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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

PROCEEDINGS OF UNIVERSITIES. ELECTRONICS

Том 25 | Vol. 25
№ 4 | No. 4
июль - август | July - August
2020

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 «Газеты, журналы»
АО Агентство «Роспечать»
в любом почтовом отделении

Подписной индекс 47570

по прямой подписке в АО Агентство «Роспечать»:
www.press.rosp.ru

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 25, № 4, 2020
июль – август

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.
Выходит 6 раз в год

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

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

Редакционная коллегия:

Гаврилов Сергей Александрович – заместитель главного редактора, д.т.н., проф., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-2967-272X
Бахтин Александр Александрович – канд.т.н., доц., МИЭТ (Москва, Россия), ORCID: 0000-0002-1107-0878
Беневоленский Сергей Борисович – д.т.н., проф., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт – Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы» (Москва, Россия), ORCID: 0000-0003-3177-9136
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., ООО «Центр плазменных и вакуумных технологий» (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", 2020
© МИЭТ, 2020

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 13.08.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Цифровая печать.
Объем 10,695 усл.печ.л., 9,664 уч.-изд.л. Тираж 150 экз. Заказ № 10. 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 Агентства «Роспечать» – 47570

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

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

Лавров И.В. Метод прогнозирования эффективной проводимости текстурированных поликристаллов с учетом межкристаллитных промежутков..... 299

Схемотехника и проектирование

Иванников А.Д., Стемпковский А.Л. Формализация выбора отладочных тестов при проектировании цифровых микроэлектронных систем на основе проверки выполнения требуемых функций..... 310
Белов Е.Н., Швец А.В. Стохастическая оптимизация RLC-модели вывода корпуса с целью увеличения ее достоверности на высоких частотах..... 320
Кулакова А.А., Лукьяненко Е.Б. Мемристорная логика в цифровой схемотехнике..... 330
Рябцев В.Г., Волобуев С.В. Встроенные средства саморемонта оперативной памяти системы на кристалле..... 339

Интегральные радиоэлектронные устройства

Кудж С.А., Кондратенко В.С., Кадомкин В.В., Высоканов А.А. Анализ эффективности теплоотвода в тепловыделяющих устройствах при использовании различных термоинтерфейсов..... 347
Сергеев А.И., Захаров В.В., Волкова О.В. Стабилизация температуры теплового химического источника тока для увеличения временного ресурса работы..... 358

Информационно-коммуникационные технологии

Лисовец Ю.П., Романова Е.Л., Вай Ян Мин. Подготовка базы данных для автоматизированного контрольно-пропускного пункта на режимный объект..... 367
Петров Е.Н. Разработка программного модуля отбора функций признаков на основе генетического алгоритма..... 374

К сведению авторов..... 383

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



Proceedings of Universities.
ELECTRONICS
Volume 25, No. 4, 2020
July – August
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., SMS «Optolink» (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., LLC «Center for Plasma and Vacuum Technologies» (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., CJS Company «Sinopsis, 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", 2020
© MIET, 2020

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 13.08.2020. Sheet size 60×84 1/8. Digital printing. Conventional printed sheets 10,695. Number of copies 150. Order no. 10. 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 of Agency Rospechat – 47570

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

CONTENTS

Fundamental researches

Lavrov I.V. Method of Predicting Effective Conductivity of Textured Polycrystals Taking into Account Intergranular Gaps..... 299

Circuit engineering and design

Ivannikov A.D., Stempkovskiy A.L. Formal Choice of Debugging Tests for Digital Microelectronic Systems Designs Based on the Required Functions Fulfillment Checking 310
Belov E.N., Shvets A.V. Stochastic Optimization RLC-Model of IC Package Pin to Increase Its Veracity at High Frequencies..... 320
Kulakova A.A., Lukyanenko E.B. Memristor Logic in Digital Circuitry..... 330
Ryabtsev V.G., Volobuev S.V. Built-in Self-Repair Tools of System Memory on a Chip..... 339

Integrated radioelectronic devices

Kudzh S.A., Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Visokanov A.A. Analysis of Efficiency of Heat Dissipation in Heat-Generating Devices Using Various Thermal Interfaces..... 347
Sergeev A.I., Zakharov V.V., Volkova O.V. Stabilizing of Temperature of Thermal Chemical Current Source for the Increase of Temporal Resource of Work..... 358

Information-communication technologies

Lisovec U.P., Romanova E.L., Wai Yan Min. Preparing a Database for an Automated Checkpoint at a Sensitive Area..... 367
Petrov E.N. GA-Based Feature Selection Software Module Development..... 374

Instructions for authors..... 383

УДК 621.315.5:537.311/312 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-299-309

Метод прогнозирования эффективной проводимости текстурированных поликристаллов с учетом межкристаллитных промежутков

И.В. Лавров

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

iglavr@mail.ru

В реальных поликристаллах кристаллиты отделены друг от друга межзеренным пространством, оказывающим влияние на эффективную проводимость поликристалла. Это влияние тем больше, чем меньше размеры кристаллов. В работе разработан метод прогнозирования эффективной проводимости поликристаллических сред, который учитывает наличие межзеренного пространства. Для построения метода принята модель поликристалла, в которой кристаллиты считаются неоднородными, состоящими из однородного кристаллического анизотропного ядра и однородной изотропной оболочки. В данной модели роль межкристаллитных промежутков играют оболочки кристаллитов. Для вычисления эффективной проводимости поликристалла использовано обобщенное приближение эффективного поля, в качестве параметра среды сравнения принята эффективная проводимость среды, т.е. использован метод самосогласованного решения. На основе разработанного метода для случая сферических кристаллитов со сферической оболочкой получена формула для эффективной проводимости поликристалла в зависимости от тензора проводимости кристаллического ядра, проводимости оболочки и объемной доли ядра в кристаллитах. Данная формула применяется для частных случаев поликристаллической среды, а именно для поликристалла с однотипными кристаллитами с изотропным ядром, в этом случае выражение для эффективной проводимости совпадает с классической формулой Максвелла – Гарнетта; поликристалла с однотипными кристаллитами с анизотропными ядрами при одинаковой ориентации их кристаллографических осей; поликристалла с однотипными кристаллитами с анизотропными ядрами при равномерном распределении ориентаций их кристаллографических осей в пространстве; поликристалла с проводящими ядрами кристаллитов и абсолютно непроводящими оболоч-

© И.В. Лавров, 2020

ками. В последнем случае эффективная проводимость поликристалла обращается в нуль, что полностью согласуется с физическим смыслом.

Ключевые слова: эффективная проводимость; поликристалл; кристаллит; ядро; оболочка; анизотропный; межкристаллитные промежутки; обобщенное приближение эффективного поля; метод самосогласования

Для цитирования: Лавров И.В. Метод прогнозирования эффективной проводимости текстурированных поликристаллов с учетом межкристаллитных промежутков // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 299–309. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-299-309

Финансирование работы: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-08-00111-а).

Method of Predicting Effective Conductivity of Textured Polycrystals Taking into Account Intergranular Gaps

I.V. Lavrov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

iglavr@mail.ru

Abstract: In real polycrystals the crystallites are separated from each other by an intergranular space, affecting the effective conductivity of the polycrystal. This influence is higher when the less are the dimensions of crystallites. In the work the method of predicting the effective conductivity of polycrystalline media, which takes into account the presence of the intergranular space, has been developed. To construct the method, a polycrystal model has been adopted, in which the crystallites are considered to be non-uniform, consisting of a uniform crystalline anisotropic core and a uniform isotropic shell. To calculate the effective conductivity of the polycrystal, a generalized effective-field approximation is used, and the effective conductivity of the medium is used as a parameter of the comparison medium, i.e. a method of the self-consistent solution is used. On the basis of the developed method for a case of spherical crystallites with spherical shell the formula for polycrystal effective conductivity depending on the tensor of the crystalline cores, the conductivity of the shell and the volume fraction of the cores in the crystallines, has been obtained. This formula is applied in particular cases of polycrystalline medium, precisely for a polycrystal with single-type crystallites with isotropic core, in which case the expression for effective conductivity coincides with the classical Maxwell – Garnet formula; for polycrystal with the single-type with anisotropic cores with the same orientation of their crystallographic axes in space; for polycrystal with single-type crystallites with anisotropic cores with uniform distribution of orientations of their crystallographic axes in space; for polycrystal with conducting cores of crystallites and absolutely non-conducting shells. In the latter case the effective conductivity of the polycrystal turns to zero conductivity, which is fully consistent with the physical meaning.

Keywords: effective conductivity; polycrystal; crystallite; core; shell; anisotropic; intergranular gaps; generalized effective-field approximation; method of self-consistency

For citation: Lavrov I.V. Method of predicting effective conductivity of textured polycrystals taking into account intergranular gaps *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 299–309. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-299-309

Funding: the work has been supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-08-00111-a).

Введение. Кристаллиты в реальных поликристаллических материалах отделены друг от друга межзеренным пространством (межкристаллитными промежутками), фактически составляющим отдельную компоненту с иным структурным состоянием атомов по сравнению с кристаллом [1–3]. Вследствие этого материальные характеристики межзеренного пространства, в частности проводимость, отличаются от соответствующих характеристик кристаллитов и зависят от положения рассматриваемой точки внутри образца поликристалла. Наличие межзеренного пространства оказывает влияние на эффективную проводимость поликристалла, причем тем больше, чем меньше размеры кристаллитов. Это объясняется увеличением объемной доли межкристаллитной фазы с уменьшением размеров кристаллов [3].

Вычислению эффективных проводящих, а также диэлектрических, магнитных и теплопроводящих характеристик неоднородных сред посвящено большое количество работ. Математически данные задачи в случае стационарных полей равносильны, поэтому результат решения одной из них можно формально использовать и для других задач при условии совпадения структур рассматриваемых сред. Значительно меньше работ посвящено средам с анизотропными компонентами, среди которых можно отметить, например, [4–22], а также [23–25], где общая теория излагается для случая сред с анизотропными составляющими. Задачи прогнозирования эффективных свойств поликристаллов рассматриваются в [4–8, 16, 19]. Заметим, что во всех литературных источниках межкристаллитные промежутки не учитываются.

В настоящей работе предлагается метод учета влияния межкристаллитных промежутков на эффективную проводимость поликристалла. Метод основан на модели поликристалла с неоднородными кристаллитами, состоящими из однородного кристаллического ядра и однородной изотропной оболочки. В данной модели роль межкристаллитных промежутков играют оболочки кристаллитов и предполагается отсутствие возможной их неоднородности. Для вычисления эффективной проводимости поликристалла используется обобщенное приближение эффективного поля [26] в варианте самосогласования.

Постановка задачи. Рассмотрим образец статистически однородного поликристаллического материала объемом V, к границе S которого приложено однородное электрическое поле напряженностью $\mathbf{E}_0$. Будем считать, что поликристалл состоит из неоднородных и однотипных с точки зрения материальных характеристик и формы кристаллитов, представляющих собой однородное кристаллическое ядро в однородной изотропной оболочке. Границу ядра и внешнюю границу оболочки каждого кристаллита будем считать концентрическими сферами с радиусами $a^{(2)}$ и $a^{(1)}$ соответственно. Проводимость оболочек кристаллитов обозначим σ_s, тензор проводимости ядра конкретного кристаллита в системе координат xyz, связанной с текстурой образца, обозначим $\boldsymbol{\sigma}$ (индекс, указывающий номер кристаллита, будем опускать). В системе координат $\xi\eta\xi$ своих главных осей тензор $\boldsymbol{\sigma}$ имеет вид

$$\tilde{\sigma}=\begin{Vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Vmatrix}.$$

Ориентации собственных систем координат ξηξ кристаллитов образца предполагаются распределенными по некоторому вероятностному закону. Ставится задача вычислить тензор эффективной проводимости данного образца поликристалла $\boldsymbol{\sigma}^*$, который определяется уравнением

$$\langle \mathbf{j} \rangle = \boldsymbol{\sigma}^* \langle \mathbf{E} \rangle, \tag{1}$$

где $\langle \mathbf{j} \rangle$ и $\langle \mathbf{E} \rangle$ – соответственно средние по объему образца плотность электрического тока и напряженность электрического поля (предполагается, что среда удовлетворяет гипотезе эргодичности, т.е. среднее по ансамблю реализаций совпадает со средним по объему).

Для того чтобы найти $\boldsymbol{\sigma}^*$, нужно вычислить $\langle \mathbf{j} \rangle$ и $\langle \mathbf{E} \rangle$ в зависимости от параметров, описывающих материальные свойства компонентов поликристалла и структуру, образуемую ими. Для этого рассматривается краевая задача для электростатического потенциала $\varphi(\mathbf{r})$ в данном образце поликристалла:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}) \nabla \varphi(\mathbf{r}) = 0, \quad \varphi|_S = -(\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{r}), \tag{2}$$

где $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r})$ – локальный тензор проводимости поликристалла, являющийся случайной кусочно-постоянной функцией точки.

Можно показать, что в рассматриваемых условиях средняя по образцу напряженность электрического поля равна напряженности приложенного поля [5]. Решив задачу (2), можно найти распределения напряженности поля $(\mathbf{E} = -\nabla\varphi)$, а также плотности тока ($\mathbf{j}(\mathbf{r}) = \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})$) в образце в зависимости от напряженности приложенного поля $\mathbf{E}_0$, затем усреднить их по объему и найти $\boldsymbol{\sigma}^*$.

Введение тела сравнения и метод функций Грина. Уравнение в (2) – это уравнение в частных производных второго порядка с разрывными коэффициентами. Для решения этой проблемы используется процедура, связанная с введением однородного тела сравнения, имеющего такую же форму, как и образец поликристалла, и постановкой для него аналогичной задачи [25, 26]:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{c}}(\mathbf{r}) \nabla \varphi^{\mathrm{c}}(\mathbf{r}) = 0, \quad \varphi^{\mathrm{c}}|_S = -(\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{r}). \tag{3}$$

Здесь индексом «с» отмечены величины, относящиеся к телу сравнения.

Введем обозначения для разностей соответствующих величин в задачах (2) и (3):

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

Вычитая (3) из (2), получаем краевую задачу:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{c}} \nabla \varphi'(\mathbf{r}) = -\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}'(\mathbf{r}) \nabla \varphi(\mathbf{r}), \quad \varphi'|_S = 0. \tag{4}$$

В задаче (4) особенность, связанная с разрывностью материальных характеристик на границе между кристаллитами, находится в правой части уравнения, которая формально имеет смысл внешнего воздействия на систему.

С помощью функции Грина $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_1)$, вводимой условиями

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

решение задачи (4) в пределе при $V \to \infty$ можно записать в виде [26]

$$\varphi'(\mathbf{r})=\int G(\mathbf{r}_1-\mathbf{r})(\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}'(\mathbf{r}_1)\nabla\varphi(\mathbf{r}_1))d\,\mathbf{r}_1\,. \qquad (5)$$

Преобразуем (5) по частям и возьмем градиент от левой и правой частей:

$$\mathbf{E}'(\mathbf{r})=\int \nabla^1\otimes\nabla^1 G(\mathbf{r}_1-\mathbf{r})\boldsymbol{\sigma}'(\mathbf{r}_1)\mathbf{E}(\mathbf{r}_1)d\,\mathbf{r}_1\,, \qquad (6)$$

где $\mathbf{E}'(\mathbf{r})=-\nabla\varphi'(\mathbf{r})$; $\nabla^1\otimes\nabla^1 G(\mathbf{r}_1-\mathbf{r})$ – тензор вторых производных функции Грина (верхний индекс «1» у дифференциального оператора Гамильтона означает дифференцирование по $\mathbf{r}_1$).

Поскольку $\mathbf{E}'(\mathbf{r})=\mathbf{E}(\mathbf{r})-\mathbf{E}^{\mathrm{c}}$, где $\mathbf{E}^{\mathrm{c}}=\mathrm{const}$ – напряженность электрического поля в теле сравнения, из (6) получим интегральное уравнение для локальной напряженности поля:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r})=\mathbf{E}^{\mathrm{c}}+\mathbf{Q}(\mathbf{r})(\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r})-\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{c}})\mathbf{E}(\mathbf{r}), \qquad (7)$$

где $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$ – интегральный оператор, действие которого определяет формула

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

Получение выражения для эффективной проводимости поликристалла в обобщенном приближении эффективного поля. Весь образец поликристалла состоит из конечного числа кристаллитов, количество которых обозначим N. Пусть текущая точка $\mathbf{r}$ лежит внутри k-го кристаллита. Разложим оператор $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$ на внешнюю и внутреннюю составляющие по отношению к k-му кристаллиту:

$$\mathbf{Q}(\mathbf{r})=\mathbf{Q}^{(k)}_{ext}(\mathbf{r})+\mathbf{Q}^{(k)}_{int}(\mathbf{r}).$$

Тогда (7) примет вид

$$\mathbf{E}(\mathbf{r})=\mathbf{E}^{\mathrm{c}}+\mathbf{Q}^{(k)}_{ext}(\mathbf{r})(\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r})-\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{c}})\mathbf{E}(\mathbf{r})+\mathbf{Q}^{(k)}_{int}(\mathbf{r})(\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r})-\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{c}})\mathbf{E}(\mathbf{r}),\quad \mathbf{r}\in V^{(k)}, \qquad (8)$$

где $V^{(k)}$ – объем k-го кристаллита.

Первые два члена в (8) можно назвать напряженностью эффективного поля в данной точке k-го кристаллита, которое формируется в результате приложения к образцу композита внешнего поля и наличия в образце других кристаллитов:

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

В силу статистической однородности материала и малости каждого включения по сравнению со всем образцом можно принять, что среднее эффективное поле в каждом включении и среднее эффективное поле в образце примерно равны:

$$\langle\mathbf{E}_{eff}\rangle^{(k)}\approx\langle\mathbf{E}_{eff}\rangle,\quad k=\overline{1,N}\,.$$

Другое предположение состоит в том, что средние напряженности поля $\langle\mathbf{E}\rangle^{(k)}_1$, $\langle\mathbf{E}\rangle^{(k)}_2$ в оболочке и ядре каждого кристаллита считаются связанными так же, как если бы данный кристаллит находился в единственном числе в бесконечной среде сравнения с однородным приложенным полем:

$$\langle\mathbf{E}\rangle^{(k)}_1=\boldsymbol{\lambda}^{(k)}_{12}\langle\mathbf{E}\rangle^{(k)}_2,\quad k=1,\ldots,N\,.$$

В данном случае для сферических однотипных кристаллитов [26]

$$\boldsymbol{\lambda}^{(k)}_{12}=\frac{1}{3\sigma_s}(\boldsymbol{\sigma}^{(k)}+2\sigma_s\mathbf{I}),\quad k=1,\ldots,N\,. \qquad (9)$$

Здесь $\boldsymbol{\sigma}^{(k)}$ – тензор проводимости ядра кристаллита, зависящий от ориентации системы координат $\xi\eta\zeta$ его кристаллографических осей в системе координат xyz, связанной с текстурой образца поликристалла:

$$\boldsymbol{\sigma}^{(k)}=\mathbf{C}^{(k)}\tilde{\boldsymbol{\sigma}}\left(\mathbf{C}^{(k)}\right)^{T},$$

где $\mathbf{C}^{(k)}$ – матрица поворота от xyz к $\xi\eta\zeta$.

В итоге в обобщенном приближении эффективного поля для $\boldsymbol{\sigma}^{*}$ получаем следующее выражение [26]:

$$\boldsymbol{\sigma}^{*}=\langle((1-\nu)\sigma_s\boldsymbol{\lambda}_{12}+\nu\boldsymbol{\sigma})\boldsymbol{\lambda}_{20}\rangle\langle((1-\nu)\boldsymbol{\lambda}_{12}+\nu\mathbf{I})\boldsymbol{\lambda}_{20}\rangle^{-1}, \tag{10}$$

где $\nu=(a^{(2)}/a^{(1)})^3$ – объемная доля кристаллического ядра в кристаллите; $\boldsymbol{\lambda}_{20}$ – тензор, связанный с конкретным кристаллитом (индекс, обозначающий номер кристаллита, опущен):

$$\boldsymbol{\lambda}_{20}=[(1-\nu)(\mathbf{I}-\mathbf{g}_1(\sigma_s\mathbf{I}-\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{c}}))\boldsymbol{\lambda}_{12}+\nu(\mathbf{I}-\mathbf{g}_1(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{c}}))]^{-1}; \tag{11}$$

$$\mathbf{g}_1=\int_{V'}\nabla\otimes\nabla\, G(\mathbf{r})\,d\,\mathbf{r}.$$

Здесь V' – объем кристаллита, включая его оболочку; $G(\mathbf{r})$– функция Грина задачи (4).

В случае выбора $\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{c}}=\boldsymbol{\sigma}^{*}$, т.е. при варианте самосогласованного решения, функция $G(\mathbf{r})$ равна [27]:

$$G(\mathbf{r})=\frac{1}{4\pi\sqrt{\det\boldsymbol{\sigma}^{*}}\sqrt{\mathbf{r}^{T}(\boldsymbol{\sigma}^{*})^{-1}\mathbf{r}}}.$$

Поскольку в системе координат xyz тензор $\boldsymbol{\sigma}^{*}$ имеет диагональный вид, компоненты тензора $\mathbf{g}_1$ в этой системе могут быть вычислены по формулам [28]

$$g_{1,jj}=-\frac{\tilde{L}_j}{\sigma^{*}_{jj}},\ j=1,2,3;\quad g_{1,ij}=0,\ i\neq j,$$

где σ^{*}_{jj}, $j=1, 2, 3$, – главные компоненты тензора $\boldsymbol{\sigma}^{*}$;

$$\tilde{L}_j=\frac{\tilde{a}_1\tilde{a}_2\tilde{a}_3}{2}\int_0^{\infty}\frac{dq}{(\tilde{a}_j^2+q)[(\tilde{a}_1^2+q)(\tilde{a}_2^2+q)(\tilde{a}_3^2+q)]^{1/2}},\quad j=1,2,3,-$$

главные компоненты тензора обобщенных геометрических факторов кристаллита с учетом анизотропии среды сравнения; $\tilde{a}_j=a^{(1)}/\sqrt{\sigma^{*}_{jj}}$, $j=1,2,3,-$ «обобщенные» полуоси сферы с учетом анизотропии среды сравнения.

