблица 2

Производительность задачи распознавания лиц*
на DSP-ядре процессора 1892ВМ248

Table 2

Performance of face recognition job* on the DSP-core of the 1892VM248 processor

Алгоритм	Тип алгоритма	Производительность на 1×DSP, кадр/с
Детектирование лица	Дерево решений	278
Подтверждение наличия лица	Нейронная сеть	33 210
Определение черт лица для идентификации и верификации		168
Анализ эмоций	Нейронная сеть	4232
Анализ возраста		2001
Анализ пола		4022

*Размер кадра составляет 256×384 пикселей.
*Frame dimension is 256×384 pixels.

При использовании статической диспетчеризации задач в зависимости от правил балансировки обрабатывались видеокадры с двух и четырех телекамер с периодом получения результирующей информации 5 и 10 с соответственно. Временные диаграммы обработки представлены на рис.4.

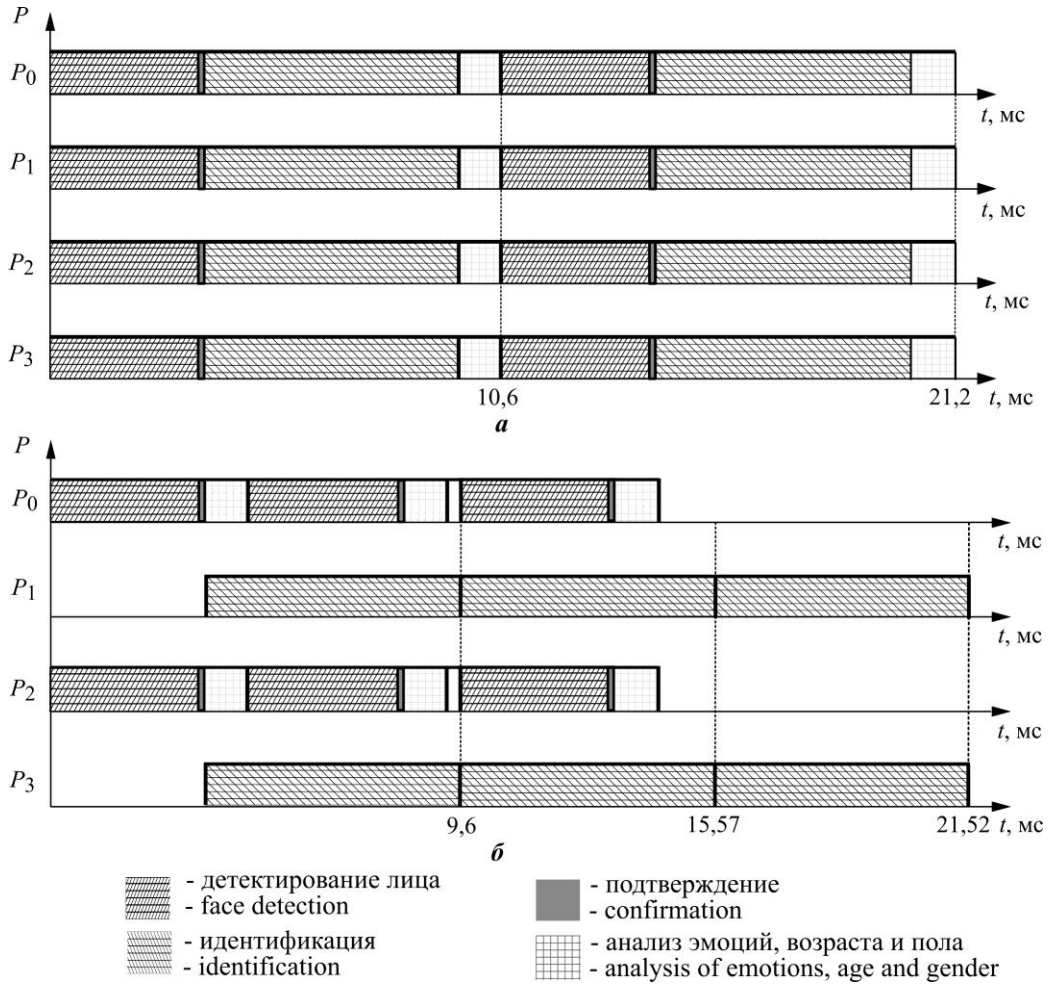


Рис.4. Параллельная обработка четырех потоков видеокадров (*а*) и параллельно-конвейерная обработка двух потоков видеокадров (*б*)
Fig.4. Parallel processing of four streams of video frames (*a*) and parallel-pipeline processing of two streams of video frames (*b*)

Время обработки одного видеокадра t_p определяется выражениями для четырех и двух потоков соответственно:

$$t_p = t_d + t_c + t_i + t_f = 3,59 \text{ мс} + 0,03 \text{ мс} + 5,95 \text{ мс} + 0,98 \text{ мс} \approx 10,6 \text{ мс},$$
$$t_p = t_d + t_c + t_i = 3,59 \text{ мс} + 0,03 \text{ мс} + 5,95 \text{ мс} \approx 9,6 \text{ мс},$$

где t_d – время детектирования лица; t_c – время подтверждения наличия лица; t_i – время идентификации и верификации лица; t_f – время анализа характеристик лица (эмоций, возраста, пола).

При параллельно-конвейерной обработке двух потоков видеокадров (см. рис.4,*б*) время, затраченное на получение характеристик лица, нивелируется и не учитывается в расчете. Период получения информации T для четырех и двух потоков равен соответ-

ственно 10,6 и 5,95 мс. Разная стратегия балансировки задач позволяет адаптировать системы под разные назначения с разным периодом получения информации.

Коэффициент загрузки вычислительного ядра K определяется отношением времени обработки данного вычислительного ядра к общему времени, затраченному всеми процессорными ядрами. В случае четырех потоков – выражением

$$K_{P_i} = \frac{t_{P_i}}{T + t_{\text{зап}}} = \frac{10,6\ \text{мс}}{10,6\ \text{мс} + 0,023\ \text{мс}} \approx 0,998\ (99,8\ \%);$$

в случае двух потоков – выражениями

$$K_{P_0,P_2} = \frac{t_{P_0,P_2}}{T + t_{\text{зап}}} = \frac{t_d + t_c + t_f}{T + t_{\text{зап}}} = \frac{3,59\ \text{мс} + 0,03\ \text{мс} + 0,98\ \text{мс}}{5,95\ \text{мс} + 0,023\ \text{мс}} \approx 0,788\ (78,8\ \%),$$

$$K_{P_1,P_3} = \frac{t_{P_1,P_3}}{T + t_{\text{зап}}} = \frac{t_i}{T + t_{\text{зап}}} = \frac{5,95\ \text{мс}}{5,95\ \text{мс} + 0,023\ \text{мс}} \approx 0,996\ (99,6\ \%),$$

где $t_{\text{зап}}$ – накладные временные задержки, связанные с запуском задач.

Время обработки кадра соответствует заявленным требованиям в выражении (1):

$$T = t_{\text{з}} + t_{\text{зап}} + t_{\text{синх}} \approx 9,6\ \text{мс} + 0,023\ \text{мс} + 0,01\ \text{мс} = 9,633\ \text{мс} < 16\ \text{мс}.$$

Доля накладных расходов на запуск заданий не превышает 3 %:

$$\frac{t_{\text{зап}}}{T} = \frac{0,023\ \text{мс}}{9,633\ \text{мс}} = 0,0024\ (0,24\ \% < 3\ \%).$$

Доля накладных расходов на синхронизацию потоков менее 1 % от T:

$$\frac{t_{\text{синх}}}{T} = \frac{0,01\ \text{мс}}{9,633\ \text{мс}} = 0,001 (0,1\ \% < 1\ \%).$$

Сравнение полученных результатов с мировыми аналогами выполнено на основе анализа производительности нейросетевых алгоритмов (табл.3) и каскадных алгоритмов детектирования лиц. Алгоритм детектирования лиц основан на бинарном дереве решений, вероятность правильного детектирования лиц соответствует 96 % на базе данных FaceScrub [10]. На кадрах с разрешением FullHD достигается производительность 162 и 164 кадр/с на процессорах 1892ВМ248 и Intel XEON GOLD 6140 [11] соответственно.

Таблица 3

Производительность процессоров на нейросетевых алгоритмах, кадр/с

Table 3

Performance of processors on neural network algorithms, files per seconds

Нейросетевой алгоритм	NVIDIA Tesla V100	1892ВМ248, 16 × ELcore-50	2 × Intel Platinum
GoogleNet	5140	942	814
REsNet-50	3308	275	226
VGG-16	2044	109	150

Высокие количественные результаты соответствуют мировому уровню изделий подобного класса и показывают эффективность параллельно-конвейерной обработки видеоинформации на гетерогенной СнК и применимость разработанной методики диспетчеризации задач со статической балансировкой. Задержки драйвера, полученные при практической реализации, незначительны (менее 1 %).

Таким образом, технология OpenCL обеспечивает эффективную конвейерную обработку видеоинформации на основе крупноблочных алгоритмов с параллелизмом по MIMD-типу на гетерогенных серверных процессорах 1892ВМ248. Технология MPI или взаимодействие на основе других сетевых протоколов обеспечивает межпроцессорное взаимодействие.

Заключение. Исследование особенностей задач обработки видеоинформации и использование перспективных аппаратных ускорителей обеспечили эффективную параллельно-конвейерную обработку. Гетерогенные СнК результативно справляются с потоковыми задачами видеообработки.

Сравнительный анализ технологий программирования гетерогенных устройств показывает, что синтез технологий OpenCL и MPI обеспечивает поддержку крупноблочных, блочных и мелкозернистых алгоритмов, позволяет эффективно осуществлять управление памятью. Обе технологии легко адаптируются под различные конфигурации гетерогенных СнК.

Экспериментальное исследование с использованием российского процессора 1892ВМ248 подтвердило высокую эффективность потоковой параллельно-конвейерной обработки видеоинформации на примере задачи распознавания лиц с параллелизмом по MIMD-типу.

Литература

1. Эволюция многоядерных гетерогенных вычислительных систем в области обработки видеоданных / ***А.А. Беляев, С.В. Гаврилов, Д.А. Кузнецов и др.*** // V Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014 (МЭС-2014)»: сб. тр. Ч. IV. / под общ. ред. А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2014. С. 129–134.

2. Comprehensive video codec comparison / ***T. Laude, Y.G. Adhisantoso, J. Voges et al.*** // APSIPA Transactions on Signal and Information Processing. 2019. Vol. 8. e30. DOI: 10.1017/ATSIP.2019.23

3. Официальный сайт АО НПЦ «ЭЛВИС». URL: https://multicore.ru (дата обращения: 19.07.2020).

4. Buffer Sharing and Synchronization. URL: https://www.kernel.org/doc/html/v4.16/driver-api/dma-buf.html (дата обращения: 19.07.2020).

5. OpenMP. URL: https://www.openmp.org/ (дата обращения: 19.07.2020).

6. MPI. URL: https://computing.llnl.gov/tutorials/mpi/ (дата обращения: 19.07.2020).

7. OpenCL. Официальный сайт Khronos group. URL: https://www.khronos.org/opencl/ (дата обращения: 19.07.2020).

8. OpenAMP. URL: https://www.openampproject.org/ (дата обращения: 19.07.2020).

9. ***Янакова Е.С., Мачарадзе Г.Т., Костулин Н.В., Тюрин А.А.*** Решение больших СЛАУ на гетерогенных СнК серии «Мультикор» // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2020. № 1. С. 70–75. DOI: 10.31114/2078-7707-2020-1-70-75

10. База данных лиц FaceScrub. URL: http://megaface.cs.washington.edu/results/facescrub.html (дата обращения: 19.07.2020).

11. Intel Xeon Gold 6140 Processor. Официальный сайт Intel. URL: https://www.intel.in/content/www/in/en/products/processors/xeon/scalable/gold-processors/gold-6140.html (дата обращения: 27.09.2020).

Поступила в редакцию 13.11.2020 г.; после доработки 13.11.2020 г.; принята к публикации 08.02.2021 г.

Янакова Елена Сергеевна – доктор технических наук, профессор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), digitvesper@gmail.com

Мачарадзе Георгий Тамазьевич – аспирант кафедры вычислительных машин, систем и сетей Национального исследовательского университета «МЭИ» (Россия, 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 14), инженер-программист АО НПЦ

«ЭЛВИС» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4922, 4/2), gmacharadze@elvees.com

Гагарина Лариса Геннадьевна – доктор технических наук, профессор, директор Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), gagar@bk.ru

Швачко Артем Андреевич – ведущий инженер-программист АО НПЦ «ЭЛВИС» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, проезд 4922, 4/2), ashvachko@elvees.com

References

1. Belyaev A.A., Gavrilov V.S., Kuznetsov D.A., Petrichkovich Ya.Ya., Solokhina T.V., Frolov D.S., Funkner A.A. Evolution in the area of multicore heterogeneous video data processing systems. *Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference «Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development». Collection of works. Part IV. Ed. By A.L. Stempkovsky*. Moscow, IPPM RAN Publ., 2014, pp. 129–134. (in Russian).

2. Laude T., Adhisantoso Y.G., Voges J., Munderloh M., Ostermann J.A. Comprehensive video codec comparison. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 2019, vol. 8, e30. DOI: 10.1017/ATSIP.2019.23.

3. *Official site of R&D Center ELVEES.* Available at: https://multicore.ru (accessed: 19.07.2020).

4. *Buffer sharing and synchronization.* Available at: https://www.kernel.org/doc/html/v4.16/driver-api/dma-buf.html (accessed: 19.07.2020).

5. *OpenMP.* Available at: https://www.openmp.org/ (accessed: 19.07.2020).

6. *MPI.* Available at: https://computing.llnl.gov/tutorials/mpi/ (accessed: 19.07.2020).

7. *OpenCL.* Official site of Khronosgroup. Available at: https://www.khronos.org/opencl/ (accessed: 19.07.2020).

8. *OpenAMP.* Available at: https://www.openampproject.org/ (accessed: 19.07.2020).

9. Yanakova E.S., Macharadze G.T., Kostulin N.V., Tiurin A.A. Solving large SLE on heterogeneous SOC of «Multicore» series. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh system = Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development*, 2020, iss. 1, pp. 70–75. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31114/2078-7707-2020-1-70-75

10. *MegaFace. FaceScrub Results.* Available at: http://megaface.cs.washington.edu/results/facescrub.html (accessed: 19.07.2020).

11. *Intel Xeon Gold 6140 Processor. Official site of Intel*. Available at: https://www.intel.in/content/www/in/en/products/processors/xeon/scalable/gold-processors/gold-6140.html (accessed: 27.09.2020).

Received 13.11.2020; Revised 13.11.2020; Accepted 08.02.2021.

Information about the authors:

Elena S. Yanakova – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of Institute of Systems and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), digitvesper@gmail.com

Georgij T. Macharadze – PhD student of the Computing Machines, Systems and Networks Department, National Research University «MPEI» (Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14), Software-Engineer JSC SPC «ELVEES» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, proezd 4922, 4/2), gmacharadze@elvees.com

Larisa G. Gagarina – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of Institute of Systems and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gagar@bk.ru

Artem A. Shvachko – Leading Software-Engineer, JSC SPC «ELVEES» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, proezd 4922, 4/2), ashvachko@elvees.com

УДК 004.021:004.421:004.932 DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-184-196

Методы и алгоритмы шумоочистки звука в реальном времени

И.Э. Вишняков[1], М.М. Масягин[1], О.А. Одинцов[1], В.В. Слюсарь[2]

[1]Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия
[2]Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

vslyusar@mail.ru

Методы и алгоритмы шумоочистки голоса применяются как для предобработки речи с целью ее дальнейшего анализа и распознавания, так и для непосредственного улучшения качества связи между пользователями информационных сетей. Наиболее важное и сложное направление – потоковая шумоочистка звука в реальном времени. Возможность обработки потоковых данных без задержек налагает на алгоритм ряд существенных ограничений: он не может быть итеративным с заранее неизвестным числом итераций и не может явно использовать данные, находящиеся до или после текущего обрабатываемого блока. В работе предложены адаптивные методы и алгоритмы шумоподавления для речи, работающие с минимальными задержками передачи сигнала. Исследованы существующие подходы к шумоочистке звука в реальном времени, особое внимание уделено алгоритмам детектирования шума и подавления шума. На их базе построены и проанализированы алгоритмы, удовлетворяющие поставленным требованиям. Создан набор аудиоданных русской речи с наложенными на нее различными шумами. Проведены тестирование предложенных решений и их сравнение с существующими актуальными методами шумоочистки. Предложенные методы и алгоритмы шумоочистки звука без использования специализированных аппаратных средств и вспомогательной информации работают в режиме реального времени. Тестирование разработанных алгоритмов с помощью метрик сегментного отношения зашумленного сигнала к шуму и PESQ показало высокую эффективность разработки и ее преимущество перед распространенными реализациями шумоочистки Speex и WebRTC по качеству шумоочистки и скорости работы.

Ключевые слова: алгоритм шумоподавления; винеровская фильтрация; априорное отношение сигнал/шум; апостериорное отношение сигнал/шум; речевой сигнал

Для цитирования: Вишняков И.Э., Масягин М.М., Одинцов О.А., Слюсарь В.В. Методы и алгоритмы шумоочистки звука в реальном времени // Изв. вузов. Электроника. 2021. Т. 26. № 2. С. 184–196. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-184-196

© И.Э. Вишняков, М.М. Масягин, О.А. Одинцов, В.В. Слюсарь, 2021

Methods and Algorithms for Real Time Voice Noise Cleaning

I.E. Vishnyakov[1], M.M. Masyagin[1], O.A. Odintsov[1], V.V. Sliusar[2]

[1]Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia
[2]National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

Abstract: The voice cleaning methods and algorithms play a key role both in preprocessing speech for further analysis and recognition, and in improving the quality of communication between users of information networks. The real-time streaming noise cleaning methods are the most important and complex area. The ability to process streaming data without delays imposes a number of significant restrictions on the algorithm: it cannot be iterative with a previously unknown number of iterations, and cannot explicitly use the data before or after the current block being processed. In the work, a modern adaptive noise reduction method for speech that can work with minimal signal transmission delays has been proposed. A large-scale study of existing approaches has been conducted, with special attention paid to two groups of algorithms: noise detection algorithms and noise suppression algorithms. Based on them the developed algorithm meeting the specified requirements has been built and analyzed. A set of audio data of Russian speech with various noises superimposed on it has been created. The testing of the algorithm has been made and its comparison with existing actual noise cleaning methods has been performed. The proposed adaptive method of noise cleaning without using specialized apparatus means and subsidiary information is able to operate in the real time conditions. The testing of the developed algorithm using the metrics of segment NC and PESQ have shown the high efficiency of the development and its superiority to common noise cleaning implementations Speex and WebRTC with respect to the noise cleaning quality and operation speed.