Введем тензоры $\boldsymbol{\lambda}$ и $\boldsymbol{\kappa}$, связанные с данным кристаллитом:

$$\boldsymbol{\lambda}=((1-\nu)\boldsymbol{\lambda}_{12}+\nu\mathbf{I})\boldsymbol{\lambda}_{20},\quad \boldsymbol{\kappa}=((1-\nu)\sigma_s\boldsymbol{\lambda}_{12}+\nu\boldsymbol{\sigma})\boldsymbol{\lambda}_{20}. \tag{12}$$

Тогда (10) можно переписать в виде

$$\boldsymbol{\sigma}^{*}=\langle\boldsymbol{\kappa}\rangle\langle\boldsymbol{\lambda}\rangle^{-1}, \tag{13}$$

где угловые скобки означают усреднение по всем кристаллитам образца, но поскольку в данном случае кристаллиты отличаются только ориентациями их кристаллографических осей в системе координат xyz, то усреднение в (13) – это усреднение по всем ориентациям кристаллитов образца в системе xyz.

Выражение (13) представляет собой тензорное уравнение, которое достаточно эффективно решается методом простых итераций [29].

Применение метода для некоторых частных случаев поликристаллов. *Пример 1.* В случае изотропного ядра кристаллитов, т.е. при $\boldsymbol{\sigma} = \sigma\mathbf{I}$, поликристалл в целом изотропен $\left(\boldsymbol{\sigma}^* = \sigma^*\mathbf{I}\right)$. Тогда все тензорные величины, связанные с кристаллитами, изотропны и одинаковы для всех кристаллитов:

$$\widetilde{L}_j = \frac{1}{3},\ j = 1,2,3,\quad \mathbf{g}_1 = -\frac{1}{3\sigma^*}\mathbf{I},\quad \boldsymbol{\lambda}_{12} = \frac{\sigma + 2\sigma_s}{3\sigma_s}\mathbf{I},$$

$$\boldsymbol{\lambda}_{20} = \left[(1-\nu)\frac{\sigma_s + 2\sigma^*}{3\sigma^*}\frac{\sigma + 2\sigma_s}{3\sigma_s} + \nu\frac{\sigma + 2\sigma^*}{3\sigma^*}\right]^{-1}\mathbf{I}, \tag{14}$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \frac{\sigma + 2\sigma_s + \nu(\sigma_s - \sigma)}{3\sigma_s}\boldsymbol{\lambda}_{20},\quad \boldsymbol{\kappa} = \frac{\sigma + 2\sigma_s + 2\nu(\sigma - \sigma_s)}{3}\boldsymbol{\lambda}_{20}.$$

Для $\boldsymbol{\sigma}^*$ из (13) с учетом (14) получим классическую формулу Максвелла – Гарнетта [5, 10, 15], где роль матрицы играет материал оболочки кристаллитов:

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \boldsymbol{\kappa}\boldsymbol{\lambda}^{-1} = \sigma_s\frac{\sigma + 2\sigma_s + 2\nu(\sigma - \sigma_s)}{\sigma + 2\sigma_s - \nu(\sigma - \sigma_s)}. \tag{15}$$

Пример 2. Рассмотрим случай, когда ядра кристаллитов анизотропные, но главные оси тензоров их проводимости $\boldsymbol{\sigma}$ ориентированы одинаковым образом. Тогда

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \boldsymbol{\kappa}\boldsymbol{\lambda}^{-1} = \left((1-\nu)\sigma_s\boldsymbol{\lambda}_{12} + \nu\widetilde{\boldsymbol{\sigma}}\right)\left((1-\nu)\boldsymbol{\lambda}_{12} + \nu\mathbf{I}\right)^{-1}$$

и с учетом того, что

$$\boldsymbol{\lambda}_{12} = \frac{1}{3\sigma_s}\left(\widetilde{\boldsymbol{\sigma}} + 2\sigma_s\mathbf{I}\right),$$

окончательно получим

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \boldsymbol{\kappa}\boldsymbol{\lambda}^{-1} = \sigma_s\left(\widetilde{\boldsymbol{\sigma}} + 2\sigma_s\mathbf{I} + 2\nu\left(\widetilde{\boldsymbol{\sigma}} - \sigma_s\mathbf{I}\right)\right)\left(\widetilde{\boldsymbol{\sigma}} + 2\sigma_s\mathbf{I} - \nu\left(\widetilde{\boldsymbol{\sigma}} - \sigma_s\mathbf{I}\right)\right)^{-1}. \tag{16}$$

Все тензорные величины, входящие в (16), имеют диагональный вид в системе *xyz*, поэтому главные компоненты тензора $\boldsymbol{\sigma}^*$ получаются заменой тензорных величин в (16) на соответствующие их главные компоненты.

Следует отметить, что в рассмотренных примерах результат не зависит от выбора параметра среды сравнения $\boldsymbol{\sigma}^c$ (в обоих случаях он выбирался равным $\boldsymbol{\sigma}^*$, но входил только в выражение для $\boldsymbol{\lambda}_{20}$, который в процессе преобразований сокращался).

Пример 3. Рассмотрим случай с анизотропными ядрами кристаллитов при равномерном распределении их ориентаций в пространстве. В этом случае тензор эффективной проводимости поликристалла имеет скалярный вид: $\boldsymbol{\sigma}^* = \sigma^*\mathbf{I}$. Так же, как и в примере 1, имеем

$$\mathbf{g}_1 = -\frac{1}{3\sigma^*}\mathbf{I}.$$

Согласно (9), (11), (12) получим

$$\boldsymbol{\lambda}_{20}=3\sigma^{*}\left[(1-\nu)\frac{\sigma_s+2\sigma^{*}}{3\sigma_s^{*}}(\boldsymbol{\sigma}+2\sigma_s\mathbf{I})+\nu(\boldsymbol{\sigma}+2\sigma^{*}\mathbf{I})\right]^{-1},$$

$$\boldsymbol{\lambda}=\frac{1}{3\sigma_s}((\boldsymbol{\sigma}+2\sigma_s\mathbf{I})-\nu(\boldsymbol{\sigma}-\sigma_s\mathbf{I}))\boldsymbol{\lambda}_{20}, \tag{17}$$

$$\boldsymbol{\kappa}=\frac{1}{3}((\boldsymbol{\sigma}+2\sigma_s\mathbf{I})+2\nu(\boldsymbol{\sigma}-\sigma_s\mathbf{I}))\boldsymbol{\lambda}_{20}.$$

В системе координат $\xi\eta\zeta$ собственных осей кристаллита данные тензоры имеют диагональный вид с главными компонентами:

$$\lambda'_{20,j}=3\sigma^{*}\left[(1-\nu)\frac{\sigma_s+2\sigma^{*}}{3\sigma_s}(\sigma_j+2\sigma_s)+\nu(\sigma_j+2\sigma^{*})\right]^{-1}, \quad j=1,2,3,$$

$$\lambda'_j=\frac{1}{3\sigma_s}((\sigma_j+2\sigma_s)-\nu(\sigma_j-\sigma_s))\lambda'_{20,j}, \tag{18}$$

$$\kappa'_j=\frac{1}{3}((\sigma_j+2\sigma_s)+2\nu(\sigma_j-\sigma_s))\lambda'_{20,j}, \quad j=1,2,3,$$

где σ_j, $j = 1, 2, 3$, – главные компоненты тензора $\boldsymbol{\sigma}$.

При равномерном распределении ориентаций кристаллитов для усредненных компонент тензоров $\boldsymbol{\lambda}$ и $\boldsymbol{\kappa}$ в системе *xyz* получаем [30]

$$\langle\lambda_{jj}\rangle=D/3, \quad j=1,2,3; \quad \langle\lambda_{ij}\rangle=0,\ i\neq j, \tag{19}$$

$$\langle\kappa_{jj}\rangle=K/3, \quad j=1,2,3; \quad \langle\kappa_{ij}\rangle=0,\ i\neq j,$$

где

$$D=\lambda'_1+\lambda'_2+\lambda'_3, \quad K=\kappa'_1+\kappa'_2+\kappa'_3. \tag{20}$$

Таким образом, для эффективной проводимости поликристалла в случае равномерного распределения ориентаций кристаллитов уравнение имеет вид

$$\sigma^{*}=\frac{\kappa'_1+\kappa'_2+\kappa'_3}{\lambda'_1+\lambda'_2+\lambda'_3}, \tag{21}$$

где λ'_j, κ'_j вычисляются из (18).

Несложно убедиться, что в частном случае изотропных ядер кристаллитов уравнение (21) становится равносильным выражению (15).

Пример 4. Рассмотрим предельный случай, когда кристаллические ядра у кристаллитов проводящие, а межкристаллитная фаза в поликристалле абсолютно непроводящая, т.е. при $\sigma_s = 0$. При $\sigma_s \to 0$ из (9), (11), (12) имеем

$$\boldsymbol{\lambda}_{12}\sim\frac{\boldsymbol{\sigma}}{3\sigma_s}, \quad \boldsymbol{\lambda}_{20}\sim\sigma_s\left[(1-\nu)(\mathbf{I}+\mathbf{g}_1\boldsymbol{\sigma}^{c})\frac{\boldsymbol{\sigma}}{3}\right]^{-1},$$

$$\boldsymbol{\lambda}\sim(\mathbf{I}+\mathbf{g}_1\boldsymbol{\sigma}^{c})^{-1}, \quad \boldsymbol{\kappa}\sim\sigma_s(1+2\nu)\left[(1-\nu)(\mathbf{I}+\mathbf{g}_1\boldsymbol{\sigma}^{c})\right]^{-1}.$$

Тогда

$$\boldsymbol{\sigma}^{*} \sim \sigma_s (1+2\nu)\left[(1-\nu)(\mathbf{I}+\mathbf{g}_1\boldsymbol{\sigma}^{c})\right]^{-1}(\mathbf{I}+\mathbf{g}_1\boldsymbol{\sigma}^{c}) \to 0, \quad \sigma_s \to 0. \tag{22}$$

Таким образом, данный метод дает верный результат в предельном случае непроводящей межкристаллитной фазы.

Заключение. С помощью разработанного метода прогнозирования эффективной проводимости поликристалла с учетом межкристаллитных промежутков получена общая формула для тензора эффективной проводимости поликристаллической среды.

Получены выражения для тензора эффективной проводимости для частных случаев поликристаллов. Установлено, что в частном случае непроводящих межкристаллитных промежутков и проводящих ядер кристаллитов эффективная проводимость поликристалла обращается в нуль.

Литература

1. ***Gleiter H.*** Deformation of polycrystals // Proc. of 2nd RISO Symposium on Metallurgy and Materials Science / Eds. by N. Hansen, T. Leffers, H. Lithold. Roskild, RISO Nat. Lab. 1981. P. 15–21.

2. ***Gleiter H.*** Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta Mater. 2000. Vol. 48. No. P. 1–29.

3. ***Яковлев В.Б., Рощин В.М.*** Нанокомпозиты и нанокерамики как основа функциональной электроники // Нанотехнологии в электронике: монография / под ред. Ю.А. Чаплыгина. М.: Техносфера, 2005. Гл. 9. С. 323–360.

4. ***Hashin Z., Shtrikman S.*** Conductivity of polycrystals // Phys. Rev. 1963. Vol. 130. P. 129–133.

5. ***Stroud D.*** Generalized effective-medium approach to the conductivity of an inhomogeneous material // Phys. Rev. B. 1975. Vol. 12. No. 8. P. 3368–3373.

6. ***Ting-Kang Xia, Stroud D.*** Theory of the Hall coefficients of polycrystals: application to a simple model for $La_{2-x}M_xCuO_4$ (M=Sr, Ba) // Phys. Rev. B. 1988. Vol. 37. No. 1. P. 118–122.

7. ***Helsing J., Helte A.*** Effective conductivity of aggregates of anisotropic grains // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. No. 6. P. 3583–3588.

8. ***Genchev Z.D.*** Anisotropic electrical conductivity tensor of granular high- T_c superconductors in an effective-medium theory // Supercond. Sci. Technol. 1993. Vol. 6. P. 532–536.

9. ***Dias-Guilera A., Tremblay A.-M. S.*** Random mixtures with orientational order, and the anisotropic resistivity tensor of high-Tc superconductors // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. No. 1. P.379–383.

10. ***Levy O., Stroud D.*** Maxwell – Garnett theory for mixtures of anisotropic inclusions: Application to conducting polymers // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 56. No. 13. P. 8035–8046.

11. ***Michel B., Lakhtakia A., Weiglhofer W.*** Homogenization of linear bianisotropic particulate composite media - Numerical studies // Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics. 1998. Vol. 9. P. 167–178.

12. ***Bergman D.J., Strelniker Y.M.*** Magnetotransport in conducting composite films with a disordered columnar microstructure and an in-plane magnetic field // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. No. 18. P. 13016–13027.

13. ***Giordano S.*** Equivalent permittivity tensor in anisotropic random media / J. Electrost. 2006. Vol. 64. P. 655–663.

14. ***MacKay T.G.*** On extended homogenization formalisms for nanocomposites // J. of Nanophotonics. 2008. Vol. 2. 021850 (10 pp). DOI: 10.1117/1.2982931

15. ***Лавров И.В.*** Диэлектрическая проницаемость композиционных материалов с текстурой: эллипсоидальные анизотропные кристаллиты // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2009. № 1. С. 52–58.

16. ***Лавров И.В.*** Эффективная проводимость поликристаллической среды. Одноосная текстура и двуосные кристаллиты // Изв. вузов. Электроника. 2010. №3. С. 3–12.

17. ***Балагуров Б.Я.*** К теории проводимости анизотропных композитов. Линейное по концентрации включений приближение // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. №5(11). С. 976–983.

18. ***Балагуров Б.Я.*** К теории проводимости анизотропных композитов. Слабонеоднородная среда // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. Вып. 2. С. 378–383.

19. ***Лавров И.В.*** Эффективная проводимость поликристаллической среды в случае слабой макроскопической анизотропии // Изв. вузов. Электроника. 2012. №4. С. 3–12.

20. ***Levy O., Cherkaev E.*** Effective medium approximations for anisotropic composites with arbitrary component orientation // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 114. 164102 (8 pp.) DOI: 10.1063/1.4826616

21. ***Балагуров Б.Я.*** К теории гальваномагнитных свойств композитов // ЖЭТФ. 2014. Т. 145. № 2. С. 356–368.

22. ***Giordano S.*** Nonlinear effective behavior of a dispersion of randomly oriented coated ellipsoids with arbitrary temporal dispersion // Int. J. Eng. Science. 2016. Vol. 98. P. 14–35.

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

24. ***Фокин А.Г.*** Эквивалентность методов расчета эффективной диэлектрической проницаемости неоднородных сред // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 6. С. 1121–1126.

25. ***Фокин А.Г.*** Макроскопическая проводимость случайно-неоднородных сред. Методы расчета // УФН. 1996. Т. 166. № 10. С. 1069–1093.

26. Обобщенное приближение эффективного поля для неоднородной среды с включениями в оболочке / ***В.И. Колесников, В.В. Бардушкин, И.В. Лавров и др.*** // Докл. Академии наук. 2017. Т. 476. №3. С. 280–284. DOI: 10.7868/S0869565217270081

27. ***Giordano S., Palla P.L.*** Dielectric behavior of anisotropic inhomogeneities: interior and exterior point Eshelby tensors // J. Phys. A: Math. Theor. 2008. Vol. 41. 415205 (24 pp).

28. О вычислении эффективной теплопроводности текстурированных трибокомпозитов / ***И.В. Лавров, В.В. Бардушкин, А.П. Сычев и др.*** // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017. № 2. С. 48–56.

29. ***Березин И.С., Жидков Н.П.*** Методы вычислений. М.: ГИФМЛ, 1962. Т. 2. 640 с.

30. ***Лавров И.*** Диэлектрические и проводящие свойства неоднородных сред с текстурой. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 168 с.

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.; после доработки 18.02.2020 г.; принята к публикации 16.06.2020 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

References

1. Gleiter H. Deformation of Polycrystals. *Proc. of 2nd RISO Symposium on Metallurgy and Materials Science.* Eds. N. Hansen, T. Leffers, H. Lithold. Roskild, RISO Nat. Lab. 1981, pp. 15–21.

2. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Mater*, 2000, vol. 48, no. 1, pp. 1–29.

3. Yakovlev V.B., Roshin V.M. *Nanocomposites and nanoceramics as the basis of functional electronics.* Chapter 9 of collective monography «Nanotechnologies in electronics». Ed. by Y.A. Chaplygin. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005, pp. 323–360. (In Russian).

4. Hashin Z., Shtrikman S. Conductivity of polycrystals. *Phys. Rev.,* 1963, vol. 130, pp. 129–133.

5. Stroud D. Generalized effective-medium approach to the conductivity of an inhomogeneous material. *Phys. Rev. B*, 1975, vol. 12, no. 8, pp. 3368–3373.

6. Ting-Kang Xia, Stroud D. Theory of the Hall coefficients of polycrystals: Application to a Simple Model for $La_{2-x}M_xCuO_4$ (M=Sr, Ba). *Phys. Rev. B*, 1988, vol. 37, no. 1, pp. 118–122.

7. Helsing J., Helte A. Effective conductivity of aggregates of anisotropic grains. *J. Appl. Phys.*, 1991, vol. 69, no. 6, pp. 3583–3588.

8. Genchev Z.D. Anisotropic electrical conductivity tensor of granular high- Tc superconductors in an effective-medium theory. *Supercond. Sci. Technol*., 1993, vol. 6, pp. 532–536.

9. Dias-Guilera A., Tremblay A.-M.S. Random mixtures with orientational order, and the anisotropic resistivity tensor of high-Tc superconductors. *J. Appl. Phys.*, 1991, vol. 69, no. 1, pp. 379–383.

10. Levy O., Stroud D. Maxwell Garnett theory for mixtures of anisotropic inclusions: Application to conducting polymers. *Phys. Rev. B,* 1997, vol. 56, no. 13, pp. 8035–8046.

11. Michel B., Lakhtakia A., Weiglhofer W. Homogenization of linear bianisotropic particulate composite media - Numerical studies. *Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 1998, vol. 9, pp. 167–178.

12. Bergman D.J., Strelniker Y.M. Magnetotransport in conducting composite films with a disordered columnar microstructure and an in-plane magnetic field. *Phys. Rev. B*, 1999, vol. 60, no. 18, pp. 13016–13027.

13. Giordano S. Equivalent permittivity tensor in anisotropic random media. *J. Electrost*., 2006, vol. 64, pp. 655–663.

14. MacKay T.G. On extended homogenization formalisms for nanocomposites. *J.of Nanophotonics,* 2008, vol. 2, p. 021850 (10 pp). DOI: 10.1117/1.2982931

15. Lavrov I.V. Permittivity of composite materials with texture: ellipsoidal anisotropic crystallites. *Ekologicheskij vestnik nauchnyh centrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2009, no. 1, pp. 52–58. (In Russian).

16. Lavrov I.V. Effective conductivity of a polycrystalline medium. uniaxial texture and biaxial crystallites. *Semiconductors*, 2011, vol. 45, no. 13, pp. 1621–1627. DOI: 10.1134/S106378261113015X

17. Balagurov B.Y. On the theory of conductivity of anisotropic composites: A linear-concentration approximation of inclusions. *J. Exp. Theor. Phys.,* 2011, vol. 113, pp. 849–856. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063776111090020

18. Balagurov B.Y. On the theory of conductivity of anisotropic composites: A weakly inhomogeneous medium. *J. Exp. Theor. Phys.,* 2011, vol. 112, pp. 327–332. DOI: https://doi.org/10.1134/S1063776111020026

19. Lavrov I.V. Effective conductivity of a polycrystalline medium with weak macroscopic anisotropy. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 13, pp. 1667–1673. DOI: 10.1134/S1063782613130113

20. Levy O., Cherkaev E. Effective medium approximations for anisotropic composites with arbitrary component orientation. *J. Appl. Phys.,* 2013, vol. 114, p. 164102. (8 pp.) DOI: 10.1063/1.4826616

21. Balagurov B.Y. On the theory of galvanomagnetic properties of composites. *J. Exp. Theor. Phys.,* 2014, vol. 118, pp. 311–322. https://doi.org/10.1134/S1063776114020010)

22. Giordano S. Nonlinear effective behavior of a dispersion of randomly oriented coated ellipsoids with arbitrary temporal dispersion. *Int. J. Eng. Science,* 2016, vol. 98, pp. 14–35.

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

24. Fokin A.G. Equivalence of the calculation methods of the effective permittivity of inhomogeneous media. *Soviet Physics: Technical Physics*, 1977, vol. 22, p. 645.

25. Fokin A.G. Macroscopic conductivity of random inhomogeneous media. Calculation methods. *Physics Uspekhi*. 1996, vol. 39, pp. 1009–1032.

26. Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Lavrov I.V., Sychev A.P., Yakovlev V.B.. A Generalized effective-field approximation for an inhomogeneous medium with coated inclusions. *Dokl. Phys.,* 2017, vol. 62, no. 9, pp. 415–419. DOI: 10.1134/S1028335817090087

27. Giordano S., Palla P.L. Dielectric behavior of anisotropic inhomogeneities: interior and exterior point Eshelby tensors. *J. Phys. A: Math. Theor*., 2008, vol. 41, p. 415205 (24 pp.).

28. Lavrov I.V., Bardushkin V.V., Sychev A.P., Yakovlev V.B., Kirillov D.A. On calculation of the effective thermal conductivity of textured tribocomposites. *Ekologicheskij vestnik nauchnyh centrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva = Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2017, no. 2, pp. 48–56. (In Russian).

29. Berezin I.S., Zhidkov N.P. *Methods of calculation*. Moscow, State Publishing of Physical and Mathematical Literature, 1962, vol. 2. 640 p. (In Russian).

30. Lavrov I. *Dielectrical and conducting properties of inhomogeneous media with texture.* Saarbrücken, LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 168 p. (In Russian).

Received 18.02.2020; Revised 18.02.2020; Accepted 16.06.2020.