Keywords: noise reduction algorithm; Wiener filtering; a priori signal-to-noise ratio; a posteriori signal-to-noise ratio; speech signal

For citation: Vishnyakov I.E., Masyagin M.M., Odintsov O.A., Sliusar V.V. Methods and algorithms for real time voice noise cleaning. *Proc. Univ. Electronics*, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 184–196. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-2-184-196

Введение. Широкое использование телекоммуникационных и информационных сетей стимулирует разработку алгоритмов цифровой обработки сигналов, в частности алгоритмов цифровой обработки звука. Это связано с тем, что одним из основных видов данных, передаваемых по мобильным сетям и сетям интернет, является речь.

На сегодняшний день активно развиваются следующие направления цифровой обработки звука голоса: транскрибирование – перевод речи в текст; диаризация – разделение исходного аудиопотока на отдельные аудиопотоки по дикторам и распознавание дикторов; определение языка речи; определение эмоциональной окраски речи.

Для упрощения работы данных высокоуровневых алгоритмов анализа и распознавания речи, а также для улучшения качества связи между конечными абонентами голосовой связи исходный звук подвергается предобработке – шумоочистке. В настоящее время существует несколько классов методов шумоочистки и шумоподавления, однако

все они имеют недостатки. Производительных и хорошо описанных методов шумоочистки голоса для систем реального времени (СРВ), налагающих на используемые в них алгоритмы ряд существенных ограничений, недостаточно. Так, применение полосовых фильтров и гейтов [1], удовлетворяющих требованиям СРВ касательно времени отклика алгоритма и предсказуемости его работы, оказывается бесполезным при изменяющихся во времени виде и направлении шума, а наиболее эффективные современные нейросетевые подходы [2, 3] либо вносят в работу СРВ большую задержку, либо требуют специфичного дорогостоящего оборудования и (или) вспомогательных данных. Компромиссным решением, обеспечивающим приемлемые скорость и качество шумоочистки, является разработка алгоритмов фильтрации, предполагающих, что сигналы шума и голоса некоррелированны. Обычно такие алгоритмы состоят из двух частей: детектора шума и его непосредственного подавителя.

Цель настоящей работы – разработка набора новых адаптивных методов и алгоритмов шумоподавления для речи на основе наиболее эффективных алгоритмов детектирования и подавления шума.

Формализация понятия шумоочистки. Дадим формальные определения понятий «речь», «шум» и «процесс шумоочистки» в терминах цифровой обработки сигналов (ЦОС):

- речь – полезный сигнал $f_1(t)$, поступающий на вход линейной системы *Denoise*;

- шум – аддитивный сигнал-помеха $f_2(t)$, поступающий на вход линейной системы *Denoise*;

- процесс шумоочистки – линейная система *Denoise*, выполняющая следующее преобразование:

$$f_1(t) + f_2(t) \to f_1(t). \tag{1}$$

Как показывает практика, создание систем, в точности удовлетворяющих формуле (1), – невыполнимая задача, поэтому часто задачу шумоочистки упрощают. Окончательное описание процесса шумоподавления представим следующей формулой:

$$f_1(t) + f_2(t) \to f_3(t) \simeq f_1(t),$$

где $f_3(t)$ – сигнал, являющийся приближением сигнала $f_1(t)$.

Отметим, что использование алгоритма шумоподавления в СРВ налагает на него следующее существенное ограничение: алгоритм должен обрабатывать звуковые данные блочно-последовательно, внося в них задержку, остающуюся комфортной для слушателей. Исследования показывают, что максимально допустимая задержка составляет менее 400 мс [4].

Анализ существующих методов шумоочистки звука. Пусть имеется линейная система (в терминах ЦОС), на вход которой подаются два сигнала, задаваемые следующими формулами:

$$f_1(t) = a(t), \quad f_2(t) = a(t) + b(t),$$

где $f_1(t)$ и $f_2(t)$ – входные сигналы; $a(t)$ – шумовой сигнал; $b(t)$ – речевой сигнал.

Очевидным способом подавления шума в силу линейности системы является непосредственное вычитание сигнала $f_1(t)$ из сигнала $f_2(t)$. На данном принципе с некоторыми ограничениями основаны все мультимикрофонные системы шумоподавления,

используемые в современных мобильных телефонах и студиях профессиональной звукозаписи [5, 6].

В распространенных аудиовизуальных методах шумоочистки и звука для улучшения качества речи используются не только непосредственная аудиозапись, но и видеозапись говорящих [3, 7]. Большинство аудиовизуальных методов состоит из двух взаимодействующих между собой блоков: отслеживания и шумоочистки. Первый занимается поиском лиц людей и отслеживанием движений их губ, второй – непосредственно шумоочисткой. Мультимикрофонные и аудиовизуальные методы обеспечивают хорошее качество шумоочистки, однако имеют один существенный недостаток: для работы им требуется дополнительная информация (опорный канал или видеозапись), что бывает недоступно. В рамках данной работы рассматривается только задача шумоочистки звука для одномикрофонных систем без вспомогательных данных.

Для шумоочистки также используются фильтры нижних и верхних частот. Фильтры нижних частот пропускают частоты ниже пороговой отметки, фильтры высоких частот – частоты выше пороговой отметки. Также существуют их комбинации – полосовые и режекторные фильтры. Первые пропускают частоты в определенном диапазоне, а вторые – вне его. Полосовые фильтры эффективны при шумоочистке в одном канале, однако они не могут удалять шумы, находящиеся в том же частотном диапазоне, что и голос. Также они не подходят для удаления нестационарных шумов. Для борьбы с ними необходимо использовать специально разработанные адаптивные алгоритмы, общий принцип работы которых схематично представлен на рис.1.

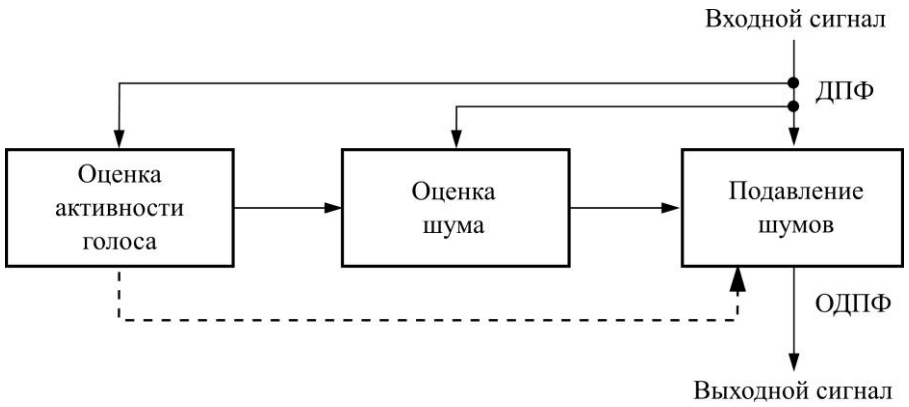


Рис.1. Обобщенная схема работы алгоритмов шумоочистки звука
Fig.1. Typical noise cleaning algorithm diagram

Вначале входной поток данных обрабатывается блочно-последовательно с перекрытием и применением оконных функций алгоритмом дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Затем в амплитудно-частотной области оценивается активность голоса, а именно каждому блоку данных ставится бинарная оценка: 0 – если голос отсутствует, 1 – если голос присутствует. Алгоритмы оценки голосовой активности применяются в телефонии, так как позволяют снизить расход энергии при передаче голосового трафика. Затем оценивается спектр шума и его непосредственное подавление. Финальный этап работы – обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ), переводящее сигнал обратно во временную область. Отметим, что не все описанные этапы обязательны. Один из этапов оценки может быть исключен, этапы могут быть объединены. Например, существуют алгоритмы непрерывной оценки шума, не нуждающиеся в предварительной оценке активности голоса.

Таким образом, некоторым стандартом в области шумоочистки в реальном времени являются алгоритмические адаптивные методы шумоочистки. Это, например, алгоритмы, использующиеся в кодеке Speex и его библиотеке предобработки звука SpeexDSP [8], а также в системе потоковой передачи аудио- и видеоданных WebRTC [9].

Разработка методов и алгоритмов шумоочистки звука. На сегодняшний день наиболее активно используются две реализации алгоритмов шумоочистки: Speex (SpeexDSP) и WebRTC. Для оценки спектра шума в Speex применяется вероятностный алгоритм Кохена – Бердуго MCRA (Minima-Controlled Recursive Averaging) [10], а для непосредственного подавления полученного спектра шума – алгоритм Эфраима – Малаха [11]. В WebRTC для детектирования шума осуществляется квантильное оценивание, а для шумоподавления – классическая винеровская фильтрация.

Исследования методов непосредственной шумоочистки [12] и методов детектирования шума [13] показали, что существует ряд алгоритмов, работающих не хуже, а нередко и эффективнее тех, которые используются в Speex и WebRTC. Так, для детектирования шума может применяться дальнейшее развитие MCRA – разработка Рангачари – Лойзю MCRA2 [14], а для непосредственного шумоподавления – одна из современных модификаций винеровской фильтрации [15–17].

Объединим детектор MCRA2 и методы шумоподавления, описанные в [15–17], и опишем принципы их работы.

Пусть входной сигнал обрабатывается алгоритмом БПФ с 50 %-ным перекрытием и, например, оконной функцией Ханна, задаваемой следующей формулой:

$$win(n) = 0,5(1-\cos(\frac{2\pi n}{N-1})), \quad n \in [0...N-1],$$

где N – размер окна.

В начале работы MCRA2 (как и MCRA) выполняется рекурсивное сглаживание входного спектра мощности. Оно необходимо для подавления малых локальных минимумов и максимумов спектра мощности:

$$P(\lambda,k) = \alpha_{sm} P(\lambda-1,k) + (1,0-\alpha_{sm}) P(\lambda,k), \qquad (2)$$

где $P(\lambda,k)$ и $P(\lambda-1,k)$ – спектр мощности текущей и предыдущей сглаженной полосы с номером k; $\alpha_{sm} \in [0,7;\ 0,9]$ – коэффициент сглаживания.

Далее осуществляется поиск минимумов энергии в полосах спектра. В отличие от MCRA, производящего поиск в коротких окнах (0,4–1 с), MCRA2 выполняет непрерывный поиск минимумов. Данный процесс может быть описан следующей формулой:

$$P_{\min}(\lambda,k) = \begin{cases} P(\lambda,k), P_{\min}(\lambda-1,k) \geq P(\lambda,k), \\ \gamma P_{\min}(\lambda-1,k) + \dfrac{1-\gamma}{1-\beta}(P(\lambda,k) - \beta P(\lambda-1,k)), else, \end{cases}$$

где $P_{\min}(\lambda,k)$ и $P_{\min}(\lambda-1,k)$ – спектры минимумов мощностей текущей и предыдущей полосы с номером k; $\gamma \in (0,0;\ 1,0)$ – весовой параметр новых полос; $\beta \in (0,0;\ 1,0)$ – коэффициент, отвечающий за скорость адаптации алгоритма к меняющемуся шуму; *else*.

На основании текущих значений мощности и минимума мощности может быть проведена приблизительная оценка апостериорного отношения зашумленного сигнала к шуму (ОСШ). На ее основе осуществляется бинарная оценка наличия речи в данной полосе:

$$S_{pp}(\lambda,k)=\begin{cases}1,0 \;\text{ при }\; \dfrac{P(\lambda,k)}{P_{\min}(\lambda-1,k)}>\delta,\\ 0,0 \;\text{ при }\; else,\end{cases}$$

где $S_{pp}(\lambda,k)$ – вероятность наличия речи в текущей полосе с номером k; δ – пороговое значение апостериорного ОСШ для разделения наличия речи и ее отсутствия. MCRA использует фиксированное значение δ, в то время как MCRA2 предлагает использовать различные значения δ для разных полос: малые δ – для полос с высокой вероятностью наличия речи (0–3000 Гц) и большие для остальных.

Бинарная оценка наличия речи в полосе $S_{pp}(\lambda,k)$ является слишком грубой, поэтому она сглаживается по формуле, аналогичной (2). При этом вместо текущего и предыдущего спектров мощности используются текущая и предыдущая вероятности наличия речи, вместо коэффициента α_{sm} – коэффициент α_{spp}. На основе сглаженной вероятности наличия речи в полосе вычисляется финальный параметр сглаживания текущего спектра шума и происходит итоговая оценка спектра шума:

$$\alpha_k=\alpha+(1,0-\alpha)S_{pp}(\lambda,k),$$
$$P_{noise}(\lambda,k)=\alpha_k P_{noise}(\lambda-1,k)+(1,0-\alpha_k)P(\lambda,k),$$

где α_k – финальный параметр сглаживания; α – весовой коэффициент сглаживания; $P_{noise}(\lambda,k)$ – полученный спектр шума.

Для упрощения описания алгоритмов непосредственной шумоочистки формализуем понятия апостериорного, априорного и мгновенного ОСШ с учетом того, что в процессе шумоочистки доступны только оценки спектров шума и речи:

$$SNR_{post}(\lambda,k)=\frac{P(\lambda,k)}{E(P_{noise}(\lambda,k))},$$
$$SNR_{prio}(\lambda,k)=\frac{E(P_{speech}(\lambda,k))}{E(P_{noise}(\lambda,k))},$$
$$SNR_{inst}(\lambda,k)=SNR_{post}(\lambda,k)-1,$$

где $E(P_{noise}(\lambda,k))$ – оценка спектра.

При наличии спектра мощности зашумленного сигнала и оценки спектра мощности шума можно рассчитать апостериорное и мгновенное ОСШ, однако нет возможности вычислить априорное ОСШ. При этом именно оно играет ключевую роль в процессе шумоочистки. Несмотря на отсутствие возможности явного вычисления априорного ОСШ, его оценка может быть получена на основе следующего предположения: так как входной поток данных обрабатывается сверхкороткими окнами с высокой степенью перекрытия, то голос в двух окнах с перекрытием можно считать квазистационарным, т.е. не меняющим свои характеристики во времени. В таком случае оценка текущего априорного ОСШ может быть осуществлена с использованием метода, предложенного Эфраимом – Малахом [11]:

$$SNR_{prio}(\lambda,k)=\beta\frac{P_{speech}(\lambda-1,k)}{P_{noise}(\lambda,k)}+(1-\beta)\cdot\max(SNR_{inst}(\lambda,k),\delta),$$

где β – весовой коэффициент, отвечающий за скорость адаптации к изменению ОСШ; $\delta \geq 0$ – нижняя граница $SNR_{inst}(\lambda,k)$, предотвращающая дальнейшие искажения сигнала при фильтрации при низких (отрицательных) уровнях мгновенного ОСШ.

Имея оценку текущего априорного ОСШ, можно построить на ее базе следующий фильтр, являющийся по сути типичным примером винеровской фильтрации:

$$G_w(\lambda,k) = \frac{SNR_{prio}(\lambda,k)}{SNR_{prio}(\lambda,k)+1}, \tag{3}$$

где $G_w(\lambda,k), k \in [0, N-1]$ – импульсная характеристика фильтра.

Таким образом, фильтрация сводится к следующей формуле: $A_{speech} = G_w A$ (алгоритм Скалара). Алгоритм Скалара показал высокую эффективность в исследовании [13]. Предпринимались различные попытки его усовершенствования. Одна из наиболее удачных доработок предложена самим Скаларом в соавторстве с Плапусом [16]. Они заметили, что полученное оценочное значение априорного ОСШ отстает от реального примерно на половину окна, поэтому в базовый алгоритм может быть добавлена процедура переоценки априорного ОСШ:

$$SNR_{prio2}(\lambda,k) = \frac{(G_w A)^2}{E(P_{noise}(\lambda,k))} = \frac{A^2_{speech}}{E(P_{noise}(\lambda,k))},$$

где $SNR_{prio2}(\lambda,k)$ – новая оценка априорного ОСШ.

На основании новой оценки априорного ОСШ может быть получена и новая функция фильтрации. Без ограничения общности она может вычисляться по формуле (3), в которой SNR_{prio} заменен на SNR_{prio2}. В таком случае итоговый спектр речи можно получить в виде $A_{speech2} = G_{w2} A_{speech}$. Также улучшением базового алгоритма Скалара может считаться алгоритм Шифенга [17]. Его подход в целом совпадает с подходом Скалара – Плапуса, но при этом уменьшает искажения, вносимые фильтрацией в речевой сигнал. Рассчитаем ошибку между реальным чистым голосом и его оценкой, проводимой оригинальным алгоритмом Скалара:

$$Err(\lambda,k) = A_{speech}(\lambda,k) - A_{realspeech}(\lambda,k) = G_w(\lambda,k)A - A_{realspeech} =$$
$$= G_w(\lambda,k)(A_{realspeech} + A_{noise}) - A_{realspeech} = (G_w(\lambda,k)-1)A_{realspeech} + G_w(\lambda,k)A_{noise}, \tag{4}$$

где $Err(\lambda,k)$ – ошибка, характеризующая схожесть реального голоса и его приближения.

Левая часть формулы (4) отвечает за искажение речи, поэтому она может быть удалена из оценки путем прямого вычитания:

$$A_{speech1} = A_{speech} - (G_w(\lambda,k)-1)A_{realspeech}.$$

Так как спектр чистого голоса неизвестен, его следует заменить оценкой A_{speech}. В таком случае оценка спектра речи оригинального алгоритма Скалара и итоговая оценка априорного ОСШ в его модификации примут следующий вид:

$$A_{speech1}(\lambda,k) = A_{speech} - (G_w(\lambda,k)-1)A_{realspeech} = 1A_{speech} - (G_w(\lambda,k)-1)A_{speech} =$$
$$= (1-(G_w(\lambda,k)-1))A_{speech} = (2-G_w(\lambda,k))A_{speech} = (2-G_w(\lambda,k))G_w(\lambda,k)A,$$
$$SNR_{prio2}(\lambda,k) = \frac{A^2_{speech1}}{E(P_{noise}(\lambda,k))}.$$

Описанные алгоритмы детектирования шума и непосредственной шумоочистки характеризуются линейной асимптотической сложностью относительно размера входного блока данных. Это объясняется тем, что каждый входной массив мощностей звука обрабатывается поэлементно, причем каждый отдельный элемент обрабатывается без использования циклов.