Information about the author:

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

УДК 004.451.7 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-310-319

Формализация выбора отладочных тестов при проектировании цифровых микроэлектронных систем на основе проверки выполнения требуемых функций

А.Д. Иванников, А.Л. Стемпковский

Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, г. Москва, Россия

adi@ippm.ru

Для отладки проектов цифровых микроэлектронных систем необходимо формирование некоторого набора тестовых воздействий на моделируемую систему с целью проверки правильности ее функционирования. Для большого количества цифровых систем характерно выполнение последовательности функций из конечного алфавита. В работе определена частичная полугруппа на множестве допустимых последовательностей функций. Допустимые последовательности формализованы путем введения графа функций, задающего возможные для выполнения функции для различных состояний цифровой системы. Граф функций совместно с множествами входных взаимодействий для каждой функции задают спецификацию внешнего поведения цифровой системы Установлено, что если допустимость последовательного выполнения двух функций зависит от выполненных ранее функций и состояния цифровой системы, то некоторые функции должны быть разделены на подфункции. Показано, что набор отладочных тестов должен включать в себя как проверку выполнения последовательностей функций, так и правильность выполнения каждой функции с различными наборами параметров

Ключевые слова: отладка методом моделирования; цифровые системы; алфавит функций; графовое представление последовательности функций

Для цитирования: Иванников А.Д., Стемпковский А.Л. Формализация выбора отладочных тестов при проектировании цифровых микроэлектронных систем на основе проверки выполнения требуемых функций // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 310–319. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-310-319

© А.Д. Иванников, А.Л. Стемпковский, 2020

Formal Choice of Debugging Tests for Digital Microelectronic Systems Designs Based on the Required Functions Fulfillment Checking

A.D. Ivannikov, A.L. Stempkovskiy

Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

adi@ippm.ru

Abstract: For digital microelectronic system design debugging, it is necessary to form a certain set of test influences on the simulated system to verify the correctness of its functioning. For a large number of digital systems, a sequence of functions from a finite alphabet is characteristic. It is shown that a partial semigroup is defined on the set of admissible sequences of functions. Valid sequences are formalized by introducing a graph of functions that defines the functions that can be performed for various states of the digital system. The function graph, together with the sets of input interactions for each function, specifies the specification of the external behavior of the digital system. If the admissibility of the sequential execution of two functions depends on previously performed functions and the state of the digital system, then some functions should be divided into subfunctions. It has been shown that a set of debugging tests should include both checking the execution of sequences of functions and the correctness of each function with various sets of parameters

Keywords: design debugging by simulation; digital systems; function alphabet; graph representation of a sequence of functions

***For citation*:** Ivannikov A.D., Stempkovskiy A.L. Formal choice of debugging tests for digital microelectronic systems designs based on the required functions fulfillment checking. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 310–319. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-310-319

Введение. При проектировании цифровых микроэлектронных систем для отладки проектов широко используется метод моделирования [1–6]. На компьютерную модель цифровой системы подаются некоторые входные воздействия, а реакция модели проектируемой системы проверяется на соответствие техническому заданию. Выполнение какой-либо функции может быть инициировано не только входным сигналом цифровой системы управления, но и самой цифровой системой. Поэтому в качестве аргументов функционирования цифровых систем могут рассматриваться входные взаимодействия – последовательности сигналов, включающие как входные сигналы цифровой системы, так и ее выходные сигналы управления обменом [7].

Постановка задачи. Будем рассматривать логическую модель сигналов на шинах и линиях цифровых систем, т.е. считать, что значения сигналов представляются как 0 или 1 на линиях и как число из диапазона $0 – (2^n – 1)$ на шинах системы. Цифровые сигналы

внешних шин и линий назовем терминальными переменными – множеством **P**. Переменная $p \in \mathbf{P}$ всегда имеет одно из значений конечного множества $\mathbf{Z}_p$, элементы которого определяют целочисленное значение сигнала и направленность работы шины или линии.

Событием по переменной p называется изменение переменной p со значения $z_1 \in \mathbf{Z}_p$ на значение $z_2 \in \mathbf{Z}_p$ в момент времени t. Обозначим такое событие χ^{t}_{p,z_1,z_2}. Взаимодействие цифровой системы с внешней средой есть последовательность переключений сигналов на терминальных шинах и линиях, т.е. последовательность событий.

Входное взаимодействие μ может быть представлено в виде вектора $\left(z^{\text{н}}_{p_1},\ldots,z^{\text{н}}_{p_k}\right)$ начальных значений переменных $p_1,\ldots, p_k$ в момент времени $t = 0$ и последовательности событий по этим переменным с конечным числом событий за любой конечный интервал времени:

$$\mu=\left(z^{\text{н}}_{p_1},\ldots,z^{\text{н}}_{p_n+q}\right),\chi^{t_1}_{p_{i_1},z_{j_1},z_{j_2}},\chi^{t_2}_{p_{i_2},z_{j_3},z_{j_4}},\chi^{t_3}_{p_{i_3},z_{j_5},z_{j_6}}\ldots, \quad (1)$$

где $p_{i_1}, p_{i_2}, p_{i_3},\ldots$ – переменные, принадлежащие множеству **P** и являющиеся входными переменными и выходными переменными управления обменом; $z_{j_1}, z_{j_3}, z_{j_5},\ldots$ – значения переменных непосредственно перед событием; $z_{j_2}, z_{j_4}, z_{j_6},\ldots$ – значения переменных непосредственно после события; $\chi^{t_1}_{p_{i_1},z_{j_1},z_{j_2}},\chi^{t_2}_{p_{i_2},z_{j_3},z_{j_4}},\chi^{t_3}_{p_{i_3},z_{j_5},z_{j_6}}\ldots$ – входные и выходные события управления обменом; $t_1 \le t_2 \le t_3 \le \ldots$ – упорядоченная последовательность времен событий входного взаимодействия.

При отладке методом моделирования важной задачей является выбор конечного числа конечных по времени тестовых входных взаимодействий (тестовых примеров). Отличительная особенность предлагаемого подхода – отсутствие необходимости иметь полную формальную спецификацию на функционирование проектируемой цифровой системы. Разработчик на основании понимания функционирования системы формулирует требуемые функции с различными классами параметров и режимами работы, объединяет или разделяет функции в соответствии со своим представлением о различных режимах их выполнения.

Функционирование многих управляющих цифровых систем может быть представлено как последовательность выполняемых функций, каждая из которых задается подачей на цифровую систему некоторого входного взаимодействия. Другими словами, цифровая система выполняет некоторую последовательность функций из конечного алфавита **K**, причем выполнение каждой функции вызывается одним из входных взаимодействий определенного класса. Входные взаимодействия, задающие выполнение цифровой системой функции $k \in \mathbf{K}$, могут различаться значениями данных, временными соотношениями между отдельными сигналами в допустимых пределах и т.д. Следует отметить, что для многих современных сложных цифровых систем представление их работы как последовательного потока выполняемых функций может оказаться затруднительным. Применение предлагаемого подхода к выбору отладочных тестов на основе проверки правильности выполнения функций возможен для ограниченных по сложности микроэлектронных цифровых систем.

Отладочные тестовые примеры должны осуществлять проверку правильности выполнения цифровой системой всех ее функций из множества **K**, а также правильности выполнения допустимых последовательностей функций $f \in \mathbf{F}$, где **F** – множество допустимых последовательностей функций из множества **K**.

Формальное представление множества последовательностей выполняемых функций. Рассматривая последовательное выполнение функций k_i и k_j как операцию умножения, а последовательность k_ik_j как произведение, можно сказать, что на множестве последовательностей выполняемых функций **F** определена полугруппа. Рассмотрим полугруппу $<\mathbf{F}, \cdot>$, в общем случае частичную, с конечным множеством **K** порождающих элементов k. При этом возможны три случая.

1. Произведение $f' \cdot f''$ определено для всех $f' \in \mathbf{F}$, $f'' \in \mathbf{F}$. В этом случае полугруппа $<\mathbf{F}, \cdot>$ является полной.

2. Произведение $f' \cdot f''$ определено, если f' и f'' могут быть представлены как $f'=k_{i_1}\cdot k_{i_2}\cdot\ldots\cdot k'$, $f''=k''\cdot k_{j_2}\cdot\ldots\cdot k_{j_i}$, причем произведение $k'\cdot k''$ существует. В этом случае вопрос о существовании $f' \cdot f''$ сводится к вопросу о существовании произведений $k' \cdot k''$, где $k' \in \mathbf{K}$, $k'' \in \mathbf{K}$.

3. Произведение $f' \cdot f''$ определено, если существуют произведения $k_{i_1}\cdot k_{i_2}\cdot\ldots\cdot k'\cdot k''$, $k_{i_1}\cdot k_{i_2}\cdot\ldots\cdot k'\cdot k''\cdot k_{j_2},\ldots,k_{i_1}\cdot k_{i_2}\cdot\ldots\cdot k'\cdot k''\cdot k_{j_2}\cdot\ldots\cdot k_{j_i}$. В этом случае вопрос о существовании $f' \cdot f''$ сводится к вопросу о существовании произведения $f \cdot k$, где $f \in \mathbf{F}$, $k \in \mathbf{K}$.

Случай 3 является наиболее общим. Проанализируем его. Проектируемые цифровые системы всегда имеют конечное множество внутренних состояний. В связи с этим все существующие произведения могут быть заданы конечным числом правил. Множество **F** есть множество слов в конечном алфавите **K**, которое может быть задано некоторой праволинейной грамматикой [8] с конечным числом правил вывода. Множество допустимых слов **F** может быть задано конечным инициальным автоматом без выходов:

$$A= (\mathbf{K}, \mathbf{X}, x_н, \varphi), \qquad (2)$$

где **K** – множество входных символов; **X** – множество состояний автомата A; $x_н$ – начальное состояние, $x_н \in \mathbf{X}$; φ:$\mathbf{K}\times\mathbf{X}\rightarrow\mathbf{X}$– частичное переходное отображение.

Автомат A задает все возможные последовательности функций, выполняемые цифровой системой, т.е. множество допустимых слов **F**. Будем называть автомат A автоматом функций. Спецификации на входные взаимодействия цифровой системы могут определяться заданием множества входных взаимодействий, соответствующих каждой функции k, $k \in \mathbf{K}$ [6], и автомата функций A.

В качестве примера рассмотрим цифровую систему управления некоторым роботом, который должен двигаться под управлением последовательности поступающих командных кадров, каждый из которых задает движение робота по отрезку прямой заданной длины и направления или дуге окружности с заданными параметрами. Движение робота осуществляется в рамках некоторого прямоугольника, за границы которого робот выходить не может, и его начальное положение задано в центре прямоугольника. Для такого простейшего случая перечень функций, выполняемых цифровой системой управления, будет включать в себя движение по отрезку прямой $k_{отр}$ и движение по дуге окружности $k_{дуг}$, причем для обеих функций существует множество значений допустимых параметров. Всегда ли будет существовать произведение $k_i \cdot k_j$, т. е. будет ли всегда допустимо выполнение k_j после k_i? Возможность выполнения функции движения по отрезку прямой или дуге окружности будет существовать, если это движение не выводит робота за пределы заданного прямоугольника, т.е. фактически зависит от начального положения робота (от предыстории выполнения предыдущих функций) и параметров функции движения.

Разделим каждую из функций $k_{отр}$ и $k_{дуг}$ на подфункции: $k'_{отр}$, $k''_{отр}$ и $k'_{дуг}$, $k''_{дуг}$, где $k'_{отр}$ и $k'_{дуг}$ – функции полного выполнения движения по отрезку прямой или дуге окружно-

сти; $k''_{\text{отр}}$ и $k''_{\text{дуг}}$ – функции движения до границы заданного прямоугольника, включая движение нулевой длины. В этом случае все произведения, где первыми и вторыми сомножителями являются $k'_{\text{отр}}$, $k''_{\text{отр}}$, $k'_{\text{дуг}}$, $k''_{\text{дуг}}$, существуют.

Таким образом, с помощью модификации множества выполняемых цифровой системой функций **K**, наиболее общий случай 3 приведен к случаю 2, когда произведение $f' \cdot f''$ определено, если f' и f'' могут быть представлены как $f' = k_{i_1} \cdot k_{i_2} \cdot \ldots \cdot k'$, $f'' = k'' \cdot k_{j_2} \cdot \ldots \cdot k_{j_i}$, причем произведение $k' \cdot k''$ существует. Такое задание множества выполняемых функций **K′** существенно облегчает задание множества отладочных тестов. Далее будем рассматривать модифицированный алфавит функций **K′** как алфавит **K**. В связи с тем что в цифровых системах с конечным алфавитом выполняемых функций множество внутренних состояний всегда конечно, преобразование начального алфавита выполняемых функций в модифицированное, где вопрос существования произведения двух функций не зависит от предыстории, всегда возможен. Тогда для каждого k_i, $k_i \in$ **K**, имеется подмножество $\mathbf{K}^i$, $\mathbf{K}^i \subseteq$ **K,** такое, что $k_i \cdot k_j$, где $k_j \in \mathbf{K}^i$, всегда существует. В этом случае на множестве слов **F** задано отношение эквивалентности o такое, что $(f_1, f_2) \in$ o тогда и только тогда, когда f_1 и f_2 кончаются на одну букву.

Отношение эквивалентности o определяет разбиение **F** на классы эквивалентности $\mathbf{F}^i$, $i = 1, 2, \ldots, n$, где n – мощность алфавита **K**. При отождествлении классов $\mathbf{F}^i$, $i = 1, 2, \ldots, n$, и $\mathbf{F}^x$, $x \in$ **X**, и соответственно множества внутренних состояний автомата (2) и множества **K** автомат A может быть заменен автоматом

$$A' = (\mathbf{K}, \mathbf{K}, x_{\text{н}}, \varphi), \tag{3}$$

где **K** – множество входных символов и множество внутренних состояний; $x_{\text{н}}$ – начальное состояние, $x_{\text{н}} \in \mathbf{K}$; $\varphi: \mathbf{K} \times \mathbf{K} \to \mathbf{K}$ – частично определенное переходное отображение. Каждое внутреннее состояние k, $k \in \mathbf{K}$, задает множество слов, заканчивающихся на букву k.

Представление автомата функций в виде (3) удобно как при составлении спецификаций на входные взаимодействия, так и при использовании для выбора отладочных тестов.

Методика формирования автомата функций. Автомат функций вида (3) вместе с множествами $\mathbf{M}^k$ входных взаимодействий, соответствующих каждой функции k, является формальной спецификацией входных взаимодействий **M**. При этом множество входных взаимодействий может быть представлено следующим образом:

$$\mathbf{M} = (\mathbf{K}, A', \{\mathbf{M}^k | k \in \mathbf{K}\}),$$

где **K** – алфавит функций; A′ – автомат функций вида (3), определяющий допустимые последовательности функций **F**; $\mathbf{M}^k$ – множество входных взаимодействий, соответствующих k-й функции цифровой системы или блока.

Методика получения автомата функций по неформальному описанию работы цифровой системы или блока, приводимому в ТЗ, состоит в следующем.

1. Составить начальный вариант перечня выполняемых системой функций и описать соответствующие входные взаимодействия.

2. Выделить пары функций, возможность последовательного выполнения которых зависит от предыстории работы цифровой системы.

3. Разбить вторые элементы выделенных пар функций на подфункции либо по физическому смыслу, либо в зависимости от состояния системы, в котором инициируется второе входное взаимодействие пары, таким образом, чтобы можно было задать возможные пары функций независимо от предыстории работы.

4. Составить автомат функций A′. Одним из способов задания такого автомата функций является указание для каждой функции $k_i \in \mathbf{K}$ набора функций $\mathbf{K}_j$, каждая функция из которого может быть выполнена после k_i.

Следует отметить, что выделение набора функций цифровой системы в определенной степени процесс субъективный. Так, в случае рассмотренного робота подача управляющего кадра может быть представлена как последовательный ввод ряда чисел; ввод кадра и его отработка могут быть представлены как разные функции. Однако, несмотря на различный вид автомата функций A′ при выборе различных множеств **K**, в связи с однозначностью требований к поведению цифровой системы получаемая спецификация входных взаимодействий приведет к проверке функционирования отлаживаемой системы одинаковым образом.

Формализация подхода при выборе отладочных тестов для проверки выполнения функций. Выполнение цифровой системой функции k инициируется одним из входных взаимодействий множества $\mathbf{M}^k$. В случае если разработчик выделил достаточно крупные функции, то в зависимости от параметров функции ее выполнение может осуществляться различными блоками программного обеспечения в различных режимах работы блоков цифровой системы. В связи с этим при формировании набора отладочных тестов проекта желательно проверить правильность функционирования проекта для различных наборов параметров каждой функции k.

Представим множество значений данных $\boldsymbol{D}$ входных взаимодействий, обусловливающих выполнение цифровой системой определенной функции k, как $\boldsymbol{D}=\mathrm{U}_{i=1}^{n}\boldsymbol{D}_i$, $\boldsymbol{D}_i\cap\boldsymbol{D}_j=\varnothing$ при $i\neq j$. Каждое подмножество $\boldsymbol{D}_i$, в свою очередь, может быть разбито на непересекающиеся подмножества $\boldsymbol{D}_{ij}$ и т.д. Разбиение множества значений данных должно осуществляться исходя из физического смысла задачи таким образом, чтобы входные взаимодействия с данными различных подмножеств $\boldsymbol{D}_i$ обусловливали несколько различных алгоритмов их обработки. Самой большой группой являются множества $\mathbf{M}^k$, $k \in \mathbf{K}$, входных взаимодействий для выполнения цифровой системой функции k.

Математическим аналогом понятия «близости» входных взаимодействий является отношение эквивалентности [9]. Пусть имеется конечное множество $\boldsymbol{\Lambda}$ отношений эквивалентности λ. В частности, множество $\boldsymbol{\Lambda}$ обязательно включает в себя отношение эквивалентности λ′, λ″.

Пара входных взаимодействий эквивалентны друг другу, т.е. $(\mu_1, \mu_2) \in \lambda'$ тогда и только тогда, когда $\mu_1 \in \mathbf{M}^k$ и $\mu_2 \in \mathbf{M}^k$. Именно это отношение эквивалентности позволяет выделить входные взаимодействия, обусловливающие выполнение функции k, в множество $\mathbf{M}^k$.

Пара входных взаимодействий эквивалентны друг другу, т.е. $(\mu_1, \mu_2) \in \lambda''$, где $\mu_1 \in \mathbf{M}^k$, $\mu_2 \in \mathbf{M}^k$, тогда и только тогда, когда набор данных d_1 и d_2, присутствующих в μ_1, μ_2, принадлежит одной и той же подобласти $\boldsymbol{D}_i$ данных, где $\mathrm{U}_{i=1}^{n}\boldsymbol{D}_i=\boldsymbol{D}$, $\boldsymbol{D}_i\cap\boldsymbol{D}_j=\varnothing$ при $i\neq j$, $\boldsymbol{D}$ – область данных для $\mathbf{M}^k$. Так, возможен случай, что $(\mu_1, \mu_2) \in \lambda''$ тогда и только тогда, когда μ_1 и μ_2, заданные в виде (1), отличаются в ряде событий только значениями z'_j или z''_j, соответствующими различным данным на информационных входах, обрабатываемых по одинаковому алгоритму и изменяющими выходные последовательности цифровой системы или ее блока только в части значений на информационных выходах. Может быть задано несколько отношений эквивалентности такого типа для различных разбиений области данных $\boldsymbol{D}$.

Выбор множества $\boldsymbol{\Lambda}$ отношений эквивалентности должен осуществляться разработчиком исходя из требуемого поведения разрабатываемой цифровой системы и физического смысла задачи. При этом множество $\boldsymbol{\Lambda}$ задается косвенно.

Каждое отношение эквивалентности λ множества $\mathbf{\Lambda}$ задается на своем множестве. Так, отношение λ′ задано на всем множестве $\bar{\mathbf{M}} = \mathrm{U}_{k \in \mathbf{K}} \mathbf{M}^k$. На каждом множестве $\mathbf{M}^k$, являющемся классом эквивалентности $\bar{\mathbf{M}}$ по λ′, задаются свои отношения эквивалентности типа отношения λ″. Так, возможен случай, когда области данных для $\mathbf{M}^k$ есть $\boldsymbol{D} = \boldsymbol{D}^1 \times \boldsymbol{D}^2 \times ... \times \boldsymbol{D}^n$, а на множестве значений $\boldsymbol{D}^i$, $i = 1,\ldots, n$, каждого параметра входных взаимодействий из $\mathbf{M}^k$ определены свои отношения эквивалентности $\lambda_1, \lambda_2,\ldots,\lambda_n$, где $\lambda_1 \in \mathbf{\Lambda}$, $\lambda_2 \in \mathbf{\Lambda}$,…, $\lambda_n \in \mathbf{\Lambda}$. Возможен и другой случай, когда отношение λ_1 определяет разбиение $\boldsymbol{D} = \mathrm{U}_{i=1}^{n} \boldsymbol{D}_i$, $\boldsymbol{D}_i \cap \boldsymbol{D}_{i'} = \varnothing$ при $i \neq i'$, а отношение λ_2 определено только на одном подмножестве или на части подмножеств $\boldsymbol{D}_{i_1}, \ldots, \boldsymbol{D}_{i_l}$, где $\{i_1,\ldots,i_l\} \subset \{1,\ldots,n\}$.

Если на множестве $\mathbf{M}^k$ задано отношение λ_1, $\lambda_1 \in \mathbf{\Lambda}$, то существует разбиение $\mathbf{M}^k$ на классы эквивалентности $\mathbf{M}^{ki}$ по отношению λ_1. Если на некотором $\mathbf{M}^{ki}$ определено отношение λ_2, $\lambda_2 \in \mathbf{\Lambda}$, то для μ, где $\mu \in \mathbf{M}^{ki}$, существует произведение эквивалентностей $\lambda_1 \cdot \lambda_2$, которое всегда является эквивалентностью [9]. Произведения эквивалентностей $\prod_{\lambda_i \in \mathbf{\Lambda}'} \lambda_i$, где $\mathbf{\Lambda}' \subseteq \mathbf{\Lambda}$, которые всегда являются эквивалентностями, позволяют провести классификацию множества $\mathbf{M}^k$ с той степенью подробности, которая необходима разработчику, определившему множество $\mathbf{\Lambda}$. Входные взаимодействия каждого класса эквивалентности, определяемого максимально возможными произведениями $\prod_{\lambda_i \in \mathbf{\Lambda}'} \lambda_i$, где $\mathbf{\Lambda}' \subseteq \mathbf{\Lambda}$, различаются только значениями ряда t_j в (1) в пределах, не нарушающих ограничений на допустимые времена событий.

Как уже отмечалось, самыми крупными классами эквивалентности на множестве $\bar{\mathbf{M}}$ являются множества $\mathbf{M}^k$, соответствующие выделению алфавита выполняемых функций $\mathbf{K}$. Так, в случае упомянутого робота на множестве входных взаимодействий для движения по отрезку прямой может быть выделено отношение эквивалентности λ_1, значения признаков которого выделяют подмножества горизонтальных, вертикальных и наклонных отрезков. Если бы в качестве одной из функций цифровой системы управления роботом была выбрана функция движения, определяемая одним поступившим кадром, то тогда можно было бы ввести отношение эквивалентности λ_2, значения признаков которого выделяли бы отрезки прямой и дуги окружности.

Составление набора отладочных тестов для конкретной функции. Рассмотрим множество входных взаимодействий $\mathbf{M}_k$, инициирующих выполнение цифровой системой функции k. Несмотря на то что все входные взаимодействия множества инициируют выполнение одной и той же функции k, ее выполнение может осуществляться поразному с использованием различающихся в какой-то степени алгоритмов и, соответственно, различных режимов работы аппаратного обеспечения и различных ветвей программного обеспечения. При этом все множество входных взаимодействий может быть представлено как объединение непересекающихся подмножеств, каждое из которых инициирует выполнение специфического варианта функции k. При выборе множества отладочных тестов желательно предусмотреть проверку правильности выполнения каждого такого специфического варианта.

Разработчик для каждой функции формирует набор признаков $\zeta_1, \zeta_2, \ldots, \zeta_n$ и алфавиты их значений. Пусть имеется конечное множество признаков $\zeta_1, \zeta_2, \ldots, \zeta_n$, каждый из которых может принимать конечное множество значений $\mathbf{Z}^*_1, \mathbf{Z}^*_2, \ldots, \mathbf{Z}^*_n$. Тогда взаимосвязь признаков можно представить двудольным графом G(**V**,**E**). Множество вершин этого графа есть $\nu = \{\zeta_1,\ldots,\zeta_n\} \cup \{\mathrm{U}_{i=1}^{n} \mathrm{Z}_i^*\}$. Одна группа вершин представляет собой множество признаков, а другая группа – возможные значения каждого признака. Множество ребер $\mathbf{E} = \mathbf{E}^1 \cup \mathbf{E}^2$, $\mathbf{E}^1 \cap \mathbf{E}^2 = \varnothing$. Ребра множества $\mathbf{E}^1$ соединяют вершину ζ_i с вер-

шиной z, если $z \in Z_i^*$. Ребра множества $\mathbf{E}^2$ соединяют вершину z_i^j, где $z_i^j \in Z_i^*$, с вершиной ζ_l, если признак ζ_l определен для входного взаимодействия μ в случае, когда для этого входного взаимодействия $\zeta_i = z_i^j$.

Множество отладочных тестов считается полным, если для любого признака ζ_i, $i = 1, \ldots, n$, и $z \in Z_i^*$ в множестве отладочных тестов найдется, по крайней мере, одно входное взаимодействие, для которого $\zeta_i = z$. Минимальным полным множеством отладочных тестов назовем такое, число тестов в котором минимально. Задача составления минимального полного множества отладочных тестов для проверки выполнения каждой функции состоит в выборе сочетаний значений признаков для каждого отладочного теста множества.

В работе [10] показано, что минимальная мощность минимального полного множества отладочных тестов есть $\max|Z_i^*|$, $i = 1, \ldots, n$, где n – количество признаков $\zeta_1, \ldots, \zeta_n$; максимальная мощность минимального полного множества отладочных тестов есть $\sum_{i=1}^{n} (|Z_i^*| - 1) + 1$.

Последовательность действий для формирования множества тестовых примеров для отладки проектов цифровых систем. Рассмотрим последовательность действий для формирования множества тестовых примеров для отладки проектов цифровых систем, функционирование которых может быть представлено как последовательность выполнения функций из конечного алфавита.

1. Разработчик формирует начальный, конечный по мощности, перечень функций, выполняемых цифровой системой, а именно алфавит $\mathbf{K}$.

2. Для каждой функции $k_i \in \mathbf{K}$ разработчик определяет, какие функции $k_j \in \mathbf{K}$, $j = 1, \ldots, n$, где n – количество элементов в алфавите $\mathbf{K}$, могут выполняться после k_i. При этом для каждого k_i выделяется подмножество $\{k_{j_1}, \ldots, k_{j_m}\} \subset \{k_{i_1}, \ldots, k_{i_n}\}$, для каждого элемента k_{jl} которого существование произведения $k_i \blacksquare k_{j_l}$ зависит от некоторых условий, т.е. некоторой предыдущей последовательности функций, или от внутреннего состояния цифровой системы. Затем каждая функция k_{j_l} разбивается на подфункции $k_{j_l}^{\,1}, \ldots, k_{j_l}^{\,q}$. Если выполнение функции k_{j_l} инициируется одним из входных взаимодействий множества $\mathbf{M}_{j_l}$, то это множество разбивается на непересекающиеся подмножества $\mathbf{M}_{j_l}^r$, где $r = 1, \ldots, q$, и $\mathbf{M}_{j_l} = \mathrm{U}_{r=1}^{q} \mathbf{M}_{j_l}^r$. Таким образом формируется новый (также конечный по мощности) перечень функций, выполняемых цифровой системой, а именно модифицированный алфавит $\mathbf{K}_{\text{мод}}$. При дальнейшем описании будем рассматривать этот модифицированный алфавит как алфавит функций, выполняемый цифровой системой, и будем обозначать его $\mathbf{K}$.

3. Для полученного алфавита функций $\mathbf{K}$ и частичной полугруппы $<\mathbf{F}, \cdot>$ с конечным множеством $\mathbf{K}$ порождающих элементов k строится граф переходов $G(\mathbf{V},\mathbf{E})$ автомата функций $\mathbf{A}_\text{ф}$. В графе $G(\mathbf{V},\mathbf{E})$ каждая вершина $v \in \mathbf{V}$ помечена одним из элементов k алфавита $\mathbf{K}$, т.е. представляет все слова $\mathbf{F}^k \subset \mathbf{F}$, заканчивающиеся элементом k алфавита функций. Исключение – вершина $v_{\text{нач}}$, соответствующая пустому слову и представляющая собой состояние, в котором цифровая система оказывается после включения питания. Множество ребер $e_{ij} \in \mathbf{E}$ графа $G(\mathbf{V},\mathbf{E})$ определяет возможные произведения $k_i \blacksquare k_j$, т.е. для каждой вершины, помеченной k_i, выходят ребра в те вершины k_j, которые помечены функцией алфавита $\mathbf{K}$, которая может быть выполнена после функции k_i, т.е. условием наличия ребра e_{ij} является существование произведения $k_i \blacksquare k_j$.

Одним из возможных методов задания графа $G(\mathbf{V},\mathbf{E})$ является перечень пар (k_i, k_j), произведение которых существует. Такой перечень удобно задавать в виде таблицы, в которой для каждой функции k_i как первого элемента пары указываются вторые элементы пары k_l^i, $l = 1,\ldots, q_i$. Набор отладочных тестов должен включать последовательное выполнение всех заданных в таблице пар функций.

4. Как отмечалось, выполнение одной и той же функции цифровой системы может осуществляться по-разному, с использованием различных ветвей программного обеспечения и различных режимов аппаратных средств. Поэтому выполнение каждой функции при выполнении набора отладочных тестов должно осуществляться с различными наборами признаков $\zeta_1, \zeta_2, \ldots, \zeta_n$. Выбранные различные сочетания признаков определяют количество необходимых выполнений функции k_i.

Заключение. При формировании множества тестовых примеров для отладки проектов цифровых микроэлектронных систем необходимо, чтобы система тестов содержала все возможные произведения функций k_i, k_j, а также кратное выполнение всех функций k с заданными наборами признаков $\zeta_1, \zeta_2, \ldots, \zeta_n$, т. е. выполнение каждой функции k столько раз, сколько наборов признаков для нее определено.

Разработка практического алгоритма формирования минимального набора отладочных тестов проектов цифровых микроэлектронных систем на основе проведенного теоретического исследования является текущей задачей.

Литература

1. ***Keresztes P., Tukacs A., Török M.*** A multi valued logic VHDL package for switch level simulation of novel digital CMOS Circuits // 2018 Inter. Conf. on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (Bhubaneswar, India, 2018). 2018. P. 25–28.

2. ***Lin Yi-Li, Su Alvin W.Y.*** Functional verification for SoC software/hardware Co-design: from virtual platform to physical platform // 2011 IEEE International SOC Conference. 2011. P. 201–206.

3. Software Hardware Co-Simulation and Co-Verification in Safety Critical System Design / ***Shi Jin, Liu, Weichao, Jiang Ming el al.*** // 2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation. 2013. P. 71–74.

4. ***Nguen M.D.*** Hardware/software formal co-verification using hardware verification techniques // Fourth Int. Conf. on Communications and Electronics. 2012. P. 465–470.

5. Выбор платформ прототипирования для СФ-блоков и подсистем СНК / ***Е.М. Абрамов, А.В. Егоров, А.О. Козлов и др.*** // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 8. С. 76–83.

6. Методы и алгоритмы для логико-топологического проектирования микроэлектронных схем на вентильном и межвентильном уровне для перспективных технологий с вертикальным затвором транзистора / ***Г.А. Иванова, Д.И. Рыжова, С.В. Гаврилов и др.*** // Микроэлектроника. 2019. Т. 48. № 3. С. 201–210.

7. ***Иванников А.Д., Стемпковский А.Л.*** Формализация задачи отладки проектов цифровых систем // Информационные технологии. 2014. № 9. С. 3–10.

8. ***Оллонгрен А.*** Определение языков программирования интерпретирующими автоматами. М.: Мир, 1977. 288 с.

9. ***Мальцев А.И.*** Алгебраические системы. М.: Наука. 1970. 392 с.

10. ***Иванников А.Д.*** Формирование отладочного набора тестов для проверки функций цифровых систем управления объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 12. С. 795–801.

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.; после доработки 09.06.2020 г.; принята к публикации 16.06.2020 г.

Иванников Александр Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), adi@ippm.ru

Стемпковский Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, научный руководитель Института проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (Россия, 124365, Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, 3), ippm@ippm.ru

References

1. Keresztes P., Tukacs A., Török M. A Multi Valued Logic VHDL Package for Switch Level Simulation of Novel Digital CMOS Circuits. *2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE)*, Bhubaneswar, India, 2018, pp. 25–28.

2. Lin Yi-Li, Su Alvin W.Y. Functional Verification for SoC Software/Hardware Co-Design: From Virtual Platform to Physical Platform. *2011 IEEE International SOC Conference (SOCC)*, 2011, pp. 201–206.

3. Shi Jin, Liu Weichao, Jiang Ming el al. Software hardware co-simulation and co-verification in safety critical system design. *2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT). 2013,* pp. 71–74.

4. Nguen M.D. Hardware/software formal co-verification using hardware verification techniques. *Fourth Int. Conf. on Communications and Electronics (ICCE).* 2012, pp. 465–470.

5. Abramov E.M., Egorov A.V., Kozlov A.O., Poperechniy P.S., Putrya F.M., Frolova S.E. *Prototype Platform Choosing for IP Blocks and SoC Subsystems. Voprosi Radioelectroniki = Issues of radio electronic*s, 2017, no. 8, pp. 76–83. (in Russian).

6. Ivanova G.A., Rizhova D.I., Gavrilov S.V., Vasilev N.O., Stempkovskiy A.L. Methods and algorithms of microcircuits gate and intergate level logic-topological design for modern technologies with transistor vertical gate. *Microelectronika = Microelectronics*, 2019, vol. 48, no. 3, pp.201–210. (in Russian).

7. Ivannikov A.D., Stempkovsky A.L. Formal model of digital system design debugging task. *Informacionnye tehnologii = Information technologies***,** 2014, no. 9, pp. 3–10. (in Russian).

8. Ollongren A. *Programming languages definition by interpretive automata*. Moscow, Mir Publ., 1977. 288 p. (in Russian).

9. Maltcev A.I. *Algebraic systems*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 392 p. (in Russian).

10. Ivannikov A.D. Debugging input set generation for testing of control digital systems functions. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 795–801. (in Russian).

Received 22.04.2020; Revised 09.06.2020; Accepted 16.06.2020.

Information about the authors:

Alexander D. Ivannikov – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head Scientist of CAD Department of Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), adi@ippm.ru

Alexander L. Stempkovskiy – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Member of Russian Academy of Sciences, Scientific Supervisor of Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (Russia, 124365, Moscow, Zelenograd, Sovetskaya st., 3), ippm@ippm.ru

УДК 621.3.049.774 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-320-329

Стохастическая оптимизация RLC-модели вывода корпуса с целью увеличения ее достоверности на высоких частотах

Е.Н. Белов, А.В. Швец

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия
АО «ПКК Миландр», г. Москва, Россия

Belov.e@milandr.ru

Матрица рассеивания многополюсника (или *S*-параметры) широко используется для описания электрических схем в виде черного ящика. Применение *S*-параметров позволяет охарактеризовать схему в любом частотном диапазоне. Однако стандартные симуляторы электрических цепей не работают с *S*-параметрами. Кроме того, чем больше выводов у схемы и чем больший частотный диапазон требуется охарактеризовать, тем бóльшего размера матрицу приходится решать. В работе рассмотрена классическая модель вывода корпуса на основе собственной емкости, индуктивности и емкости связи между соседними выводами, которую можно построить на основе имеющихся *S*-параметров. Однако в данной модели нельзя учесть ВЧ- и СВЧ-эффекты, поэтому она имеет низкую точность на высоких частотах. Приведен метод оптимизации классической модели на основе стохастического алгоритма оптимизации с целью достижения большей точности модели на высоких частотах. Применение данной оптимизации позволяет повысить точность модели на высоких частотах более чем в 3 раза по сравнению с классической RLC-моделью.

***Ключевые слова*:** линия передачи RLGC; *S*-параметры; стохастическая оптимизация; Spectre; функция штрафа; импеданс

***Для цитирования*:** Белов Е.Н., Швец А.В. Стохастическая оптимизация RLC-модели вывода корпуса с целью увеличения ее достоверности на высоких частотах // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 320–329. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-320-329

© Е.Н. Белов, А.В. Швец, 2020

Stochastic Optimization of RLC-Model of IC Package Pin to Increase Its Veracity at High Frequencies

E.N. Belov, A.V. Shvets

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia
JSC «ICC Milandr», Moscow, Russia

Belov.e@milandr.ru

Abstract: The scattering matrix of a multipole switch or the matrix of S-parameters is widely used to describe the electrical circuits in the form of a black box. The application of *S*-parameters permits to characterize the circuit in any frequency range. However, the standard simulators of electric circuits do not work with *S*-parameters. In addition, with the increase of the number circuit's pins and the working frequency range, the complexity of the matrix grows in times. The classical IC package pin's model based on self-capacitance, inductance and capacitance of the connection between the adjacent terminals, which can be constructed from the existing *S*-parameters, has been considered in this work. As a result it is impossible to take into account the RF and microwave effects. In this model it is characterized by low accuracy at high frequencies. The method of the classical model optimization, based on the stochastic optimization algorithm with the purpose to achieve higher accuracy of the model, has been presented. The application of this optimization allows a more than 3 times increase of the model accuracy compared with the classical RLC-model.

Keywords: transmission line RLGC; scattering parameters; stochastic optimization; Spectre; fitness function; impedance

***For citation*:** Belov E.N., Shvets A.V. Stochastic optimization of RLC-model of IC package pin to increase its veracity at high frequencies. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 320–329. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-320-329

Введение. При уменьшении размеров кристаллов и увеличении их рабочих частот начинают проявляться негативные эффекты, связанные с целостностью сигнала, например перекрестные помехи, резонансы, вызываемые одновременным переключением цифровых блоков, шумы и др. Эти эффекты усложняют процесс разработки внутрикристальной топологии высокочастотных микросхем, требования к корпусам микросхемы, а также разводке печатной платы. И если плата является конечным продуктом либо функциональным узлом системы, то один и тот же корпус можно использовать для корпусирования разных микросхем. Разработка схемотехники с учетом параметров используемого корпуса позволяет сэкономить на создании нового корпуса и минимизировать его негативное влияние на работу микросхем. Отсюда возникают две задачи: 1) выбор эквивалентной схемы корпуса и создание модели для симуляции, которая будет учитывать параметры корпуса; 2) определение параметров модели в широком диапазоне рабочих частот, в том числе частот предполагаемой микросхемы.

В настоящей работе рассматривается алгоритм оптимизации стохастическим методом классической модели, использующей понятия собственной емкости вывода индуктивности проводника и емкости связи с целью достижения большего соответствия модели исследуемому корпусу с минимальным повышением ее вычислительной сложности.

Построение модели корпуса для программы моделирования электрических цепей. В работах [1, 2] проведено исследование корпуса для определения параметров его межсоединений. В работе [3] исследованы межсоединения корпуса и их влияние на качество передачи сигнала на уровне печатной платы. Процесс подготовки модели корпуса для схемотехнического редактора условно делится на два больших этапа:

1) получение матрицы *S*-параметров выводов корпуса расчетным методом или путем измерения реального прибора. Желательно провести и расчет, и измерения, чтобы результаты, полученные двумя независимыми методами, подтверждали и дополняли друг друга;

2) выбор соответствующей модели межсоединений, в которой будут учитываться внутренние проводники корпуса, проволока классической технологии разварки кристаллов или элементы разварки технологии flip-chip, а также внешние проводники, с помощью которых микросхема крепится к плате; преобразование полученной на первом этапе матрицы *S*-параметров, т.е. матрицы комплексных чисел размера $2N \times 2N$, где N – количество выводов корпуса, для каждого значения частоты к параметрам используемой для симуляции модели. При этом следует учитывать, что каждому значению частоты матрицы *S*-параметров будут соответствовать свои значения емкостей, индуктивностей и сопротивлений модели.

В настоящей работе для экстракции параметров корпуса проводится трехмерное электромагнитное моделирование в частотной области. Трехмерная модель корпуса строится на основе имеющихся чертежей корпуса и внутренней разводки межсоединений. На основе полученных при электромагнитном моделировании *S*-параметров строится пригодная для программы моделирования электрическая цепь. Для простоты рассматриваются только два центральных вывода одной из сторон корпуса.

Самый простой вариант – моделирование электрической схемы с учетом полученных при электромагнитном моделировании *S*-параметров. Однако не все программы моделирования работают напрямую с *S*-параметрами. К тому же размер матрицы *S*-параметров прямо пропорционален количеству портов модели и частотному диапазону, поэтому расчет по такой модели во временной области (анализ переходных процессов) существенно увеличивает время моделирования. В процессе разработки блоков следует избегать увеличения времени моделирования, однако это может быть допустимо при валидации конечного решения. Таким образом, необходима упрощенная модель, поведение которой будет соответствовать поведению, описываемому *S*-параметрами, но вычислительная сложность будет на порядок ниже. Наиболее распространенная модель тракта линии передачи, которым является проводник вывода корпуса, – RLGC-модель линии передачи [4, 5]. Преимущество данной модели состоит в возможности ее работы как с распределенными, так и с сосредоточенными параметрами. Модель с сосредоточенными параметрами пригодна для симуляции и имеет достаточную степень достоверности для низких и средних частот. Используя RLGC-модель как основу, можно получить более простые или более сложные модели путем изъятия либо добавления новых элементов.

На рис.1 представлена эквивалентная RLC-модель вывода корпуса. Это упрощенная RLGC-модель, где выводы Inner и Outer соответствуют внутреннему и внешнему контактам корпуса, R_s и L_s – сопротивление и индуктивность проводника вывода корпуса, C_{GND} – емкость вывода относительно земельного полигона корпуса, C_p – емкость связи с соседним выводом. Сопротивление, имитирующее утечки емкости между выводом и землей, отсутствует ввиду большого номинала и низкого влияния на динамические процессы.

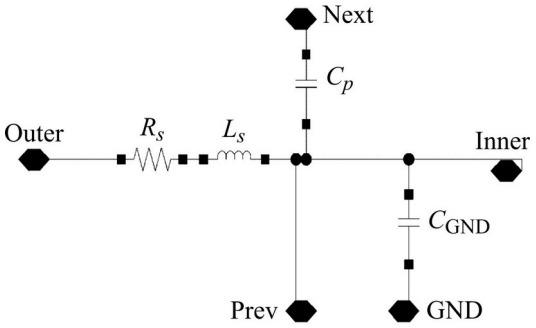


Рис.1. Стандартная эквивалентная RLC-модель вывода корпуса
Fig.1. Classic RLC equivalent circuit of package pin

Индуктивность связи в RLC-модели отсутствует в силу практической сложности ее измерения, а параметры разварочной проволоки не учитываются, так как положение проволоки в корпусе и ее параметры должны определяться для каждого конкретного варианта разварки отдельно.

На рис.2 представлены частотные зависимости импедансов (коэффициенты матриц *Z*- и *Y*-параметров) в диапазоне частот 1–10 ГГц для центрального вывода одной из сторон исследуемого корпуса. На основе представленных параметров по следующим формулам строится эквивалентная RLC-модель вывода:

$$C = \text{imag}(1/Z_{22})/(2\pi f), \quad (1)$$

$$L = \text{imag}(1/Y_{11})/(2\pi f), \quad (2)$$

$$R(DC) = \text{real}(1/Y_{11}), \quad (3)$$

где Y_{ij} и Z_{ij} – параметры матрицы *Z*- и *Y*-параметров соответственно (*Y*-параметр представлен в минус первой степени для удобства восприятия).

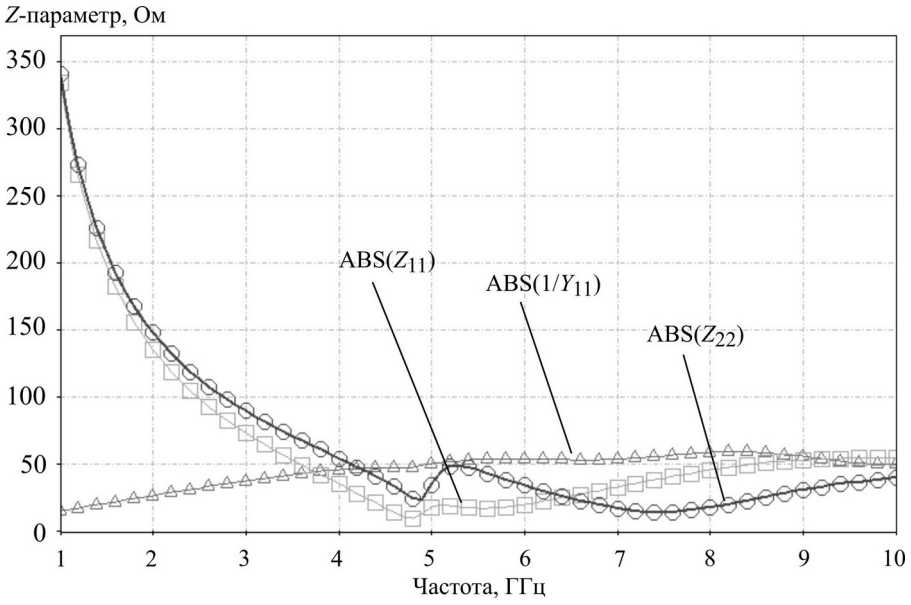


Рис.2. Z-параметры центрального вывода одной из сторон корпуса
Fig.2. Z-parameters of central pin of package's side

Однако данные зависимости не похожи на частотные зависимости индуктивности или емкости в чистом виде. Так, в диапазоне частот 1–10 ГГц в рамках классической RLC-модели индуктивность вывода изменяется в диапазоне 1,8–2,4 нГн, а собственная емкость меняется в диапазоне 0,4–0,8 пФ. По достижении определенной частоты RLC-модель перестает соответствовать физическому объекту. Также импеданс исследуемого вывода в диапазоне частот 4,5–7,5 ГГц не оптимизирован (см. рис.2).