Полученные алгоритмы шумоочистки звука состоят из следующих четырех этапов:

1. Прямое БПФ с 50 %-ным перекрытием и оконной функцией Ханна.
2. Детектирование шума с использованием алгоритма MCRA2.
3. Подавление шума одним из трех описанных методов.
4. Обратное БПФ с учетом 50 %-ного перекрытия.

Более наглядно процесс работы алгоритмов шумоочистки звука представлен на рис.2.

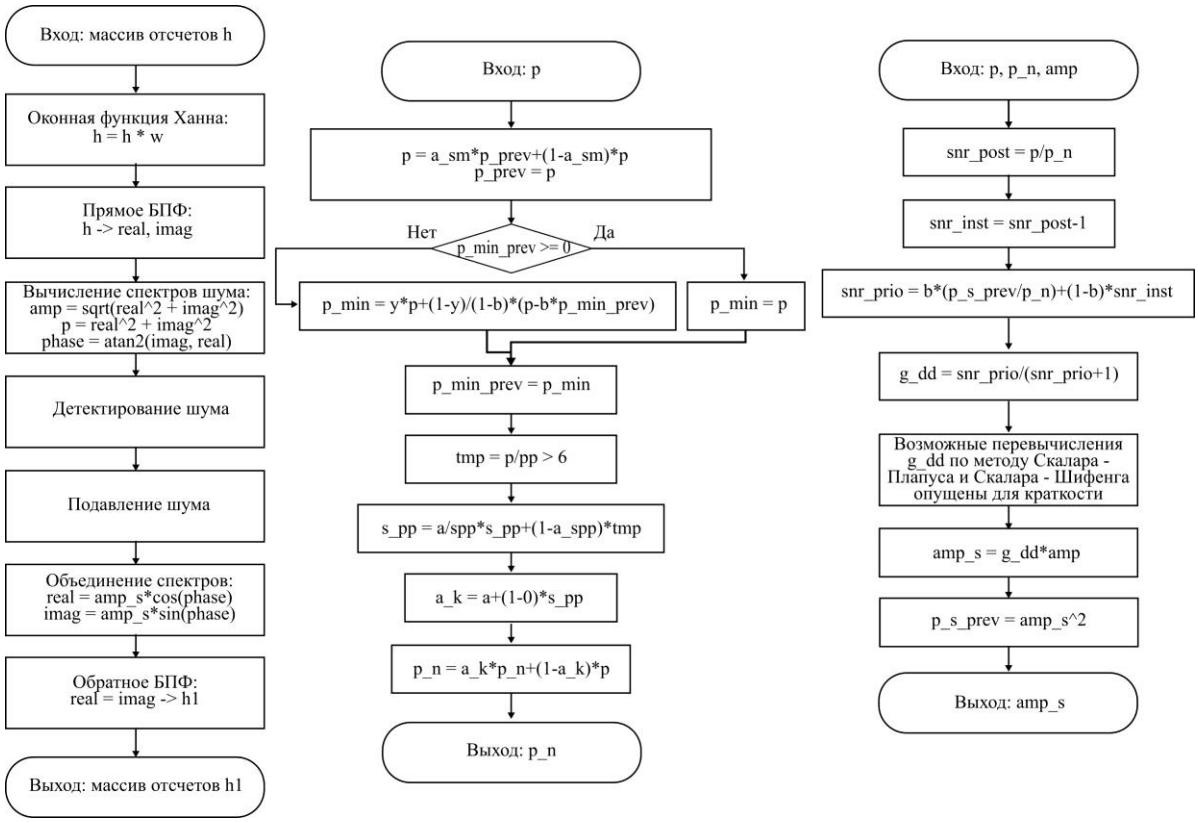


Рис.2. Схемы работы алгоритмов шумоочистки звука
Fig.2. Schemes of operation of noise cleaning algorithms

Суммарная асимптотическая сложность алгоритмов шумоочистки звука складывается из асимптотических сложностей всех четырех этапов и является квазилинейной:

$$O_{A\lg} = O_{FFT} + O_{MCRA2} + O_{Den} + O_{iFFT} = O(n\log(n)) + O(n) + O(n) + O(n\log(n)) = O(n\log(n)),$$

где $O_{A\lg}$ – вычислительная сложность всего алгоритма шумоочистки, O_{FFT} – прямого БПФ, O_{MCRA2} – алгоритма детектирования шума MCRA2, O_{Den} – алгоритма подавления шума, O_{iFFT} – обратного БПФ; $O(n\log(n))$ – асимптотически точная сложность алгоритмов шумоочистки, так как время их работы зависит только от размерности входного массива, но не от конкретных его элементов.

Реализация библиотеки шумоочистки звука. При реализации библиотеки шумоочистки ставились следующие цели:

- возможность работы в режиме реального времени с минимальной задержкой входных данных;
- потокобезопасность и защищенность от ошибок, связанных с нехваткой выделяемой памяти;
- легкая переносимость на различные платформы и возможность использования из разных языков программирования;
- простота чтения и модификации исходного кода библиотеки программистами, не являющимися ее непосредственными авторами или экспертами в сфере ЦОС;
- отсутствие каких-либо внешних зависимостей, обычно не поставляемых вместе с минимальным образом операционной системы.

Данные цели привели к тому, что библиотека шумоочистки звука реализована на языке C без каких-либо сторонних зависимостей, кроме стандартной glibc [18]. Библиотека предоставляет простой программный интерфейс, состоящий из трех основных функций:

- int push(ctx_t ctx, const char*data, unsigned data_len); – функция записи аудиоданных и их шумоочистки;
- unsigned get(ctx_t ctx, char*data, unsigned data_cap); – функция чтения аудиоданных;
- void flush(ctx_t ctx); – функция сброса внутреннего счетчика для получения необработанных фреймов.

Тестирование алгоритмов шумоочистки звука. Классической метрикой качества шумоочистки является среднесегментное ОСШ всей речи, вычисляемое по следующей формуле:

$$SNR_{seg} = \left[\sum_{i=1}^{N} 10 \log_{10} \left(\frac{P_{realspeechi}}{| P_{realspeechi} - P_{speechi} |} \right) \right] N^{-1}.$$

При этом размер сегмента составляет около 20–30 мс.

Помимо среднесегментного ОСШ использовалась психоакустическая метрика PESQ [19], позволяющая более объективно оценить качество шумоочистки. Для тестирования алгоритмов шумоочистки создан собственный набор тестовых данных, состоящий из чистых записей русской речи и шумов из базы данных ZvukiPro [20]. Использовано множество видов шума, включая белый и розовый шумы, шум дороги, шум в общественных местах и т.д., и несколько различных вариантов чистой речи.

На рис.3 представлены результаты тестирования предложенных решений и их сравнение с реализациями Speex и WebRTC по метрикам PESQ и сегментного ОСШ соответственно. Тестирование проводилось на мобильной рабочей станции, оборудованной процессором Intel Core i7-7700HQ и 8 Гб оперативной памяти DDR4, под управлением операционной системы Ubuntu 18.04.5 LTS (Bionic Beaver). При этом все тестовые записи имели частоту дискретизации 8 кГц, так как PESQ поддерживает только ее.

Результаты показывают, что предложенные алгоритмы шумоподавления более эффективны, чем SpeexDSP, и сравнимы с WebRTC. При удалении белого шума – основного шума в телефонии – они результативнее WebRTC. Скорость работы предложенных алгоритмов в среднем практически в два раза выше, чем скорость Speex, и в три раза ниже, чем скорость WebRTC.