Оптимизация классического подхода. Классическую RLC-модель можно использовать на низких и средних частотах, на высоких частотах ее применять не рекомендуется. Заменяя элементарные элементы данной модели более сложными резонансными цепочками, можно добиться большего соответствия импеданса модели импедансу реального вывода. Однако возникает проблема определения параметров модели, так как неизвестных элементов в модели окажется больше, чем возможных уравнений. Цепь из простейших элементов, суммарный импеданс которых будет точно соответствовать импедансу вывода корпуса на всем диапазоне рабочих частот, может оказаться достаточно большой и состоять из тысячи или десятков тысяч элементов и более. Построенная на основе таких цепей модель будет иметь вычислительную сложность, сопоставимую со СБИС, т.е. переход от *S*-параметров к эквивалентной модели повышает уровень вычислительной сложности модели и увеличивает время моделирования. Простой в плане вычислительной сложности и одновременно точно соответствующей исходным *S*-параметрам цепи может не существовать, и ее поиск является некорректно поставленной задачей [6], которая не имеет решения.

Для решения подобных задач существуют следующие группы методов [7]: итерационные, стохастические [8] и эволюционные алгоритмы [9]. Для нахождения параметров цепи (рис.3) будем применять стохастический метод [10], основанный на представленном на рис.4 алгоритме. В начале работы алгоритма параметры элементов цепи выбираются случайным образом, на каждой итерации происходит случайное изменение параметров элементов согласно формуле

$$X_k = X_{k-1}\,(1+CM),$$

где X – параметр элемента (сопротивление, индуктивность или емкость); k – номер итерации; C – коэффициент изменения; M – случайное число в диапазоне [– 1:1].

Далее для вновь полученного решения рассчитывается функция штрафа по формуле

$$X_i = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left(\left(R(\omega_n)-R\right)^2+\left(\chi(\omega_n)-\chi\right)^2\right)},$$

где N – количество точек (используемых значений частот); R – действительная часть импеданса; χ – мнимая часть импеданса; ω – частота.

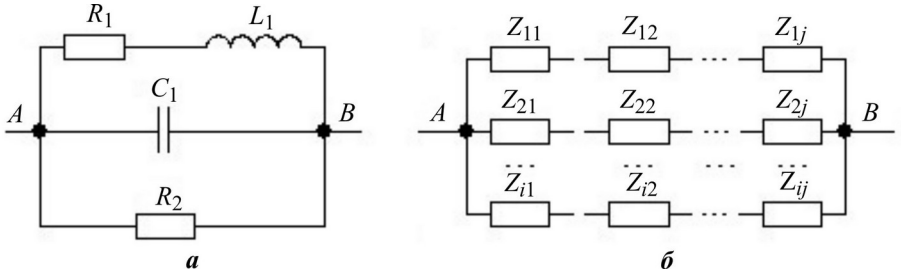


Рис.3. Ячейка оптимизируемой цепи (*а*) и оптимизируемая цепь (*б*)
Fig.3. Cell of the optimized circuit (*a*) and optimized circuit (*b*)

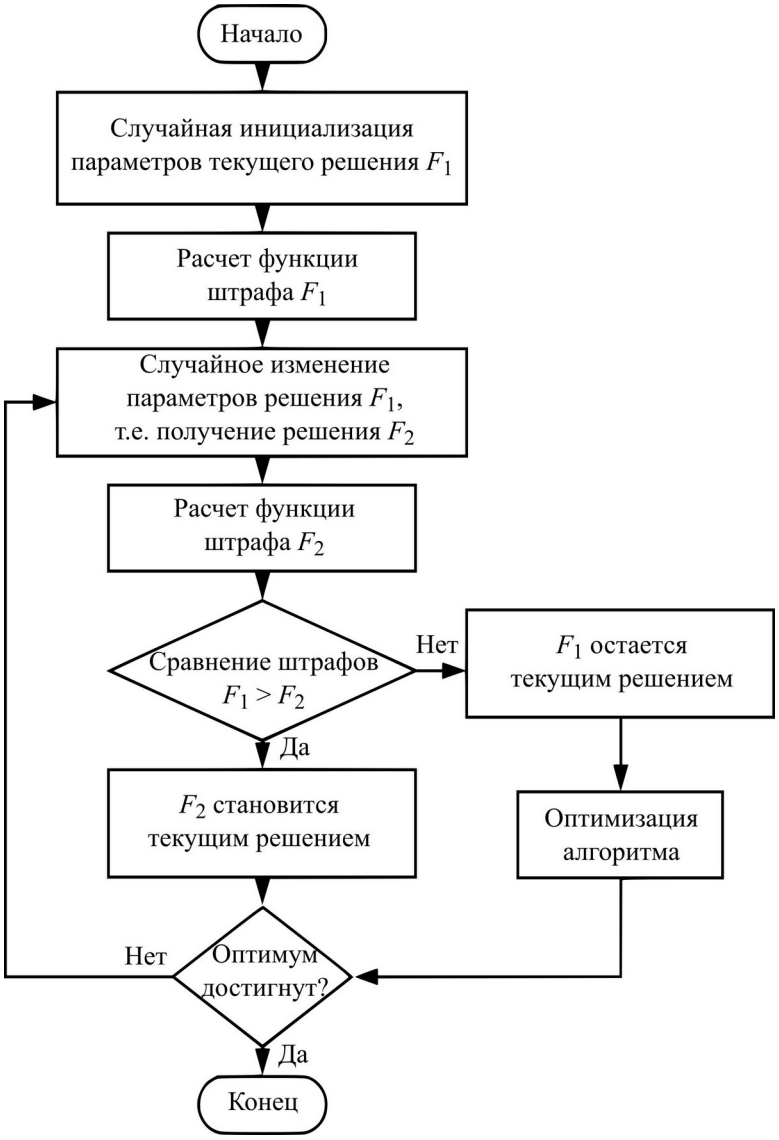


Рис.4. Этапы решения задачи оптимизации стохастическим методом
Fig.4. Stages of solving the optimization problem by the stochastic method

Если новое решение оказывается лучше, оно переходит на следующую итерацию. В противном случае на новую итерацию переходит старое решение, а параметры алгоритма при необходимости оптимизируются. Если на протяжении множества итераций решение остается неизменным либо функция штрафа решения на итерации $i + 1$ мало отличается от функции штрафа решения итерации i, то алгоритм близок к достижению оптимума. В таком случае требуются дополнительные оптимизации:

– уменьшение коэффициента C, что сузит множество допустимых решений, т.е. новое решение ищется вблизи текущего;

– удаление элементов со слишком большими или маленькими параметрами;

– удаление элементов, вклад которых нивелируется соседними элементами цепи;

– объединение элементов цепи, которые позволяют это делать.

Результат работы данного алгоритма применительно к цепи на рис.3 с параметрами $i = j = 5$ и $C = 1$ – цепь, представленная на рис.5, где блок Z_{self} – эквивалент собственной емкости вывода, блок Z_{mutual} – импеданс связи исследуемого вывода с соседним, блок

Z_{lead} – импеданс проводника вывода. Из 200 начальных элементов, имитирующих емкость связи и собственную емкость вывода, осталось 10 и 11 элементов соответственно. Количество элементов, имитирующих проводник вывода, равно 3. В табл.1 представлены параметры моделей с эталоном – результатом преобразования *S*-параметров на частоте 10 ГГц. Для расчета использовались формулы (1)–(3), RLC-модель более точно соответствует *S*-параметрам по активному сопротивлению, но при этом значительно проигрывает по индуктивности и емкости.

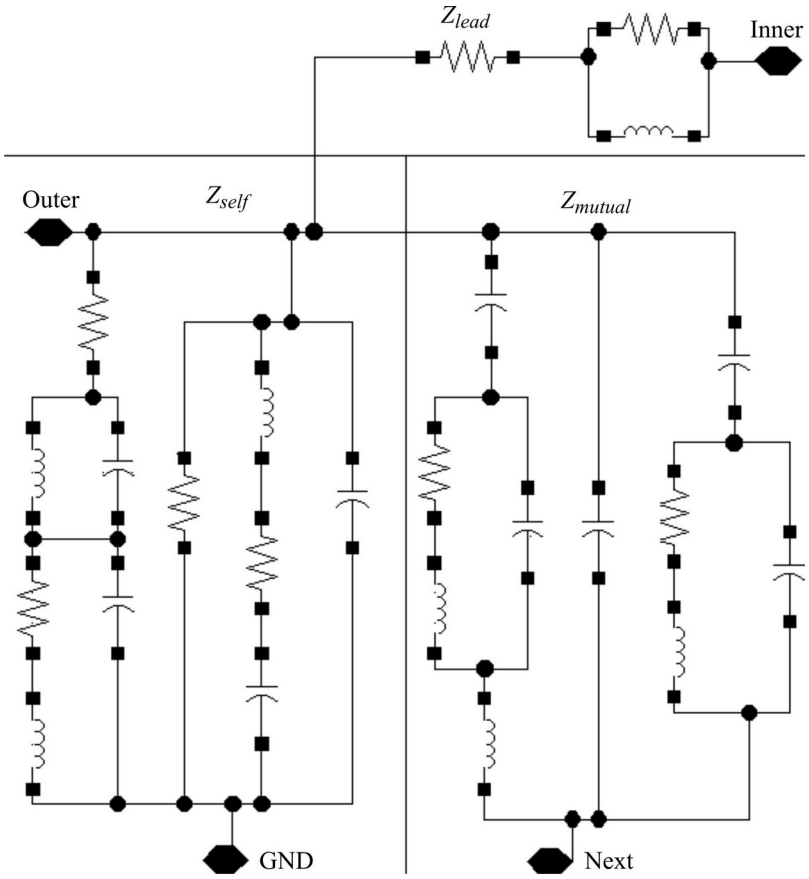


Рис.5. Итоговая модель одиночного вывода корпуса
Fig.5. The final model of the package's pin

Таблица 1

Параметры моделей на частоте 10 ГГц

Table 1

Model's parameters at 10 GHz frequency

Параметр	Классическая RLC-модель	Улучшенная модель	Преобразование *S* - параметров на конкретной частоте
Собственная емкость, пФ	0,49	0,25	0,29
Емкость связи, пФ	0,13	0,30	0,35
Индуктивность, нГн	2,30	1,52	1,67
Сопротивление, Ом	0,13	0,34	0,14

Сравнение результатов. На рис.6 приведены графики частотной зависимости импеданса вывода при разных включениях. Фактически представленные параметры являются паразитными для микросхемы, помещенной в данный корпус, соответственно, их учет при разработке схемотехники позволит улучшить параметры схемы.

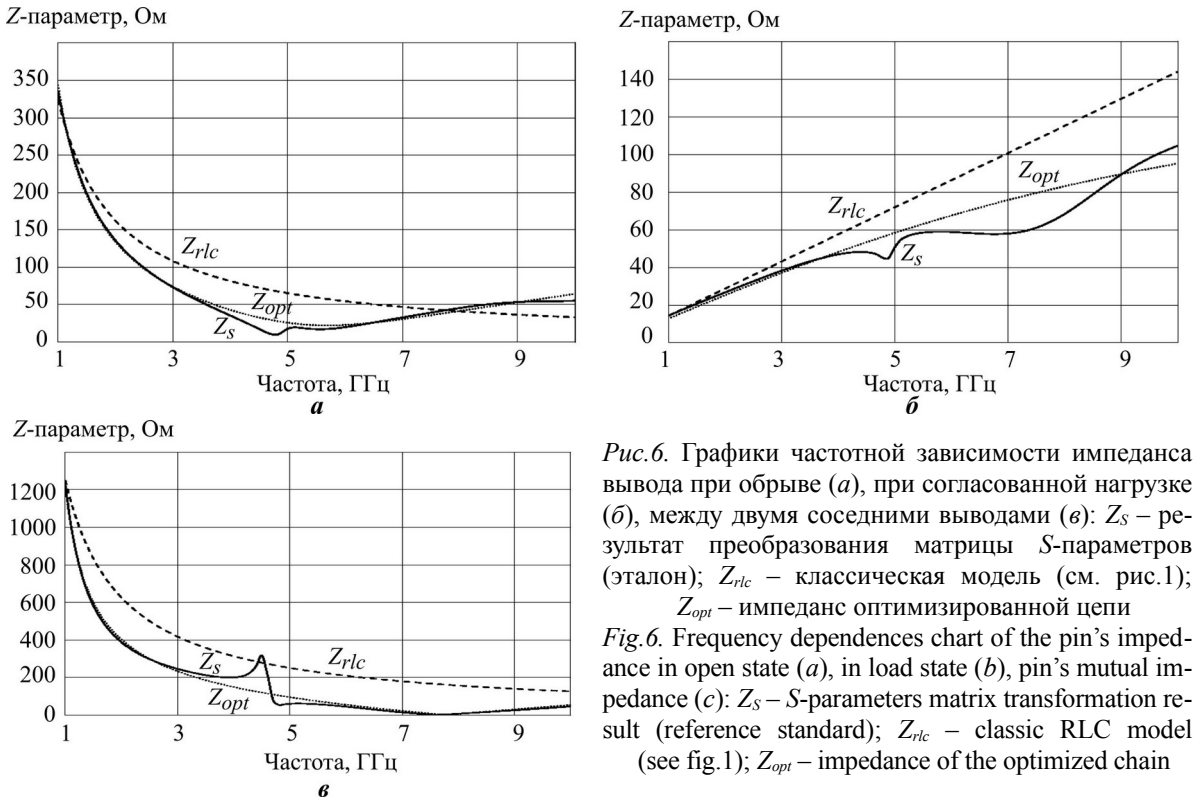


Рис.6. Графики частотной зависимости импеданса вывода при обрыве (*а*), при согласованной нагрузке (*б*), между двумя соседними выводами (*в*): Z_S – результат преобразования матрицы *S*-параметров (эталон); Z_{rlc} – классическая модель (см. рис.1); Z_{opt} – импеданс оптимизированной цепи

Fig.6. Frequency dependences chart of the pin's impedance in open state (*a*), in load state (*b*), pin's mutual impedance (*c*): Z_S – *S*-parameters matrix transformation result (reference standard); Z_{rlc} – classic RLC model (see fig.1); Z_{opt} – impedance of the optimized chain

Поведение оптимизированной модели (см. рис.5) более соответствует *S*-параметрам, чем поведение модели, основанной на классическом подходе. В табл.2 представлены значения среднего относительного отклонения импедансов обеих моделей от эталона и среднеквадратического отклонения (СКО). Эталоном в данном случае являются *S*-параметры, сравнение проводится в частотном диапазоне 1–10 ГГц.

Таблица 2

Сравнение точности моделей

Table 2

Model's accuracy comparison

Параметр	Классическая RLC-модель		Улучшенная модель	
	Среднее отклонение, %	СКО	Среднее отклонение, %	СКО
Входной импеданс	97,24	31,04	18,37	6,02
Импеданс проводника	37,35	29,33	11,55	8,81
Импеданс связи	1084,51	162,06	41,14	34,99

Таким образом, классическая модель с 4 элементами, дополненная 20 элементами, позволила повысить соответствие модели эталону в 3–5 раз (справедливо только для данного случая).

Заключение. Достоверность электрической модели вывода корпуса, построенной на основе рассчитанных цепей, на высоких частотах в 3–5 раз больше, чем достоверность классической RLC-модели. Сходство полученной модели с эталоном оказалось неидеальным, так как невозможно заменить СВЧ-тракт эквивалентной электрической цепью, остается возможность поиска более оптимальной конфигурации элементов в цепи. Если строить модель на основе *S*-параметров корпуса с элементами разварки (проволочки, шарики припоя и т.д.), полученных путем измерения или моделирования, можно учесть и элементы разварки.

Литература

1. ***Han J., Swaminathan M.*** Combined integral equation based circuit modeling of interconnections in electronic packaging // 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). Miami, 2016. P. 11.
2. ***Xiao Q.*** Characterization of bond wire interconnects in QFN packages // 48th European Microwave Conference (EUMC). Madrid, 2018. P. 1265–1268.
3. ***Zonouz F.V., Masoumi N., Mehri M.*** Effect of IC package on radiated susceptibility of board level interconnection // International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD), 2015. P. 1–4.
4. ***Naik B.H., Misbahuddin M., Paidimarry C.S.*** *S*-parameter modeling and analysis of RGLC interconnect for signal integrity // International Conference on Recent Trends in Electrical, Electronics and Computing Technologies (icrteect). Warangal, India, 2017. P. 11–16.
5. ***Bakoglu H.B.*** Circuits, interconnections, and packaging for Vlsi. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1990. 527 p.
6. ***Niezmatova N.A.*** Numerical solution of incorrectly posed problems using natural algorithms // Scientific-Innovative Center of Information and Communication Technologies at the Tashkent University of Information Technologies Named after Muhammad al-Khwarizmi, 2018. P. 96–103.
7. Дифракционная компьютерная оптика / ***Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский и др.*** Самара: Физматлит, 2007. 735 с.
8. ***WangS., Ji Y., Yang S.*** Astochasticcombinatorial optimization model for test sequence optimization // ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Sanya, China, 2009. P. 311–315.
9. ***Ishani L., Shubham K.C., Divya U., Richa G.*** Comparative study on nature inspired algorithms for optimization problem // International Conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). Coimbatore, India, 2017. P. 143–147.
10. ***Kryzhanovsky D.I.*** Nonlinear parametric identification method using stochastic optimization algorithms // News of Volgograd State Technical University, 2008. P. 38–41.

Поступила в редакцию 18.03.2020 г.; после доработки 18.05.2020; принята к публикации 16.06.2020 г.

Белов Егор Николаевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), инженер-программист АО «ПКК Миландр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр., 5), Belov.e@milandr.ru

Швец Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), ведущий инженер АО «ПКК Миландр» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский пр., 5), 2sh@mail.ru

References

1. Han J., Swaminathan M. Combined Integral Equation Based Circuit Modeling of Interconnections in Electronic Packaging. *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC)*. Miami, 2016. P. 11.

2. Xiao Q. Characterization of Bond Wire Interconnects in QFN Packages. *48th European Microwave Conference (EuMC)*. Madrid, 2018, pp. 1265–1268.

3. Zonouz F.V., Masoumi N., Mehri M. Effect of IC package on radiated susceptibility of board level interconnection. *International Conference on Synthesis, Modeling, Analysis and Simulation Methods and Applications to Circuit Design (SMACD)*. 2015. pp. 1–4.

4. Naik B.H., Misbahuddin M., Paidimarry C.S. S-Parameter Modeling and Analysis of RGLC Interconnect for Signal Integrity. *International Conference on Recent Trends in Electrical, Electronics and Computing Technologies (ICRTEECT)*. Warangal, India. 2017, pp. 11–16.

5. Bakoglu H. B. *Circuits, Interconnections, and Packaging for Vlsi*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1990. 527 p.

6. Niezmatova N.A. Numerical solution of incorrectly posed problems using natural algorithms. *Scientific-innovative center of information and communication technologies at the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi*, 2018. pp. 96–103.

7. Golovashkin D.L., Doskolovich L.L., Kazanskiy N.L.et. al. *Diffraction computer optics.* Samara: PHYSMATLIT Publ., 2007. 735 pp. (in Russian).

8. Wang S., Ji Y., Yang S. A stochastic combinatorial optimization model for test sequence optimization. *ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*. Sanya, China. 2009, pp. 311–315.

9. Ishani L., Shubham K.C., Divya U., Richa G. Comparative study on nature inspired algorithms for optimization problem. *International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. Coimbatore, India. 2017, pp. 143–147.

10. Kryzhanovsky D.I. Nonlinear parametric identification method using stochastic optimization algorithms. *News of Volgograd State Technical University*, 2008. pp. 38–41.

Received 18.03.2020; Revised 18.05.2020; Accepted 16.06.2020.

Information about the authors:

Egor N. Belov – PhD student of the Integrated Electronics and Microsistems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Software Engineer, JSC «ICC Milandr» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky Av., 5), Belov.e@milandr.ru

Alexander V. Shvets – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Integrated Electronics and Microsistems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1) Leading Engineer, JSC «ICC Milandr» (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Georgievsky Av., 5), 2sh@mail.ru

УДК 004.414.23 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-330-338

Мемристорная логика в цифровой схемотехнике

А.А. Кулакова, Е.Б. Лукьяненко

Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия

anastasya.staryh@mail.ru

Для развития рынка современной микроэлектроники требуются методы, позволяющие непрерывно увеличивать производительность, энергоэффективность полупроводниковых изделий и одновременно уменьшать занимаемую минимальную площадь кристалла с сохранением его функциональности. Поэтому интеграция энергонезависимых элементов – мемристоров – и КМОП-технологии и создание методов синтеза цифровых схем с мемристорными функциональными узлами – мемристорная логика (МеМОП-логика) – являются актуальными задачами. В работе предложен блочный метод синтеза гибридных МеМОП-схем, использующий карты минтермов, что позволяет одновременно синтезировать МеМОП-схему и оптимизировать ее. Приведены примеры синтеза комбинационной (Исключающее ИЛИ) и последовательностной (*RS*-триггера) схем. Рассмотрены существующие и новые варианты решений задач синтеза комбинационных и последовательностных интегральных схем с мемристорами. Показано, что средняя рассеиваемая мощность *RS*-триггера составляет 7,7 мкВт для стандартной логики и 2,2 мкВт для логики на мемристорах. Потребляемая мощность схемы Исключающее ИЛИ равна 13 мкВт для стандартной логики и 9,2 мкВт для логики на мемристорах.

Ключевые слова: МеМОП-логика; логический синтез; оптимизация схем; гибридные схемы; *RS*-триггер; схема Исключающее ИЛИ; потребляемая мощность; моделирование

Для цитирования: Кулакова А.А., Лукьяненко Е.Б. Мемристорная логика в цифровой схемотехнике // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 330–338. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-330-338

© А.А. Кулакова, Е.Б. Лукьяненко, 2020

Memristor Logic in Digital Circuitry

A.A. Kulakova, E.B. Lukyanenko

Southern Federal University, Taganrog, Russia

anastasya.staryh@mail.ru

Abstract. Methods are required that can continuously increase the productivity and energy efficiency of semiconductor products and at the same time reduce the occupied minimum crystal area while maintaining its functionality to develop the growth rate of the modern microelectronics market. Therefore, at present, the tasks of integrating non-volatile elements - memristors into the well-known CMOS technology (complementary metal-oxide-semiconductor structure), of creating synthesis methods for the mentioned technology with memristor functional units (MeMOP-logic) are very relevant. A block method for the synthesis of hybrid MeMOS circuits has been presented. This method uses minterm maps, which allows synthesizing the MeMOS circuit and its optimization. The method has been presented on examples of the synthesis of combinational (XOR gate) and sequential (RS-trigger) circuits. The present work is devoted to the review of existing and the proposal of new options for solving synthesis problems of combinational and sequential integrated circuits with memristors. It has been shown that the average power dissipation of the *RS*-trigger is 7.7 mW for standard logic and 2.2 mW for logic on memristors. The power consumption of the circuit Excluding OR equal to 13 mW for standard logic and 9.2 mW for logic on memristors.

Keywords: MeMOS-logic; logic synthesis; circuit optimization; hybrid circuits; *RS*-trigger; XOR gate; power consumption; simulation

For citation: Kulakova A.A., Lukyanenko E.B. Memristor logic in digital circuitry. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 330–338. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-330-338

Введение. Миниатюризация элементной базы на основе КМОП-технологий в ближайшее время станет невозможной, поскольку технологический прогресс изготовления полупроводниковых изделий и материалов вплотную подошел к атомарному порогу, когда начинают действовать принципы запрета Паули, неопределенности Гейзенберга и другие фундаментальные положения квантовой физики. Также проблемой, ограничивающей масштабирование КМОП-транзисторов, является ток утечки.

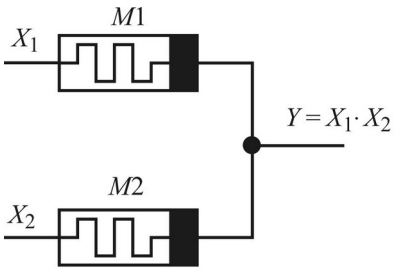
На сегодняшний день существуют два варианта решения проблемы миниатюризации чипа. Первый вариант – уменьшение размеров КМОП-элементов за счет улучшения технологии создания ИС. Предложенные изменения на основе транзисторов с вертикальным затвором (FinFET) продлевают срок существования КМОП-технологии, но не приводят к значительному прорыву. Второй вариант – разработка новой элементной базы для построения гибридных ИС. Ведущие исследовательские центры в последние 5–6 лет в ходе работ, направленных на создание новой архитектуры ЭВМ, пришли к выводу о перспективности использования элементной базы на основе мемристов. Для создания такой элементной базы предлагается применять либо одни мемристоры, либо

совместно КМОП-транзисторы с мемристорами [1–6]. Последние совместимы с КМОП-технологией, имеют малые размеры по сравнению с транзисторами, характеризуются энергонезависимостью и неограниченным временем хранения информации.

Виды гибридной логики. Синтез схем с использованием мемристоров может осуществляться несколькими методами [7–10]. Мемристорная стандартизованная логика (Memristor Ratioed Logic, MRL) совместима с КМОП-технологией [9]. Подобно КМОП, для этой логики состояния логического «0» и логической «1» определены уровнем напряжения на выходе схемы. Логика с использованием только мемристоров (Memristor Aided Logic, MAGIC) [7] и импликационная логика (Material Implication Logic, IMPLY) [8] – это две логики, использующие только мемристоры для проектирования кроссбар-архитектур. Для этих двух методов в отличие от MRL логические значения на выходах схем определяются мемристивностью выходного мемристора, что затрудняет объединение этих методов с современной технологией проектирования СБИС. В настоящее время метод синтеза гибридных схем (MRL) является наиболее перспективным для практического использования с целью создания гибридных схем с мемристорными функциональными узлами (МеМОП-схем) [11].

Мемристор является четвертым элементом в электрической цепи наряду с индуктивностью, конденсатором и резистором [12]. Мемристор представляет собой резистор с долговременной памятью, который под воздействием разнополярного приложенного напряжения изменяет сопротивление в десятки раз. Если приложить напряжение положительной полярности к выводу мемристора, изображенному на рис.1 в виде утолщенной линии, то мемристор принимает низкоомное состояние. При перемене полярности напряжения мемристор переключается в высокоомное состояние. Типичные значения сопротивлений мемристора следующие: R_{on} = 10 кОм, R_{off} = 1 МОм.

Логические вентили для гибридной МеМОП-логики. В цифровой схемотехнике комбинационные и последовательностные схемы создаются с помощью элементов булевой алгебры: И, ИЛИ, НЕ. Данные элементы позволяют создавать достаточно сложную цифровую схему. Схема элемента И на мемристорах и его таблица истинности показаны на рис.1.



а

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

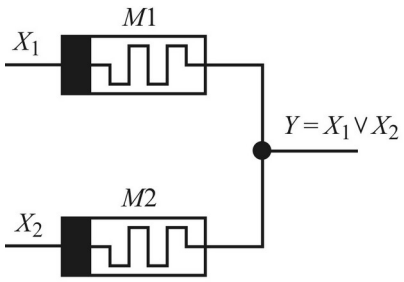
б

Рис.1. Схема элемента И на мемристорах *M*1 и *M*2 (*а*) и его таблица истинности (*б*)
Fig.1. Circuits of AND on memristors (*a*) and the truth table of this element (*b*)

Рассмотрим работу логического элемента И на мемристорах. Если входные сигналы X_1 и X_2 равны логическому «0», то независимо от состояния мемристоров на выходе Y будет логический «0». Если $X_1 = X_2 = 1$, то независимо от состояний мемристоров на выходе Y будет логическая «1». При $X_1 = 1$, $X_2 = 0$ мемристор $M1$ будет стремиться к высокоомному состоянию, а мемристор $M2$ – к низкоомному, на выходе Y установится логический «0». При $X_1 = 0$ и $X_2 = 1$ мемристор $M2$ будет переключаться в высокоомное

состояние, а мемристор $M1$ – в низкоомное, на выходе установится логический «0». Исследования состояний схемы элемента И на мемристорах показывают их совпадение с таблицей истинности этого элемента.

Рассмотрим реализацию логического элемента ИЛИ на мемристорах (рис.2). Как и для элемента И, при входных сигналах, равных логическому «0» или логической «1», на выходе Y установится или логический «0», или логическая «1» соответственно. Аналогично элементу И можно показать, что при входных сигналах $X_1 = 0$, $X_2 = 1$ на выходе будет логическая «1», а при $X_1 = 1$, $X_2 = 0$ на выходе также установится логическая «1». Таким образом, функционирование схемы элемента ИЛИ соответствует его таблице истинности.



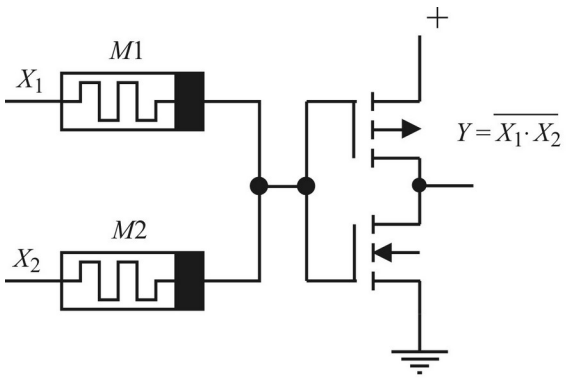
X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

а ***б***

Рис.2. Схема элемента ИЛИ на мемристорах (*а*) и его таблица истинности (*б*)
Fig.2. Circuits of OR on memristors (*a*) and the truth table of this element (*b*)

Логический элемент НЕ не реализуется на одних мемристорах, поэтому используется инвертор на КМОП-транзисторах.

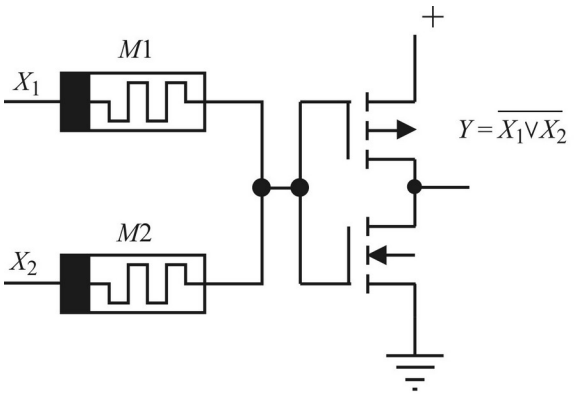
Поскольку мемристоры имеют достаточно высокоомные состояния, то соединять эти элементы непосредственно друг с другом без буферных каскадов некорректно. В качестве буфера используется инвертор. На рис.3, 4 показаны мемристорные логические элементы И-НЕ, ИЛИ-НЕ с инвертором на выходе и их таблицы истинности. Эти элементы можно использовать для построения комбинационных и последовательностных цифровых схем.



X_1	X_2	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

а ***б***

Рис.3. Схема элемента И-НЕ на МеМОП-логике (*а*) и его таблица истинности (*б*)
Fig.3. Circuits of NAND on MeMOP-logic (*a*) and the truth table of this element (*b*)

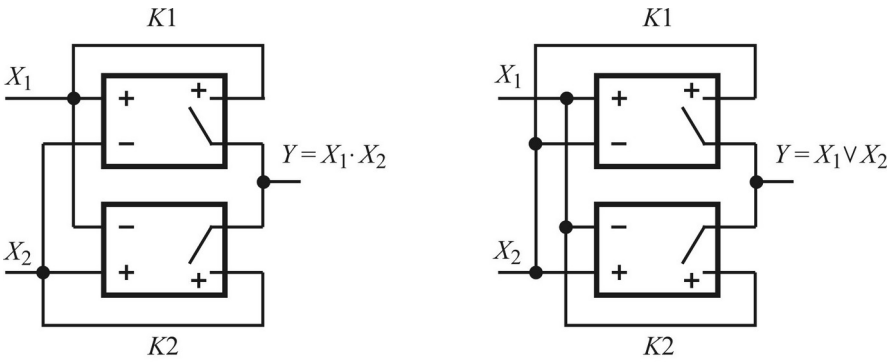


X_1	X_2	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

а *б*

Рис.4. Схема элемента ИЛИ-НЕ на МеМОП-логике (*а*) и его таблица истинности (*б*)
Fig.4. Circuits of NOR on MeMOP-logic (*a*) and the truth table of this element (*b*)

Модели мемристорных элементов И, ИЛИ. Для исследования различных схем на основе МеМОП-логики необходимо использовать модели мемристорных элементов. Если на данном этапе не учитывать инерционные свойства мемристоров и проверять схемы на функционирование и рассеиваемую мощность, то, применяя элементную базу САПР OrCAD, можно реализовать мемристорные схемы элементов И, ИЛИ на ключах, имеющих два выходных состояния: включено (низкоомное) и выключено (высокоомное) (рис.5).



а *б*

Рис.5. Модели мемристорных элементов: *а* – И; *б* – ИЛИ
Fig.5. Models of memristor elements: *a* – AND, *б* – OR

Входные сигналы X_1, X_2 подаются на входы ключей, имеющих противоположную полярность. Таким образом, при $X_1 \neq X_2$ обеспечиваются противоположные состояния ключей $K1$, $K2$: замкнуто и разомкнуто. Входные сигналы прикладываются к последовательно включенным выходным сопротивлениям ключей, поэтому выходное напряжение Y зависит от параметров сигналов X_1, X_2.

Выбраны следующие параметры ключей: напряжение замыкания ключа V_{on} = 0 В; напряжение размыкания ключа V_{off} = 1,8 В; сопротивление замкнутого ключа R_{on} = 10 кОм; сопротивление разомкнутого ключа R_{off} = 1 МОм. Сопротивления ключей соответствуют сопротивлениям мемристоров в низкоомном или высокоомном состоянии.

Комбинационная схема Исключающее ИЛИ на МеМОП-логике. В качестве примера рассмотрим синтез комбинационной и последовательностной схем, выполненных на МеМОП-логике. Уравнение схемы Исключающее ИЛИ имеет вид

$$a \oplus b = a\,\bar{b} + \bar{a}\,b\,.$$

Взяв двойную инверсию от правой части выражения, получим

$$a \oplus b = \overline{\overline{a}\, b \cdot \overline{a}\, \overline{b}}.$$

По данной формуле синтезируем схему Исключающее ИЛИ на мемристорах с использованием элемента И-НЕ (рис.6).

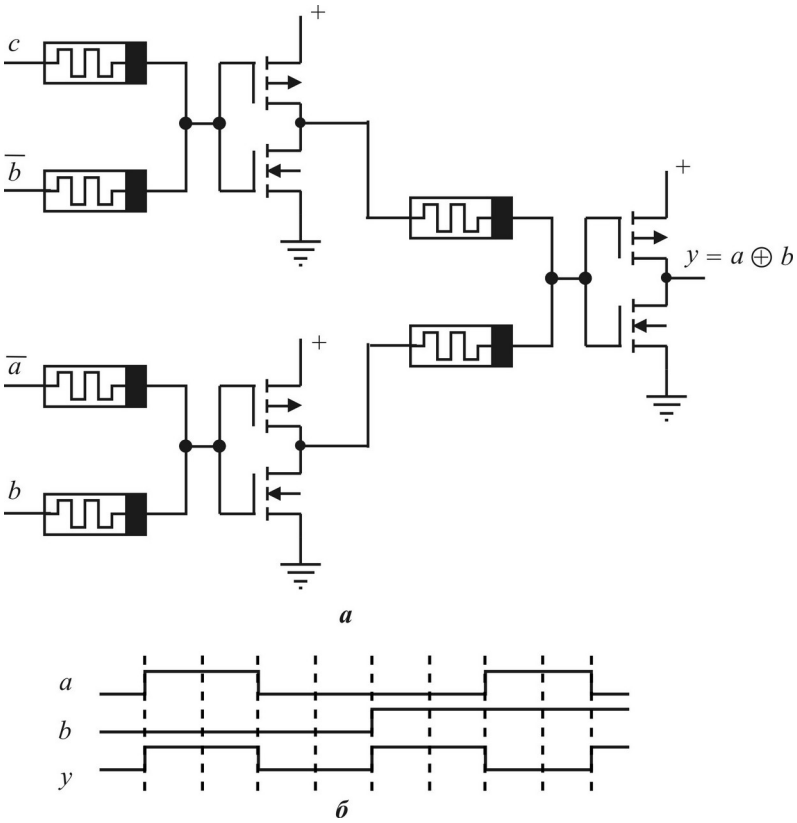


Рис.6. Схема Исключающее ИЛИ на МеМОП-логике (*а*) и график ее работы (*б*)
Fig.6. Circuits of XOR on MeMOP-logic (*a*) and work shedule of this element (*b*)

Исследование схемы проведено путем математического моделирования в САПР OrCAD. Для инверторов использованы модели КМОП-транзисторов четвертого поколения (BSIM4), а также 0,18-мкм технология. Напряжение питания выбрано равным 1,8 В. Длительность каждого состояния равна 10 нс. График на рис.6,*б* показывает, что функционирование элемента Исключающее ИЛИ соответствует его таблице истинности. Измеренная мощность комбинационной схемы составляет 7,7 мкВт.

***RS*-триггер с прямыми входами на МеМОП-логике.** Метод синтеза гибридных схем (MRL) предполагает построение схем путем замены элементов И-НЕ и ИЛИ-НЕ в стандартной логике на мемристорные элементы. Рассмотрим метод синтеза гибридных схем с помощью таблицы истинности и карт Карно. Сначала получим оптимизированное уравнение *RS*-триггера. Таблица истинности *RS*-триггера имеет вид

S	R	Q^{n+1}
0	0	Q
0	1	0
1	0	1
1	1	н/о*

*Неопределенное состояние

Тогда уравнение триггера, записанное в виде суммы минтермов, имеет вид

$$Q^{n+1} = \bar{S}\,\bar{R}\,Q + s\,\bar{R}.$$

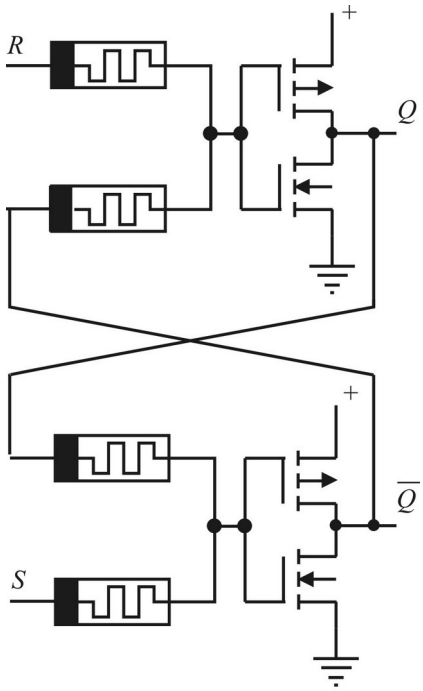
Минимизируя данное уравнение с помощью карт Карно, получаем

$$Q^{n+1} = \bar{R}(Q + S).$$

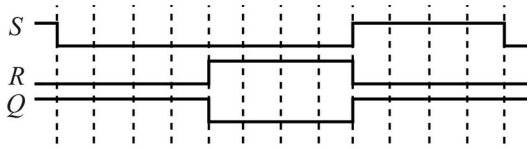
Взяв двойную инверсию, находим уравнение *RS*-триггера, выраженное через функции ИЛИ-НЕ:

$$Q^{n+1} = \overline{R + (\overline{Q + S})}.$$

Схема на мемристорах, синтезированная по полученному уравнению, приведена на рис.7. График работы *RS*-триггера совпадает с таблицей истинности. Рассеиваемая мощность равна 2,2 мкВт.



а



б

Рис.7. Схема *RS*-триггера с прямыми входами на МеМОП-логике (*а*) и график ее работы (*б*)
Fig.7. The circuit of the *RS*-trigger with uncomplemented inputon MeMOP-logic (*a*) and work shedule of this element (*b*)

Заключение. Оптимальным решением в схемотехнике МеМОП-схем является применение элементов И-НЕ, ИЛИ-НЕ, в которых элемент НЕ выполнен на КМОП-транзисторах, а схемы элементов И, ИЛИ – на мемристорах. Для синтеза схем на МеМОП-логике предлагается использовать блочный метод.

Моделирование схем Исключающее ИЛИ и *RS*-триггера с прямыми входами показало, что средняя рассеиваемая мощность *RS*-триггера составляет 7,7 мкВт для стандартной логики и 2,2 мкВт для логики на мемристорах. Потребляемая мощность схемы Исключающее ИЛИ равна 13 мкВт для стандартной логики и 9,2 мкВт для логики на мемристорах.

Литература

1. International Technology Roadmap for Semiconductors, Executive Summary, ITRS, 2011. URL: http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/2011Chapters/2011ExecSum.pdf (дата обращения: 10.04.2020).

2. ***Cho K., Lee S.-J., Eshraghian K.*** Memristor-CMOS logic and digital computational components // Microelectronics Journal. 2015. Vol. 46. No. 3. P. 214–220.

3. ***Кулакова А.А., Лукьяненко Е.Б.*** Схемотехника *D*-триггеров – основных элементов заказных последовательностных СБИС // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. №7. С. 422–429.

4. ***Sharma Gaurav, Lava Bhargava.*** CMOS-memristor inverter circuit design and analysis using Cadence Virtuoso // 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering. 2016. P. 1–5.

5. ***Sasi A., Amirsoleimani A.*** Hybrid memristor-CMOS based linear feedback shift register design // IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (Batumi, 2017). 2017. P. 62–65.

6. ***Lalchhandama F., Gopal B.*** An improved approach for the synthesis of Boolean functions using memristor based IMPLY and INVERSE-IMPLY gates // IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (Pittsburgh, 2016). 2016. P. 319–324.

7. MAGIC-memristor aided LoGIC / ***S. Kvatinsky, D. Belousov, S. Liman et al.*** // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2014. Vol. 61. No. 11. P. 895–899.

8. Memristor-based material implication (imply) logic: Design principles and methodologies / ***S. Kvatinsky, N. Wald, G. Satat, et al.*** // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration. 2013. Vol. 22. No. 10. P. 2054–2066. DOI: 10.1109/TVLSI.2013.2282132

9. MRL – Memristor Ratioed Logic / ***S. Kvatinsky, N. Wald, G. Satat et al.*** // Proceedings of the International Cellular Nanoscale Networks and their Applications. August 2012. P. 1–6.

10. ***Guckert L., Swartzlander E.E.*** MAD gates – memristor logic design using driver circuitry // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. Feb. 2017. Vol. 64. No. 2. P. 171–175.

11. ***Teimoory M., Amirsoleimani A., Ahmadi A., Ahmadi M.*** A hybrid memristor-CMOS multiplier design based on memristive universal logic gates // 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems. Boston, MA, 2017. P. 1422–1425.

12. ***Chua L.O., Memristor*** The missing circuit element // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. No. 18. P. 507–519.

Поступила в редакцию 14.04.2020 г.; после доработки 23.04.2020 г.; принята к публикации 16.06.2020 г.

Кулакова Анастасия Алексеевна – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Инжинирингового центра приборостроения, радио- и микроэлектроники Южного федерального университета (Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2), anastasya.staryh@mail.ru

Лукьяненко Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент Южного федерального университета (Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2), luk101010@mail.ru

References

1. *International Technology Roadmap for Semiconductors, Executive Summary*, ITRS, 2011. Available at: http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/2011Chapters/2011ExecSum.pdf (accessed: 10.04.2020).

2. Cho K., Lee S.-J., Eshraghian K. Memristor-CMOS logic and digital computational components. *Microelectronics Journal*. 2015, vol. 46, no. 3, pp. 214–220.

3. Kulakova A.A., Lukyanenko E.B. Circuitry of D-fli p-flops – basic elements of the sequential VLSI. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystems Technology,* 2019, vol. 21, no. 7, pp. 422–429. (in Russian).

4. Sharma Gaurav, Lava Bhargava. CMOS-memristor inverter circuit design and analysis using Cadence Virtuoso. *2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering.* 2016, pp. 1–5.

5. Sasi A., Amirsoleimani A., Ahmadi A., Ahmadi M. Hybrid memristor-CMOS based linear feedback shift register design. *2017 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS).* Batumi, 2017, pp. 62–65.

6. Lalchhandama F., Gopal B. An improved approach for the synthesis of Boolean functions using memristor based IMPLY and INVERSE-IMPLY gates. *IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI)*. Pittsburgh, 2016, pp. 319–324.

7. Kvatinsky S., Belousov D., Liman S., Satat G., Wald N., Friedman E.G., Kolodny A., Weiser U.C. MAGIC-memristor aided LoGIC. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2014, vol. 61, no. 11, pp. 895–899.