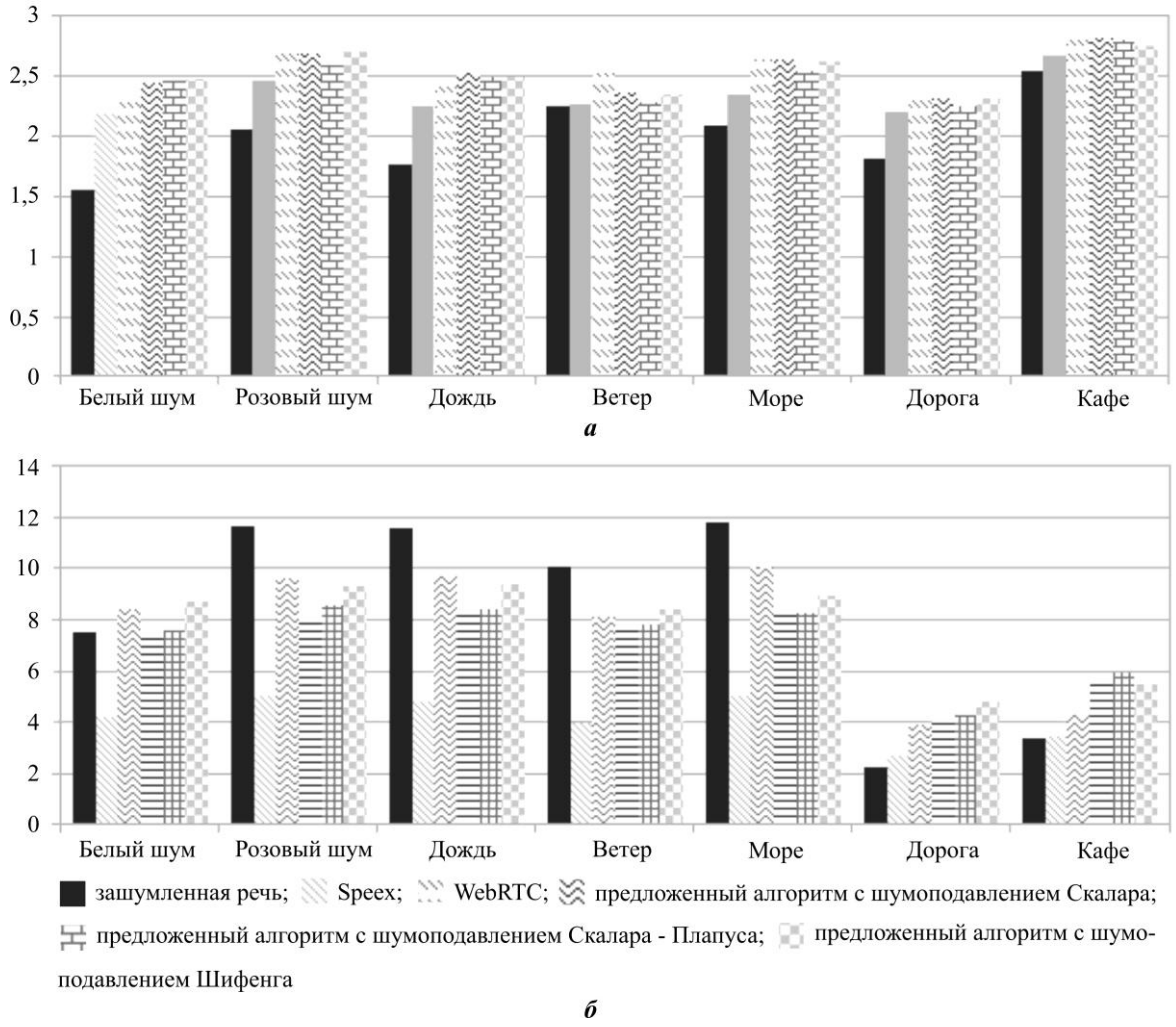


Рис.3. Значения PESQ (*а*) и сегментного ОСШ (*б*) для методов шумоочистки звука
Fig.3. PESQ values (*a*) and segmented signal-to-noise ratio (*b*) for noise cleaning methods

Отметим, что WebRTC работает напрямую с частотами дискретизации 8 и 16 кГц и с частотами 32 и 48 кГц при использовании вспомогательных банков фильтров (также входящих в состав WebRTC), остальные частоты им не поддерживаются. Для адаптации WebRTC под частоты 11,025; 44,1; 96 кГц и более без использования времязатратной промежуточной передискретизации с потерей данных могут потребоваться значительные усилия. Предложенные алгоритмы могут работать с произвольными частотами дискретизации, при этом число обрабатываемых за шаг отсчетов $n = \frac{2\,sr}{100}$, где sr – частота дискретизации. Помимо этого из оценки асимптотической сложности алгоритма следует, что значительную долю времени работы шумоочистки занимают прямое и обратное БПФ. Самописные наглядные реализации БПФ могут быть заменены на более производительные, тем самым суммарная скорость работы алгоритмов увеличится в несколько раз и будет сравнима со скоростью WebRTC.

В таблице приведены результаты тестирования предложенных и существующих алгоритмов шумоочистки звука.

Результаты тестирования предложенных и существующих алгоритмов шумоочистки звука
Results of testing of the proposed and existing algorithms for voice noise cleaning

Алгоритм	Эффективность шумоочистки	Скорость работы	Универсальность
Speex	Низкая	6×	Произвольные число каналов и частоты дискретизации
WebRTC	Высокая	×	Произвольное число каналов, 4 фиксированные частоты дискретизации
Предложенные	Высокая	3×	Произвольные число каналов и частоты дискретизации

Заключение. Предложенные универсальные адаптивные методы шумоочистки звука базируются на наиболее эффективных современных алгоритмах детектирования и подавления шума. Разработанные алгоритмы могут работать без использования специализированных аппаратных средств и вспомогательной информации в режиме реального времени. Все алгоритмы реализованы на языке C без применения внешних зависимостей.

Тестирование с помощью метрик сегментного ОСШ и PESQ показало их высокую эффективность и превосходство над распространенными реализациями шумоочистки Speex и WebRTC по качеству шумоочистки и сравнимую с ними скорость работы.

Литература

1. ***Lukin A.S.*** AES San Francisco 2008: Tutorial T3. Broadband noise reduction: theory and application // Aes.org: [Web] / Audio Engineering Society. October 2–5, 2008.
URL: https://www.aes.org/events/125/tutorials/session.cfm?code=T3 (accessed 31.03.2021).

2. ***Pascual S., Bonafonte S., Serra J.*** SEGAN: speech enhancement generative adversarial network // Interspeech 2017. Stockholm: ISCA, 2017. P. 3642–3646.

3. ***Gabbay A., Shamir A., Peleg Sh.*** Visual speech enhancement // The Hebrew University of Jerusalem. 2018. P. 1170–1174.

4. ***Schoenenberg K., Raake A., Koeppe J.*** Why are you so slow? Misattribution of transmission delay to attributes of the conversation partner at the far-end // International Journal of Human-Computer Studies. 2014. Vol. 72. Issue 5: May. P. 477–487.

5. ***Burnett G.C.*** Noise suppressing multi-microphone headset // The Journal of the Acoustical Society of America. 2013. No. 133. P. 4352.

6. ***Doclo S.*** Multi-microphone noise reduction and dereverberation techniques for speech applications: PhD Diss. Katholieke Universiteit Leuven, 2003. 50 p.

7. ***Khan F., Milner B.P.*** Speaker separation using virtually-derived binary masks // Auditory-Visual Speech Processing. Annecy: ISCA, 2013. P. 215–220.

8. Speex [Электронный ресурс]. URL: https://www.speex.org/ (дата обращения 20.05.2020).

9. WebRTC [Электронный ресурс]. URL: https://webrtc.org/ (дата обращения 20.05.2020).

10. ***Cohen I., Berdugo B.*** Speech enhancement for non-stationary noise environments // Signal Processing. 2001. Vol. 81. No. 11. P. 2403–2418.

11. ***Ephraim Y., Malah D.*** Speech enhancement using minimum mean-square error log-spectral amplitude estimator // IEEE Transactions on acoustics, Speech and Signal Processing. 1985. P. 443–445.

12. ***Shrawankar U., Thakare V.*** Performance analysis of noise filters and speech enhancement techniques in adverse mixed noisy environment for HCI // International Journal of Research and Reviews in Computer Science. 2012. No. 3. P. 1817–1825.

13. ***Loizou P.*** Speech enhancement. Theory and practice. 2nd ed. CRC Press, 2013. 705 p.

14. ***Rangachari S. Loizou P.A.*** Noise estimation algorithm for highly nonstationary environments // Speech Communications. 2006. Vol. 48. No. 2. P. 220–231.

15. ***Scalart P., Filho J.V.*** Speech enhancement based on a priori signal to noise estimation // 1996 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Atlanta, GA: IEEE, 1996. Vol. 2. P. 629–632.

16. ***Plapous C., Marro C., Mauuary L., Scalart P.*** A two-step noise reduction technique // 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Montreal: IEEE, 2004. Vol. 1. P. 289–292.

17. ***Shifeng O., Chao G., Ying G.*** Improved a priori SNR estimation for speech enhancement incorporating speech distortion component // TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 2013. Vol. 11 (9). P. 5359–5364.

18. glibc // Операционная система GNU: [Электронный ресурс] / Free Software Foundation. URL: https://www.gnu.org/software/libc/ (дата обращения 26.05.2020).

19. ***Rix A., Beerends J., Hollier M., Hekstra A.P.*** Perceptual evaluation of speech quality (PESQ) // 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Salt Lake City, UT: IEEE, 2001. P. 1–4.

20. ZvukiPro [Электронный ресурс]. URL: https://zvukipro.com/ (дата обращения 26.05.2020).

Поступила в редакцию 26.11.2020 г.; после доработки 20.01.2021 г.; принята к публикации 08.02.2021 г.

Вишняков Игорь Эдуардович – старший преподаватель кафедры ИУ9 «Теоретическая информатика и компьютерные технологии» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета) (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1), vishnykov@bmstu.ru

Масягин Михаил Михайлович – магистрант кафедры ФН-12 «Математическое моделирование» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета) (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1), masyaginmm@bmstu.ru

Одинцов Олег Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры РК5 «Прикладная механика» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета) (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1), odintsov@bmstu.ru

Слюсарь Валентин Викторович – кандидат технических наук, доцент Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), vslyusar@mail.ru

References

1. Lukin A.S. AES San Francisco 2008: Tutorial T3. Broadband noise reduction: theory and application. *Aes.org.* Available at: https://www.aes.org/events/125/tutorials/session.cfm?code=T3 (accessed 31.03.2021).