8. Kvatinsky S., Wald N., Satat G., Friedman E.G., Kolodny A., Weiser U.C. Memristor-based material implication (IMPLY) logic: design principles and methodologies. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI),* 2013, vol. 22, no. 10, pp. 2054–2066. DOI: 10.1109/TVLSI.2013.2282132

9. Kvatinsky S., Wald N., Satat G., Friedman E.G., Kolodny A., Weiser U.C. MRL – memristor ratioed logic. *Proceedings of the International Cellular Nanoscale Networks and their Applications.* August 2012, pp. 1–6.

10. Guckert L., Swartzlander E.E. MAD Gates-memristor logic design using driver circuitry. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, vol. 64, no. 2, pp. 171–175.

11. Teimoory M., Amirsoleimani A., Ahmadi A., Ahmadi M. A hybrid memristor-CMOS multiplier design based on memristive universal logic gates. *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS),* Boston, MA, 2017, pp. 1422–1425.

12. Chua L.O. Memristor? The missing circuit element. *IEEE Trans. Circuit Theory,* 1971, no. 18, pp. 507–519.

13. Pickett M.D., Strukov D.B., Borghetti J.L., Yang J.J., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. Stanley. Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices. *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 106, iss. 7, pp. 074508–074508-6.

Received 14.04.2020; Revised 23.04.2020; Accepted 16.06.2020.

Information about the authors:

Anastasia A. Kulakova – Cand. Sci. (Eng.), Junior Research Scientist of the Engineering Center of Instrument Making, Radio- and Microelectronics, Southern Federal University (Russia, 347922, Taganrog, Shevchenko st., 2), anastasya.staryh@mail.ru

Yevgeniy B. Lukyanenko – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Southern Federal University (Russia, 347922, Taganrog, Shevchenko st., 2), luk101010@mail.ru

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

С тематическими указателями статей за 1996 - 2019 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на сайте:

http://ivuz-e.ru

УДК 621.3.049.771.14 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-339-346

Встроенные средства саморемонта оперативной памяти системы на кристалле

В.Г. Рябцев, С.В. Волобуев

Волгоградский государственный аграрный университет,
г. Волгоград, Россия

sergey-aspir14@yandex.ru

В современных цифровых системах на кристалле объем встроенной памяти увеличивается. Она занимает значительную площадь на кристалле, что приводит к новым дефектам изготовления и снижает процент выхода годных систем. В работе предложена архитектура встроенных средств саморемонта, обеспечивающая восстановление работоспособности оперативной памяти системы на кристалле при многократных отказах за счет реконфигурации основной и резервной памяти. Рассмотрена микросхема оперативной памяти системы на кристалле, содержащая основную и резервную память, а также встроенные средства самотестирования и саморемонта. Выполнена верификация проекта встроенных средств саморемонта оперативной памяти с автоматическим восстановлением работоспособности при четырехкратных отказах. Показано, что данное техническое решение уменьшает массу изделия по сравнению с устройствами с мажоритарным резервированием, так как резервируется не вся память, а только основные компоненты, наиболее подверженные отказам. Восстановление работоспособного состояния памяти цифровой системы на кристалле выполнено в автоматическом режиме без участия персонала. Встроенные средства самотестирования и саморемонта оперативной памяти могут применяться в цифровых системах промышленного и специального назначения, в том числе в космических системах с длительным сроком активного существования.

Ключевые слова: встроенное самотестирование; оперативная память; моделирование; саморемонт; система на кристалле

***Для цитирования*:** Рябцев В.Г., Волобуев С.В. Встроенные средства саморемонта оперативной памяти системы на кристалле // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 339–346. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-339-346

© В.Г. Рябцев, С.В. Волобуев, 2020

Built-in Self-Repair Tools of System Memory on a Chip

V.G. Ryabtsev, S.V. Volobuev

Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia

sergey-aspir14@yandex.ru

Abstract: In modern digital systems on a chip the amount of the built-in memory occupies a significant area, which causes the new manufacturing defects and reduces the percentage of the output of usable systems. The architecture of the built-in self-repair tools, providing the recovery of the system RAM on a chip in case of the multiple failures due to configuration of the main and backup memory, has been proposed. The built-in means of self-repair of the system RAM on a chip contain a digital automatic machine and means of reconfiguration of the main and backup memory. The verification of the project of the built-in RAM self-repair tools with the automatic recovery of performance in case of four-fold failures has been performed. The proposed technical solution reduces the weight of the product compared to the devices with majority redundancy, since not all memory is entirely reserved, but only the main components that are most prone to failures. The restoration of the working state of the digital system memory on a chip is performed automatically without participation of personnel. The consumers of the built-in RAM self-repair tools can be large-scale manufacturers of the digital systems aimed at the market of industrial and special applications, including those for aerospace systems with long active life

Keywords: built-in self-testing; RAM; modeling; self-repair; system on a chip

For citation: Ryabtsev V.G., Volobuev S.V. Built-in self-repair tools of system memory on a chip. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 339–346. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-339-346

Введение. В настоящее время технологии производства цифровых систем позволяют размещать на кристалле встроенную память высокой плотности и большой емкости. При производстве цифровых систем разработчикам предоставляется возможность создавать более сложные и плотные архитектуры с повышенной функциональностью на кристалле. В современных системах на кристалле (System on Chip, SoC) оперативная память занимает самую большую часть площади кристалла. Поскольку элементы памяти размещаются очень плотно, оперативная память больше подвержена сбоям, чем логические элементы, поэтому проблема разработки встроенных средств самотестирования и саморемонта актуальна.

Применение корректирующих кодов ECC (Error Correction Code) в оперативных запоминающих устройствах позволяет автоматически исправлять одиночные ошибки и обнаруживать любые многоразрядные ошибки. Однако восстановление работоспособности памяти при многократных отказах этим методом не обеспечивается. Для выявления и локализации отказов памяти применяются встроенные средства самотестирования (Built-in Self-Test, BIST), которые фиксируют и хранят коды ошибочных информационных разрядов тестируемой памяти и которые можно применять для орга-

низации саморемонта. При построении встроенных средств саморемонта памяти необходимо установить кратность отказов. После выявления отказов возможны автоматический саморемонт и восстановление работоспособности [1–4]. Встроенные средства саморемонта (Built-in Self-Repair, BISR) реализуются путем пережигания лазером плавких перемычек и подключения запасных строк или столбцов запоминающих ячеек вместо отказавших [5–7]. Однако данный метод можно применять только при изготовлении микросхем памяти, конечному потребителю данная технология недоступна. Один из способов решения этой проблемы – размещение на кристалле избыточных областей памяти. Важно также учитывать продолжительность процесса саморемонта, которая определяется количеством информационных разрядов основной и резервной памяти. По завершении саморемонта оперативная память функционирует в цифровой системе в рабочем режиме.

Цель настоящей работы – разработка архитектуры средств саморемонта оперативной памяти на площадях пользователей. При обнаружении отказов, зафиксированных встроенными средствами самотестирования, выполняется автоматическая реконфигурация, обеспечивающая передачу кодов разрядов входных данных основной памяти, в которых произошли отказы, на входы резервной памяти. Данные, считанные из резервной памяти, передаются на входы цифровой системы вместо данных основной памяти.

Методика проектирования. Структурная схема микросхемы оперативной памяти со встроенными средствами саморемонта приведена на рис.1.

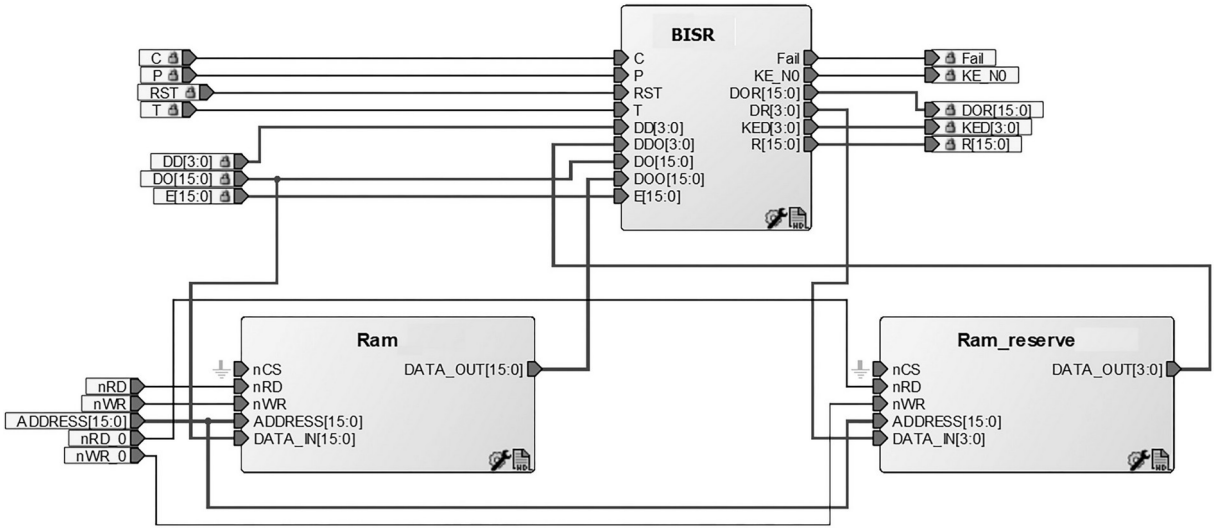


Рис.1. Структурная схема микросхемы со встроенными средствами саморемонта
Fig.1. Block diagram of a chip with built-in self-repair tools

Микросхема содержит основную память Ram емкостью 64к 16-разрядных слов и запасную память Ram_reserve емкостью 64к 4-разрядных слов. На входы встроенных средств саморемонта BISR поступают синхросигнал C, сигнал установки элементов в начальное состояние RST, сигнал выполнения тестирования T, сигнал разрешения выполнения процедуры восстановления P, вектор отказавших разрядов данных E[15:0], поступающий с выходов компараторов средств самотестирования.

Структура микросхемы памяти со встроенными средствами самотестирования и саморемонта приведена на рис.2.

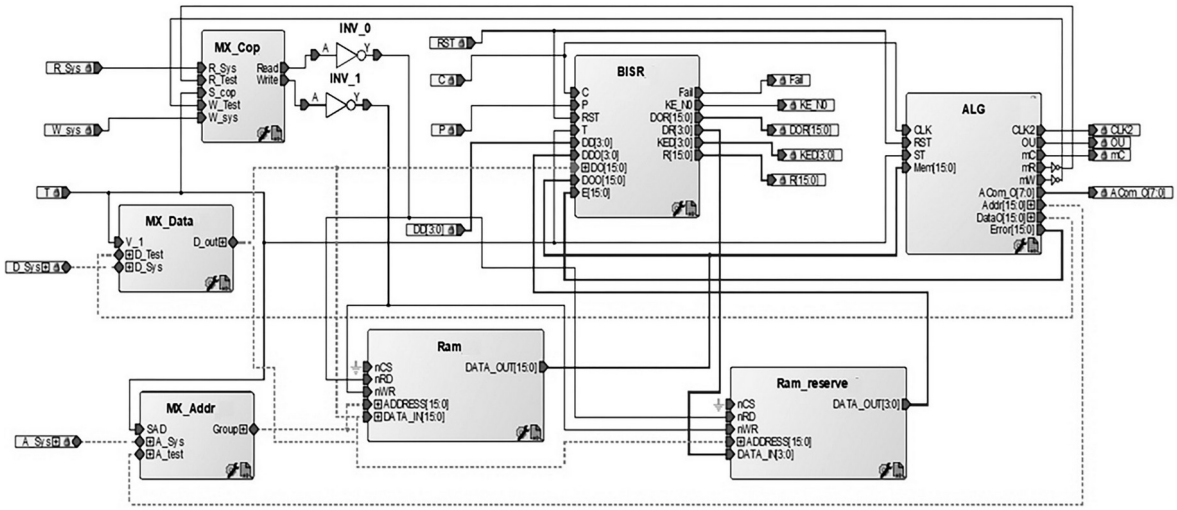


Рис.2. Структура микросхемы со встроенными средствами самотестирования и саморемонта
Fig.2. Chip structure with built-in self-testing and self-repair tools

Встроенные средства самотестирования содержат алгоритмический генератор ALG, мультиплексоры кодов операций MX_Cop, данных MX_Data и адреса MX_Addr. По сигналу разрешения самотестирования T входные шины микросхемы памяти отключаются от системных шин и подключаются к шинам алгоритмического генератора ALG, который формирует тестовые последовательности обычно в виде теста семейства march. Результаты сравнения считанных и эталонных данных преобразуются в вектор отказов, который передается встроенным средствам саморемонта. После выполнения процедуры ремонта средства саморемонта BISR передают на выходы сигналы: DOR(15:0) – коды данных основной памяти после саморемонта; DR(3:0) – коды данных, которые передаются на входы резервной памяти; Fail – сигнал фатальной ошибки; KED(3:0) – код позиции отказавшего разряда после декрементирования; KE_N0 – неравенство нулю разрядов кодов позиций отказавших разрядов; R(15:0) – коды вектора отказов. Исходными данными для выполнения процедуры саморемонта является вектор отказов E(15:0). Если содержимое всех разрядов вектора отказов E(15:0) равно нулю, то средства саморемонта не работают и не влияют на работу основной памяти Ram.

Моделирование. В среде Active-HDL выполнено моделирование средств саморемонта оперативной памяти, структура которых приведена на рис.3.

Средства саморемонта памяти содержат модуль идентификации отказов Fub1, модули реконфигурирования входных данных Fub2–Fub5 и модули реконфигурирования выходных данных Fub6–Fub8. В модуле Fub4 фиксируются коды позиций отказавших разрядов V1[3:0]–V4[3:0], которые уменьшаются на единицу декременторами, установленными в модуле Fub3. В модуле Fub6 уменьшается на единицу код количества зафиксированных отказов KE[3:0].

Моделирование выполнено в случае, когда средства встроенного самотестирования зафиксировали отказы во 2, 4, 7, 12-м разрядах основной памяти и соответствующий код E(15:0) вектора отказов подан на входы средств саморемонта BISR. На выходах основной памяти в данных разрядах сформировано неопределенное состояние U, а ожидаемое значение кодов в отказавших разрядах должно быть равно 1101. По сигналу P активизирован процесс саморемонта и на выходах средств саморемонта BISR сформирован код скорректированных выходных данных DOR[15:0], равный 1111111111101111. Временна́я диаграмма результатов саморемонта микросхемы памяти приведена на рис.4.

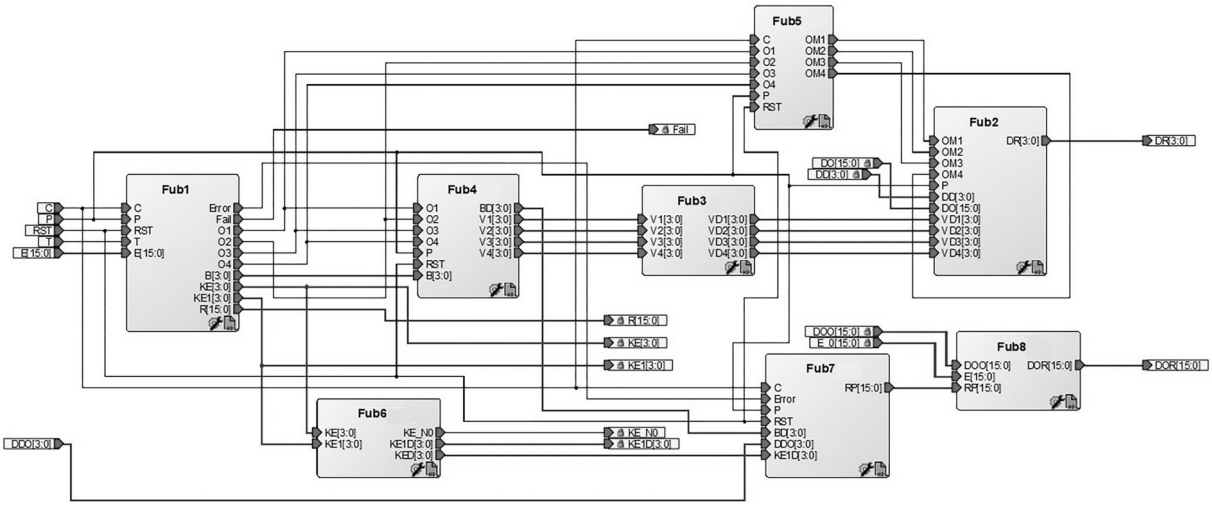


Рис.3. Структурная схема средств саморемонта
Fig.3. Block diagram of self repair tools

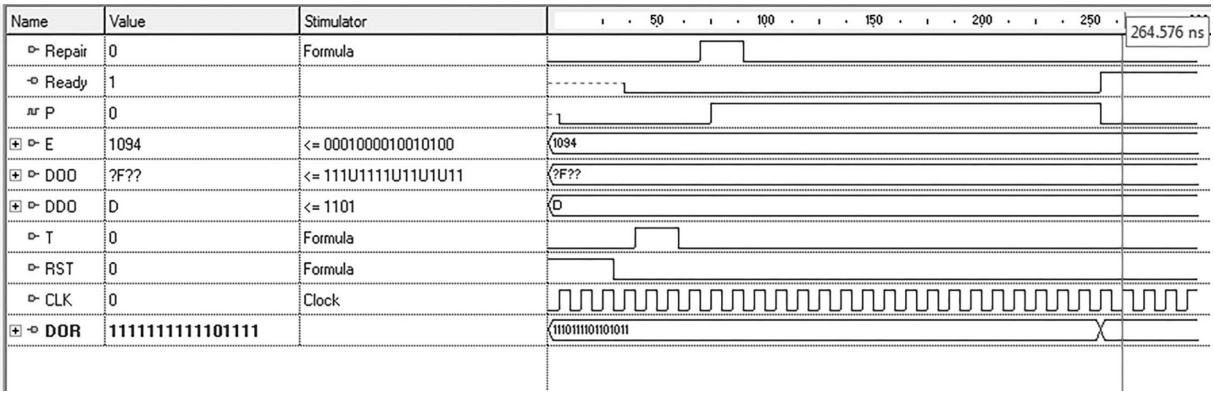


Рис.4. Временна́я диаграмма результатов саморемонта микросхемы памяти
Fig.4. Time diagram of the results of self repair of the memory chip

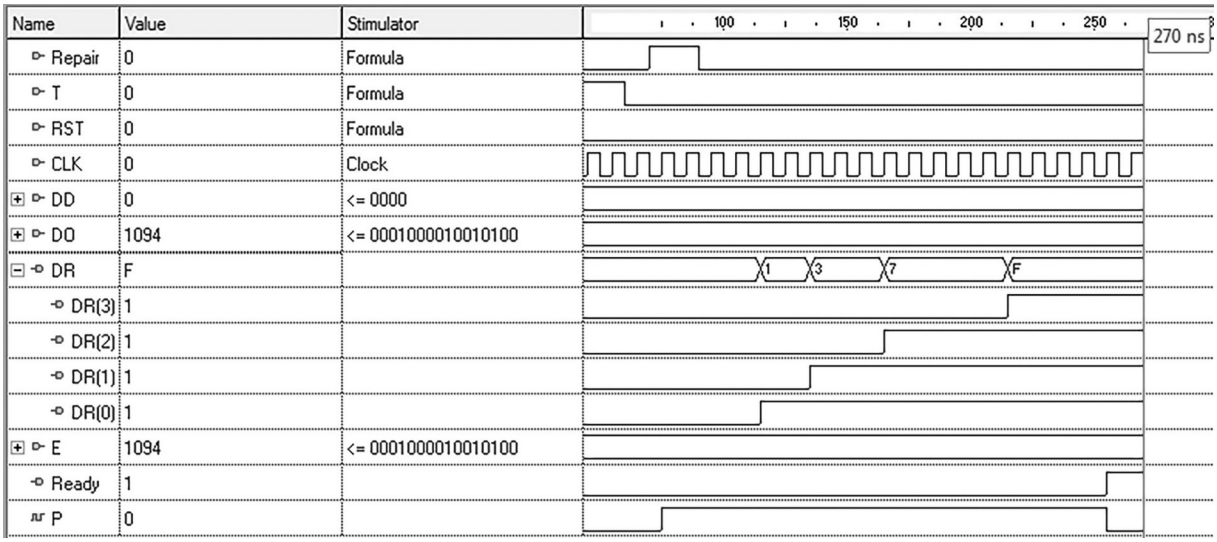


Рис.5. Временна́я диаграмма результатов реконфигурации кодов входных данных
Fig.5. Time diagram of the results of reconfiguration of input data codes

Для верификации процедуры саморемонта памяти выполнено моделирование в случае, когда при зафиксированных отказах во 2, 4, 7, 12-м разрядах основной памяти на входы данных разрядов нужно подать код единицы. Но так как в данных разрядах основной памяти зафиксированы отказы, то вместо отказавших разрядов происходит подключение четырех разрядов резервной памяти DR[3:0], что отображено на временно́й диаграмме (рис.5). Процесс замены данных для отказавших разрядов выполняется в последовательности, определенной процессом идентификации позиций отказавших разрядов. По завершении процедуры саморемонта микросхема памяти продолжает работу в исправном состоянии.

Результаты и их обсуждение. Принцип работы средств саморемонта оперативной памяти системы на кристалле основан на подсчете количества отказавших разрядов основной памяти и идентификации позиций отказавших разрядов путем сдвига вправо кодов вектора отказов E(15:0), сформированного встроенными средствами самотестирования [8–10]. Зафиксированный в процессе сдвига код единицы является сигналом для подсчета количества отказов специальным счетчиком модуля идентификации отказов Fub1. Одновременно во втором счетчике фиксируется код позиции отказавшего разряда. Содержимое данных счетчиков используется для ремонта микросхемы памяти согласно следующему правилу:

$$\forall\, \mathrm{E}_i,\ i=\overline{1,r-1},\quad j=\overline{1,s}\,\mathrm{DO}_j \Rightarrow \mathrm{DR}_I;\ \ \mathrm{DDO}_j \Rightarrow \mathrm{DOR}_i,$$

где r – число информационных разрядов основной памяти; s – кратность отказов, после возникновения которых возможен саморемонт.

Коды входных данных DO(15:0) разрядов основной памяти, в которых обнаружены отказы, направляются на входы резервной памяти DR(3:0), а данные с выходов резервной памяти DDO(3:0) через средства саморемонта передаются на выходы микросхемы памяти DOR(15:0). При превышении количества отказов максимально допустимого значения формируется сигнал фатальной ошибки Fail и саморемонт невозможен. После восстановления работоспособности микросхема памяти системы на кристалле работает в рабочем режиме.