2. Pascual S., Bonafonte S., Serra J. SEGAN: speech enhancement generative adversarial network. *Interspeech 2017*. Stockholm, ISCA, 2017, pp. 3642–3646.

3. Gabbay A., Shamir A., Peleg Sh. Visual speech enhancement. *The Hebrew University of Jerusalem*, 2018, pp. 1170–1174.

4. Schoenenberg K., Raake A., Koeppe J. Why are you so slow? Misattribution of transmission delay to attributes of the conversation partner at the far-end. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2014, vol. 72 (5): May, pp. 477–487.

5. Burnett G.C. Noise suppressing multi-microphone headset. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, no. 133, p. 4352.

6. Doclo S. *Multi-microphone noise reduction and dereverberation techniques for speech applications*: PhD Diss. Katholieke Universiteit Leuven, 2003. 50 p.

7. Khan F., Milner B.P. Speaker separation using virtually-derived binary masks. *Auditory-Visual Speech Processing.* Annecy, ISCA, 2013, pp. 215–220.

8. *Speex.* Available at: https://www.speex.org/ (accessed 20.05.2020).

9. *WebRTC.* Available at: https://webrtc.org/ (accessed 20.05.2020).

10. Cohen I., Berdugo B. Speech enhancement for non-stationary noise environments. *Signal Processing*, 2001, vol. 81, no. 11, pp. 2403–2418.

11. Ephraim Y., Malah D. Speech enhancement using minimum mean-square error log-spectral amplitude estimator. *IEEE Transactions on acoustics, Speech and Signal Processing*, 1985, pp. 443–445.

12. Shrawankar U., Thakare V. Performance analysis of noise filters and speech enhancement techniques in adverse mixed noisy environment for HCI. *International Journal of Research and Reviews in Computer Science*, 2012, no. 3, pp. 1817–1825.

13. Loizou P. *Speech enhancement. Theory and practice*. 2nd ed. CRC Press, 2013. 705 p.

14. Rangachari S. Loizou P.A. Noise estimation algorithm for highly nonstationary environments. *Speech Communications*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 220–231.

15. Scalart P., Filho J.V. Speech enhancement based on a priori signal to noise estimation. *1996 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* Atlanta, GA, IEEE, 1996, vol. 2, pp. 629–632.

16. Plapous C., Marro C., Mauuary L., Scalart P. A two-step noise reduction technique. *2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing.* Montreal, IEEE, 2004, vol. 1, pp. 289–292.

17. Shifeng O., Chao G., Ying G. Improved a priori SNR estimation for speech enhancement incorporating speech distortion component. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2013, vol. 11 (9), pp. 5359–5364.

18. The GNU C Library. *Gnu.org.* Available at: https://www.gnu.org/software/libc/ (accessed 26.05.2020).

19. Rix A., Beerends J., Hollier M., Hekstra A.P. Perceptual evaluation of speech quality (PESQ) // 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Salt Lake City, UT: IEEE, 2001. P. 1–4.

20. *ZvukiPro.* Available at: https://zvukipro.com/ (accessed 26.05.2020).

Received 26.11.2020; Revised 20.01.2021; Accepted 08.02.2021.

Information about the authors:

Igor E. Vishnyakov – Senior Lecturer of the Computer Science and Control Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (Russia, Moscow, 105005, 2nd Baumanskaya st., 5, bld. 1), vishnykov@bmstu.ru

Mikhail M. Masyagin – Master's degree student of the Fundamental Sciences Department, Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (Russia, Moscow, 105005, 2nd Baumanskaya st., 5, bld. 1), masyaginmm@bmstu.ru

Oleg A. Odintsov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Applied Mechanics Department, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), (Russia, Moscow, 105005, 2nd Baumanskaya st., 5, bld. 1), odintsov@bmstu.ru

Valentin V. Sliusar – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Systems and Software Engineering and Information Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), vslyusar@mail.ru

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

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2020 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: http://ivuz-e.ru

КОНФЕРЕНЦИИ

Об итогах 5-й Научно-практической конференции «Интеллектуальные системы и микросистемная техника-2021»

С 3 по 9 февраля 2021 г. в поселке Эльбрус (Кабардино-Балкарская Республика, Россия) состоялась 5-я Научно-практическая конференция «Интеллектуальные системы и микросистемная техника-2021». Организаторы конференции – Национальный исследовательский университет «МИЭТ» и Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова.

Основная цель конференции – обмен опытом в области интеллектуальных технологий, применяющихся для создания измерительных и контрольных средств в космической технике, робототехнике, автомобильной промышленности, машиностроении, медицине, городском хозяйстве, астрономии, охране окружающей среды, в целях информатизации экономики и совершенствования практики управления.

В работе конференции приняли участие студенты, аспиранты, научные сотрудники таких университетов и предприятий России и СНГ, как Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (г. Москва), Казахский национальный университет им. аль-Фараби (г. Алматы), Кабардино-Балкарский научный центр РАН (г. Нальчик), ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет» им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик), Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Университет ИТМО (г. Санкт-Петербург), Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), АО «НИИ молекулярной электроники» (г. Москва), АО «Ижевский радиозавод» (г. Москва), АО «НИИМА «Прогресс» (г. Москва), АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», АО «Эксис» (г. Москва), НПК «Технологический центр» (г. Москва), Воронежский государственный университет, НПО «ГОИ им. С.И. Вавилова» (г. Санкт-Петербург).

На конференции были представлены результаты теоретических и практических исследований, затрагивающих вопросы разработки и изготовления МЭМС-датчиков, создания микроэлектронных устройств на основе интегральных схем, в том числе СВЧ-диапазона, использования новых материалов для микроэлектроники, построения автоматизированных систем управления. Также рассматривались проблемы обучения студентов и специалистов в научно-технической сфере.

Ученые из МИЭТ и АО «Ижевский радиозавод» в совместной работе продемонстрировали базовые принципы проектирования субтерагерцового приемника, показали возможность реализации автомобильного радара, работающего на ближних дистанциях, на основе SiGe-кристалла, представили модели радиочастотных смесителя и генератора на основе технологии SiGe для реализации будущих приемо-передающих устройств.

Сотрудники МИЭТ и АО «НИИ молекулярной электроники» рассмотрели аспекты проектирования индуктора для малошумящего усилителя LTE-диапазона частот для использования в приемопере-

датчике NB-IoT, представили моделирование и анализ многослойного КМОП 90-нм индуктора номиналом 7 нГн в частотном диапазоне 0,5–3,5 ГГц, привели соотношение моделей, полученных в результате электромагнитной симуляции с помощью различных математических алгоритмов и данных SPICE-моделирования.

Исследователи из МИЭТ и Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова проанализировали технологические аспекты формирования полупроводниковых наноструктур методом инконгруэнтного испарения пленок, предложили модель роста наноструктур островкового типа на основе полупроводниковых соединений при направленном смещении фазовых равновесий путем инконгруэнтного испарения двухкомпонентных пленок в системах с легколетучим компонентом.

Сотрудники Института нано- и микросистемной техники (МИЭТ) обсуждали вопросы создания оптического стенда для интерференционного контроля оптоволоконного датчика вибраций с высокой точностью измерений до 22 нм, описали получение простого датчика вибраций на основе оптического волокна с использованием лазера, фотодиода и сплиттера. В другой работе представили разработанную конструкцию чувствительного элемента микромеханического акселерометра, привели результаты моделирования, а также исследований зависимости бокового подтрава кремния от точности углового совмещения маски с кристаллографической осью пластины.

Лучшие доклады рекомендованы Оргкомитетом для публикации в сборнике трудов конференции, который будет размещен в системе РИНЦ.

В.В. Калугин,
д.т.н., проф. Института нано- и микросистемной техники МИЭТ

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

(Правила оформления рукописей действуют с 1 июля 2019 г.)

Внимание! Введены новые требования к выполнению рисунков.

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ! Статьи принимаются в редакцию только при наличии лицензионного договора о передаче авторского права. Статьи, рекомендованные для публикации в журналах Semiconductors и Russian Microelectronics, необходимо также сопровождать договорами о передаче авторского права.

Научно-технический журнал **«Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА»** публикует **на русском и английском языках** оригинальные и обзорные (заказные) статьи. В центре внимания журнала – актуальные проблемы электроники. Термин «электроника» включает в себя микро-, нано-, опто- и акустоэлектронику, фотонику, вакуумную и СВЧ-электронику и др. Освещаются физические, технологические и схемотехнические аспекты этих направлений электроники.

Основные рубрики:

- **фундаментальные исследования;**
- **материалы электроники;**
- **технологические процессы и маршруты;**
- **элементы интегральной электроники;**
- **схемотехника и проектирование;**
- **микро- и наносистемная техника;**
- **интегральные радиоэлектронные устройства;**
- **биомедицинская электроника;**
- **информационно-коммуникационные технологии;**
- **проблемы высшего образования.**

В редакцию представляются:

1. Текст статьи, включая аннотации, рисунки, таблицы, библиографический список, список авторов и сведения о них, подготовленный на компьютере и распечатанный на лазерном принтере на белой бумаге формата А4 с четким и ясным шрифтом ***в 2-х экземплярах.***
2. Электронный вариант статьи для верстки, подготовленный на IBM PC в формате MS Word for Windows.
3. Экспертное заключение, рекомендация кафедры, сопроводительное письмо на официальном бланке (для сторонних организаций).
4. Лицензионный договор о передаче авторского права в 2-х экземплярах. Форму лицензионного договора можно найти по ссылке: http://ivuz-e.ru/authors/

Статья должна быть подписана всеми авторами.

Ориентировочный объем публикаций: для статьи 12 страниц текста и 5 рисунков, для краткого сообщения не более 4 страниц текста и 2 рисунка.

Статья должна содержать введение, основную часть, заключение.

Первая страница статьи оформляется следующим образом: индекс УДК; название статьи; инициалы, фамилия автора; название учреждения, где выполнена работа; e-mail; аннотация на русском языке, ключевые слова. Далее следует текст статьи. Статья должна быть пронумерована насквозь.

Аннотация:

Аннотация должна быть структурирована и содержать: обоснование проблемы (введение); методы исследования; результаты; заключение. Рекомендуемый объем: 150–200 слов.

Аннотации должны быть распечатаны на отдельных страницах:

- на английском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы;
- на русском языке с названием статьи, инициалами и фамилией автора и местом работы.

После аннотаций необходимо дать ***ключевые слова*** на русском и английском языках.

В электронном варианте аннотации на английском и русском языках оформляются в виде отдельных текстовых файлов.

Текст:

- печатается ***через два интервала*** с размером шрифта не меньше стандартного машинописного (13 кегль, Times New Roman);

- абзацы отделяются друг от друга одним маркером конца абзаца, ширина отступа (0,75 см) устанавливается в меню Word Формат/Абзац; набор текста начинается с левого края; по правому краю текст не выравнивается; текст набирается без переносов.

Формулы:

Для набора формул в MS Word используется MathType 6.0. Установки редактора формул Styles/Sizes (Стили/Размеры) только ***по умолчанию.*** Пронумерованные формулы (нумеруются только те, на которые ссылаются в тексте) выносятся отдельной строкой и располагаются по центру.

Иллюстрации:

1. Векторные рисунки представляются в формате файла *.SVG (версии 1.1). Для выполнения иллюстраций рекомендуется использовать свободно распространяемый векторный редактор Inkscape 0.92 (официальный сайт https://inkscape.org). Текст и линии на рисунке должны быть редактируемыми (текст не «в кривых»).

2. **Использование MS Word не допускается.**

3. Фотографии могут быть представлены в градациях серого на матовой бумаге (предпочтительно формата 9×12 см).

Каждый рисунок должен быть представлен в отдельном файле. Формат рисунков не должен превышать 15×22 см. Рисунки должны быть упомянуты в тексте, пронумерованы и надписаны (на обороте каждого рисунка разборчиво написать порядковый номер, ФИО автора).

Подрисуночные подписи (на русском и английском языках) прилагаются на отдельном листе.

Таблицы должны быть обязательно упомянуты в тексте и иметь заголовки (на русском и английском языках).

Библиографический список:

- оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5–2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»; должен содержать не менее 10 названий (в обзорных (заказных) статьях – не более 50 названий); ссылки в тексте даются в квадратных скобках: [1];

- нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок в тексте;

- русскоязычные источники должны быть переведены на английский язык.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Список авторов и сведения о них:

- оформляется отдельным файлом;

- необходимо указать: фамилию, имя, отчество полностью; ученую степень, ученое звание, должность, место работы, служебный адрес (на русском и английском языках), служебный телефон, e-mail;

- указать автора, ответственного за прохождение статьи, для аспирантов – научного руководителя.

Плата за публикацию статей не взимается.

Статьи направлять по адресу: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, МИЭТ, редакция журнала «Известия вузов. Электроника», комн. 7231.

Тел.: 8-499-734-62-05

E-mail: magazine@miee.ru

http://ivuz-e.ru

4th International Conference on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT '2021)

27-29 October 2021
Corfu, Greece

The conference is the fourth of a series of annual International Conferences on Microelectronic Devices and Technologies (MicDAT) held in Barcelona (Spain), 2018, in Amsterdam (The Netherlands), 2019 and in virtual format, 2020 organized by IFSA. The MicDAT' 2021 conference is intended to create awareness of the huge potential of modern microelectronic technologies and to improve u nderstanding on the recent challenges in a wide range of applications. The many different technological bases for the fabrication of microelectronic devices, SoC, SiP, MEMS and NEMS will be outlined in this 3-day conference.

The aim of MicDAT series of conference is to provide an annual world forum for the presentation and discussion of recent advances in microelectronics, and bring together leading international researchers, engineers and practitioners interested on any of the microelectronics related technologies.

Topics of interests:

- Analog, digital, mixed, and RF circuits and related design methodologies
- Analog-to-Digital Converters (ADC)
- Voltage-to-Frequency Converts (VFC)
- Frequency-to-Digital Converters (FDC)
- Time-to-Digital Converters (TDC)
- Semiconductor Devices: physics and technology
- Circuit Theory and Applications
- Active and Passive Electronic Components
- Logic, architectural, and system level synthesis
- Nonlinear circuits
- Microprocessors, microcontrollers and DSPs
- Testing, design for testability, built-in self-test
- Area, power, and thermal analysis and design
- Mixed-domain simulation and design
- Embedded systems, low-power designs
- VLSI Circuit and Systems design
- Non-von Neumann computing and related technologies and circuits
- Design and test of high complexity systems integration
- SoC, MPSoC, NoC, SIP, and NIP design and test
- Process technologies, CMOS, BJT, BiCMOS, GaAs
- 3-D integration design and analysis
- Emerging device technologies and circuits, such as FinFETs, SETs, spintronics, SFQ, MTJ, etc.
- Design for Manufacturability/Technology Optimization/Yield & Quality
- Microelectronics processing and materials
- Semiconductor processing
- Modern electronics materials
- Solid-state electronics
- Quantum electronics
- Thin solid films
- Nanoprocessing, nanotechnology and nanofabrication
- Nanoelectronics and Spintronics
- Flexible and stretchable electronics
- MEMS, MOEMS and NEMS
- Computer-Aided Design (CAD) of Integrated Circuits
- Hardware/software co-design
- Algorithms, methods and tools for modeling, simulation, synthesis and verification of ICs
- Electronic materials science and technology
- Electronics Cooling and Thermal Control
- Optoelectronics
- Organic electronic materials and devices
- Microelectronics reliability and qualification
- Assembly and Packaging

Contribution Types: Keynote and invited presentations; Industrial presentations; Regular papers; Posters.

Special Sessions: Authors are welcome to organize and manage special sessions during the conference. Each session will contain 4-6 papers in a related field as specified above or proposed by a session organizer.

Session organizers will get: Certificate of Appreciation; Free Registration for the Event; Special Publishing Theme within Conference Proceedings; Free article and book chapter post conference publications in appropriate open access journals and 'Advances in Microelectronics: Reviews', Book Series, Vol. 3.

Deadlines:

Submission (2-page extended abstract):	**20 June 2021**
Notification of acceptance:	**15 July 2021**
Registration:	**20 September 2021**
Camera ready (4-6 page paper):	**10 October 2021**

More details are available on the conference web site: **https://micdat-conference.com/**



X Юбилейная Всероссийская с международным участием научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2021)

Очередная X Юбилейная Всероссийская с международным участием конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» (МЭС-2021) проводится с марта по ноябрь 2021 г. в виде интернет-форума с заседаниями научных секций разной тематической направленности в онлайн-режиме. Прием докладов осуществляется ***с 1 марта по 1 августа 2021 г.***

Конференция завершится проведением очного пленарного заседания, а также работой секции «Презентации новых микроэлектронных проектов, САПР и готовых продуктов», на которой партнеры и спонсоры конференции представят доклады о своих разработках.

Организаторы конференции: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, Казенное предприятие города Москвы «Корпорация развития Зеленограда».

Оператор конференции: Межрегиональная общественная организация «Московское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова».

Учредители конференции: Российская академия наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Российский фонд фундаментальных исследований, Правительство г. Москвы, Префектура Зеленоградского АО г. Москвы, ОА «Концерн радиостроения «Вега», МИРЭА – Российский технологический университет, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Южный федеральный университет, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Официальные партнеры и спонсоры: Фонд «Сколково», Фонд инфраструктурных и образовательных программ Роснано, фирма Intel, АО «ПКК Миландр», АО «Мегратек» и другие организации.

Конференция МЭС-2021 посвящена актуальным вопросам автоматизации проектирования микроэлектронных систем, систем на кристалле, сложнофункциональных блоков и новой элементной базы микро- и наноэлектроники.

Принятые доклады будут опубликованы на сайте конференции, а также в четырех выпусках трудов конференции. Будут проведены конкурсы на лучшие доклады с призами для победителей.

Сборник трудов конференции МЭС 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.

Более подробную информацию о конференции можно получить на сайте: **http://www.mes-conference.ru**