Заключение. Встроенные средства саморемонта оперативной памяти системы на кристалле характеризуются высоким быстродействием, ограниченным только частотой работы применяемых логических элементов. При выполнении моделирования для 16-разрядной памяти продолжительность саморемонта при четырехкратных отказах составила 220 нс. Для данного технического решения не требуется предварительного распределения резервных компонентов по отказавшим строкам или столбцам основной оперативной памяти. Восстановление работоспособности оперативной памяти системы на кристалле при обнаружении многократных отказов выполняется в автоматическом режиме без участия персонала. Сокращается вес и стоимость микросхемы памяти за счет дублирования не всего изделия, а только части его составных компонентов.

Внедрение встроенных средства саморемонта за счет динамического перераспределения ресурсов оперативной памяти при возникновении многократных отказов позволяет обеспечить требуемые показатели надежности систем управления критического применения.

Литература

1. ***Богатырев В.А., Богатырев С.В.*** Оценка надежности компьютерных систем с учетом поэтапного восстановления аппаратуры и информации // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 12. С. 975–979.

2. ***Городецкая Г.*** Восстановление работоспособности элементов памяти с раздельным питанием // Компоненты и технологии. 2010. № 10. С. 133–134.

3. ***Саргсян В.К.*** Исследование и разработка методов оптимизации ремонта встроенных устройств памяти // 22-й Всероссийской межвуз. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика–2015»: тез. док. М.: МИЭТ, 2015. С. 103.

4. ***Шагурин И.И., Щигорев Л.А.*** Сравнительный анализ комбинированных методов повышения сбое- и отказоустойчивости блоков статической оперативной памяти // Изв. вузов. Электроника. 2016. Том 21. № 4. С. 347–352.

5. ***Ahmed M.A., Rani D.E., Sattar S.A.*** Embedded memory test strategies and repair // International Journal of Engineering Transactions. 2017. Vol. 30. No. 6. P. 839–845.

6. ***Sridhar V., Prasad M. Rajendra.*** Built-in self-repair (BISR) technique widely used to repair embedded random access memories (RAMs) // International Journal of Computer Science Engineering (IJCSE). 2012. Vol. 1. No. 01. P. 42–60.

7. ***Sruthi A., Sheshagiri Rao V.R.*** Built-in self-test repair (BISTR) technique for radom access memories (RAMs) // International Journal of Advances in Electronics and Computer Science. 2017. Vol. 4. Iss. 1. P. 30–32.

8. ***Almadi K., Ryabtsev V.G., Utkina T.Yu.*** Automatic operability restoration of semiconductor memory's modules during multiple faults // European Journal of Engineering and Technology. 2015. Vol. 3. No. 5. P. 72–79.

9. ***Evseev K.V., Ryabtsev V.G., Feklistov A.S.*** Improved reliability memory's module structure for critical application system // Int. Journal of Engineering Research and Applications. 2016. Vol. 1. Iss. 1. P. 65–68.

10. Методы и средства повышения надежности модулей памяти компьютеров: монография / ***С.В. Волобуев, А.П. Евдокимов, А.В. Меликов и др.*** Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2018. 284 с.

Поступила в редакцию 23.04.2020.; после доработки 23.04.2020 г.; принята к публикации 16.06.2020 г

Рябцев Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры электрооборудования и электрохозяйства предприятий АПК Волгоградского государственного аграрного университета (Россия, 400002, г. Волгоград, Университетский пр., 26), akim.onoke@mail.ru

Волобуев Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и электрохозяйства предприятий АПК Волгоградского государственного аграрного университета (Россия, 400002, г. Волгоград, Университетский пр., 26), sergey-aspir14@yandex.ru

References

1. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. Estimation of reliability of computer systems taking into account step-by-step restoration of equipment and information. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering,* 2016, vol. 59, no. 12, pp. 975–979. (in Russian).

2. Gorodetskaya G. Restoring the performance of memory elements with separate power supply. *Komponenty i Tekhnologii = Components and technologies,* 2010, no. 10, pp. 133–134. (in Russian).

3. Sargsian V.K. Research and development of methods for optimizing the repair of embedded memory devices. *22nd all-Russian interuniversity scientific and technical conference of students and postgraduates «Microelectronics and Informatics-2015».* Moscow, MIET Publ., 2015, p. 103. (in Russian).

4. Shagurin I.I., Shchigorev L.A. Comparative analysis of combined methods for improving the failure and fault tolerance of static RAM blocks. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics,* 2016, vol. 21, no. 4, pp. 347–352. (in Russian).

5. Ahmed M.A., Rani D.E., Sattar S.A. Embedded memory test strategies and repair. *International Journal of Engineering Transactions*, 2017, vol. 30, no. 6, pp. 839–845.

6. Sridhar V., Prasad M. Rajendra. Built-in self-repair (BISR) technique widely used to repair embedded random access memories (RAMs). *International Journal of Computer Science Engineering (IJCSE),* 2012, vol. 1, no. 1, pp. 42–60.

7. Sruthi A., Sheshagiri Rao V.R. Built-in self-test repair (BISTR) technique for radom access memories (RAMs). *International Journal of Advances in Electronics and Computer Science*, 2017, vol.4, iss.1, pp. 30–32.

8. Almadi K., Ryabtsev V.G., Utkina T.Yu. Automatic operability restoration of semiconductor memory's modules during multiple faults. *European Journal of Engineering and Technology,* 2015, vol. 3, no 5, pp. 72–79.

9. Evseev K.V., Ryabtsev V.G., Feklistov A.S. Improved Reliability Memory's Module Structure for Critical Application System. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 2016, vol. 1, iss. 1, pp. 65–68.

10. Volobuev S.V., Evdokimov A.P., Melikov A.V., Ryabtsev V.G., Shubovich A.A. *Methods and means of increasing the reliability of computer memory modules: monograph*. Volgograd, Volgograd state agricultural University Publ., 2018. 284 p. (in Russian).

Received 23.04.2020; Revised 23.04.2020; Accepted 16.06.2020.

Information about the authors:

Vladimir G. Ryabtsev – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Electrical Equipment and Electrical Enterprises of Agriculture Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Volgograd State Agrarian University (Russia, 400002, Volgograd, Universitetskiy av., 26), akim.onoke@mail.ru

Sergey V. Volobuev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electrical Equipment and Electrical Facilities of Agricultural Enterprises Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education Volgograd State Agrarian University (Russia, 400002, Volgograd, Universitetskiy av., 26), sergey-aspir14@yandex.ru

Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»

Подписку на электронную версию журнала можно оформить на сайтах:

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

УДК 536.21 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-347-357

Анализ эффективности теплоотвода в тепловыделяющих устройствах при использовании различных термоинтерфейсов

С.А. Кудж, В.С. Кондратенко, В.В. Кадомкин, А.А. Высоканов

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

vsk1950@mail.ru

При проектировании технических устройств актуальной задачей является обеспечение эффективного теплоотвода от тепловыделяющего устройства к теплорассеивающему с минимизацией теплового сопротивления в контактной зоне. Главная роль в решении такой задачи отводится термоинтерфейсам. В работе представлена математическая модель тепловых процессов в новом металлогибридном термоинтерфейсе. Рассмотрены основные параметры, влияющие на эффективность термоинтерфейсов. Приведены расчетные соотношения для определения значения коэффициента эффективной теплопроводности металлогибридных интерфейсов при изменении отношения толщины металлического каркаса и заполняющей термопасты. Получены расчетные и экспериментальные значения коэффициента эффективности металлогибридного термоинтерфейса и проведено их сравнение с аналогичными значениями наиболее эффективного термоинтерфейса – жидкого металла. Подтверждена перспективность применения нового класса металлогибридных интерфейсов для повышения эффективности отвода тепла. По результатам моделирования рабочих процессов в металлогибридном интерфейсе получены соотношения, которые позволяют определять значения эффективного коэффициента теплопроводности при произвольном выборе геометрических параметров, а также сравнивать его эффективность и обычного термоинтерфейса.

Ключевые слова: математическая модель; тепловой процесс; тепловыделяющий элемент; теплорассеивающий элемент; теплоотвод; термоинтерфейс; теплопроводность

Для цитирования: Кудж С.А., Кондратенко В.С., Кадомкин В.В., Высоканов А.А. Анализ эффективности теплоотвода в тепловыделяющих устройствах при использовании различных термоинтерфейсов // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 347–357. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-347-357.

© С.А. Кудж, В.С. Кондратенко, В.В. Кадомкин, А.А. Высоканов, 2020

Analysis of Efficiency of Heat Dissipation in Heat-Generating Devices Using Various Thermal Interfaces

S.A. Kudzh, V.S. Kondratenko, V.V. Kadomkin, A.A. Visokanov

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

vsk1950@mail.ru

Abstract: In designing the technical devices the actual task is provision of the effective heat emission from the heat-emitting to the thermal-scattering one with the minimization of thermal resistance in the contact area. The decisive role in solving such a problem is assigned to thermal interfaces. In the work a mathematical model of thermal processes in the new metal-hybrid thermo-interface has been presented. The main parameters affecting the efficiency of thermo-interfaces have been considered. The calculation ratios for determining the value of the effective metal-hybrid thermo-interfaces thermal conductivity coefficient while varying the thickness of metal frame and the filling thermal paste have been given. The calculation and experimental values of metal-hybrid thermo-interface efficiency coefficient have been obtained and their comparison with analog values of efficient thermo-interface of a liquid interface has been carried out. The perspective of using a new class of metal-hybrid thermo-interfaces to increase the efficiency of heat removal has been verified. Based on modeling workflow in metal-hybrid thermo-interface the ratios, allowing the determination of the values of effective thermal conductivity for any choice of geometric parameters, as well as the its effectiveness and conventional thermal interface have been obtained.

Keywords: mathematical model; thermal process; heat-emitting element; heat-scattering element; heat sink; thermal interface; thermal conductivity

For citation: Kudzh S.A., Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Visokanov A.A. Analysis of efficiency of heat dissipation in heat-generating devices using various thermal interfaces. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 347–357. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-347-357.

Введение. При проектировании современных технических устройств возникает необходимость рассмотрения дополнительных рабочих процессов и характеризующих их параметров, применения математических моделей рабочих процессов и методов их расчетов, а также установления функциональных связей между традиционными и новыми параметрами проектируемых устройств и степени их влияния. Один из таких процессов – механизм теплопередачи в устройствах, в которых при малых габаритах выделяются достаточно большие мощности. При эксплуатации подобных устройств температура отдельных элементов может достигать критических значений, и дальнейшая работа устройств будет невозможна по причинам потери производительности, выхода рабочих характеристик за допустимые границы, выхода из строя и т.д. Обеспечение эффективного теплоотвода от тепловыделяющего элемента (ТВЭ) к теплорассеивающему элементу (ТРЭ) с минимизацией теплового сопротивления в контактной зоне

является актуальной задачей. Решающая роль здесь отводится термоинтерфейсам. Существует ряд термоинтерфейсов, отличающихся как значением коэффициента теплопроводности применяемых материалов, так и конструктивными особенностями. Наиболее распространены теплопроводящие пасты, теплопроводящие упругоэластичные прокладки и жидкие металлы.

Цель настоящей работы – определение основных параметров, влияющих на эффективность термоинтерфейсов, получение соотношений для расчета эффективности термоинтерфейсов при изменении конструктивных размеров и свойств используемых материалов.

Металлогибридный термоинтерфейс. С увеличением плотности тепловых потоков любые дефекты в системе отвода тепла от ТВЭ приводят к повышению температуры кристалла процессора, что служит причиной выхода процессора из строя. Рост термического сопротивления обычно связан с нарушением условия сплошности среды в объеме или на поверхности термоинтерфейса, когда в процессе соединения ТВЭ и ТРЭ через термоинтерфейс в зоне их контакта или внутри термоинтерфейса образуются воздушные полости. Часть поверхности или объема термоинтерфейса не будет функционировать в оптимальном режиме, происходит перераспределение тепловых потоков по поверхности термоинтерфейса с увеличением плотности тепловых потоков на основной площади термоинтерфейса, увеличивается перепад температур. Пространство между поверхностями ТВЭ и ТРЭ должно быть заполнено веществом с хорошими теплопроводными свойствами. Вещество должно заполнять все свободное в границах термоинтерфейса пространство, быть технологичным и долговечным. Выполнить одновременно перечисленные требования достаточно сложно.

Однако термоинтерфейсом может являться как монослой теплопроводящего материала, так и более сложные конструкционные элементы, например металлогибридный термоинтерфейс (МГТИ) [1–3]. Конструкционные особенности МГТИ (рис.1)

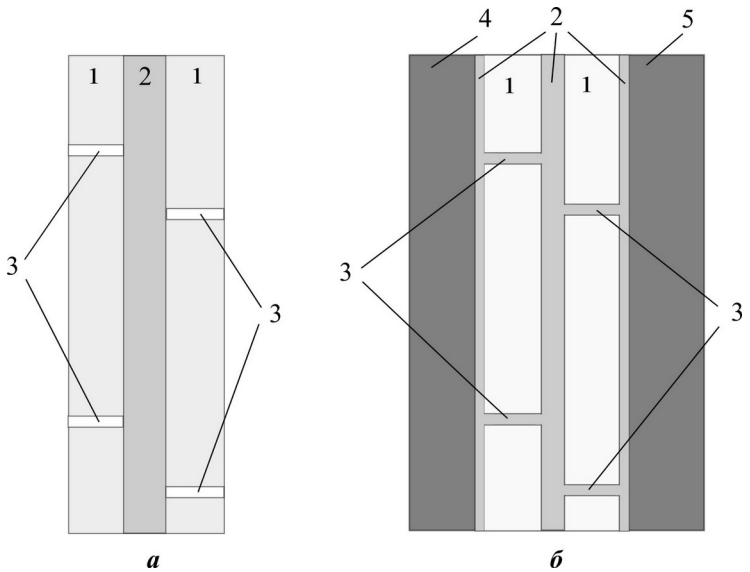


Рис.1. Эскиз металлогибридного термоинтерфейса до (*а*) и после (*б*) установки в оборудование: 1 – металлическая фольга МГТИ; 2 – термопаста в составе МГТИ; 3 – отверстия перфорации в металлической фольге; 4 – фрагмент тепловыделяющего элемента; 5 – фрагмент теплорассеивающего элемента

Fig.1. Sketch of a metal-hybrid thermal interface before installation in the equipment (*a*) and after installation in the equipment (*b*): 1 – MGTI metal foil; 2 – thermal paste as part of MGTI; 3 – perforation holes in the metal foil; 4 – a fragment of a heat-emitting element; 5 – a fragment of a heat-scattering element

имеют следующие преимущества перед конструкцией традиционных термоинтерфейсов:

- перфорированный металлический каркас обеспечивает высокую теплопроводность в поперечном направлении, что позволяет уменьшить масштаб неоднородности свойств термоинтерфейса и тепловых потоков в направлении по нормали к поверхностям ТВЭ и ТРЭ; в качестве каркаса могут использоваться фольга или тонкие пластины из металла с высокой теплопроводностью (алюминий, медь, серебро);
- наличие системы перфорации в металлической фольге позволяет уменьшить возможные размеры воздушных полостей за счет их перемещения в объеме термоинтерфейса в процессе сжатия; уменьшение размеров воздушных полостей также приводит к уменьшению масштабов неоднородности тепловых потоков в поперечном направлении и уменьшению термического сопротивления;
- использование перфорированной металлической фольги позволяет при сохранении первоначальной толщины термоинтерфейса уменьшить толщину слоя термопасты, что, в свою очередь, уменьшает тепловой перепад на термоинтерфейсе и температуру ТВЭ, так как материал каркаса имеет более высокую теплопроводность по сравнению с термопастой;
- термическое сопротивление МГТИ меньше термического сопротивления однослойного термоинтерфейса.

Математические модели термоинтерфейсов. В работе [4] построена математическая 3D-модель тепловых процессов и выполнены расчеты тепловых полей методом конечных элементов. В работах [5, 6] представлена математическая модель и проведены численные расчеты для стационарных тепловых процессов, протекающих в контактной зоне: ТВЭ – МГТИ – ТРЭ.

Для обеспечения отвода тепла от процессора к радиатору используют термоинтерфейсы различных типов. Основная задача термоинтерфейса – беспрепятственная передача тепла от ТВЭ к ТРЭ. Перепад температуры на термоинтерфейсе определяется выражением

$$\Delta T = \frac{\delta_{\text{ти}} q}{\lambda_{\text{ти}}}$$

или через термическое сопротивление $R_{\text{ти}}$:

$$\Delta T = R_{\text{ти}} q,$$

где $\delta_{\text{ти}}$, $\lambda_{\text{ти}}$, q – соответственно толщина слоя термоинтерфейса, коэффициент теплопроводности материала термоинтерфейса, поверхностная плотность теплового потока.

Рассмотрим МГТИ (см. рис.1), состоящий из двух слоев перфорированной фольги и термопасты, заполняющей в рабочем состоянии свободное пространство между ТВЭ, листами фольги и ТРЭ. С учетом габаритных размеров рабочие процессы в МГТИ протекают так же, как в многослойной плоской стенке. Тогда термическое сопротивление МГТИ равно:

$$R_{\text{МГТИ}} = \frac{\delta_{\text{тп}1} + \delta_{\text{тп}2} + \delta_{\text{тп}3}}{\lambda_{\text{тп}}} + \frac{\delta_{\text{м}1}}{\lambda_{\text{м}1}} + \frac{\delta_{\text{м}2}}{\lambda_{\text{м}2}}, \qquad (1)$$

где $\delta_{\text{тп}1}$, $\delta_{\text{тп}2}$, $\delta_{\text{тп}3}$ – соответственно толщина слоя термопасты между ТВЭ и первым листом фольги, между двумя слоями металлической фольги МГТИ и между вторым листом фольги и ТРЭ; $\lambda_{\text{тп}}$ – коэффициент теплопроводности термопасты; $\delta_{\text{м}1}$, $\lambda_{\text{м}1}$, $\delta_{\text{м}2}$, $\lambda_{\text{м}2}$ – соответственно толщина и коэффициент теплопроводности первого и второго листа металлической фольги МГТИ.

Перепад температуры на МГТИ при работе ТВЭ равен:

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = R_{\text{МГТИ}} q,$$

или

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = \left(\frac{\delta_{\text{тп}1} + \delta_{\text{тп}2} + \delta_{\text{тп}3}}{\lambda_{\text{тп}}} + \frac{\delta_{\text{м}1}}{\lambda_{\text{м}1}} + \frac{\delta_{\text{м}2}}{\lambda_{\text{м}2}} \right) q.$$

На рис.2 показано распределение температуры в системе охлаждения процессора Intel Core i7 при использовании пасты Arctic Silver 5 толщиной 0,35 мм; МГТИ, состоящего из двух слоев перфорированной медной фольги толщиной 0,15 мм и трех слоев термопасты Arctic Silver 5 общей толщиной 0,05 мм; МГТИ, состоящего из двух слоев перфорированной алюминиевой фольги толщиной 0,15 мм и трех слоев термопасты Arctic Silver 5 общей толщиной 0,05 мм. Процессор имеет площадь контактной поверхности 0,00141 м^2, мощность порядка 165 Вт, и в нем достигается поверхностная плотность теплового потока 117 000 Вт/м^2. Экспериментальные и расчетные значения температуры при использовании МГТИ совпадают с точностью 0,1 ºС (таблица).

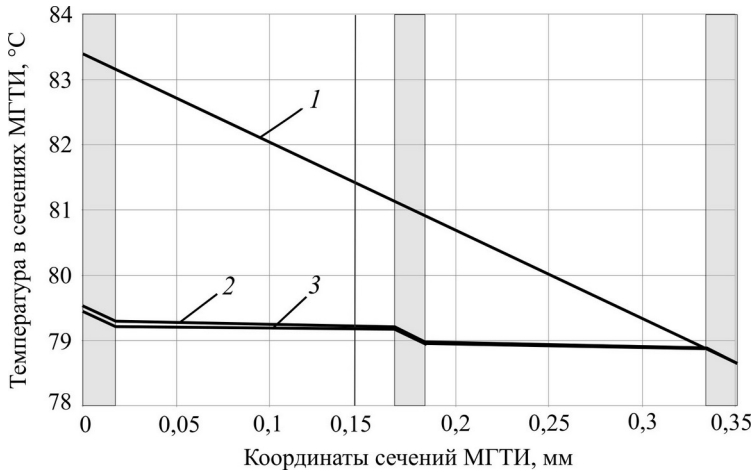


Рис.2. Распределение температуры в системе охлаждения процессора Intel Core i7 при одинаковой толщине теплопроводящего слоя: *1* – термопаста Arctic Silver 5; *2* – МГТИ с каркасом из алюминия и термопастой Arctic Silver 5; *3* – МГТИ с каркасом из меди и термопастой Arctic Silver 5 (1)

Fig.2. Comparison of the temperature distribution in the Intel Core i7 processor cooling system with the same thickness of the heat-conducting layer: *1* – Arctic Silver 5 thermal paste; *2* – MGTI with an aluminum frame and Arctic Silver 5 thermal paste; *3* – MGTI with a copper frame and Arctic Silver 5 thermal paste (1)

Расчетные и экспериментальные значения температуры при использовании МГТИ
Calculated and experimental temperature values when using metal-hybrid thermal interface

Параметр	Эксперимент	Расчет
Температура процессора, ºС	79,5	79,4
Температура радиатора в зоне контакта с МГТИ, ºС	78,7	78,7
Перепад температуры на МГТИ, ºС	0,8	0,7

Для определения эффективности сравним перепад температуры на термоинтерфейсе обычной конструкции $\Delta T_{\text{ти}}$ и на МГТИ $\Delta T_{\text{МГТИ}}$ при одинаковом значении толщины интерфейса $\delta_{\text{МГТИ}} = \delta_{\text{тп}\,1} + \delta_{\text{тп}\,2} + \delta_{\text{тп}\,3} + \delta_{\text{м}1} + \delta_{\text{м}\,2} = \delta_{\text{ти}}$:

$$\Delta T_{\text{ти}} = \frac{\delta_{\text{тп}}}{\lambda_{\text{тп}}} q,$$

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = \left(\frac{\delta_{\text{ти}\,1} + \delta_{\text{тп}\,2} + \delta_{\text{тп}3}}{\lambda_{\text{тп}}} + \frac{\delta_{\text{м}\,1}}{\lambda_{\text{м}\,1}} + \frac{\delta_{\text{м}2}}{\lambda_{\text{м}\,2}} \right) q.$$

При практическом использовании МГТИ распределение термопасты между отдельными слоями определяется разными факторами и является случайным процессом с некоторыми средними значениями и дисперсией. На рис.3 представлены данные расчетов для МГТИ с различным распределением термопасты Arctic Silver 5 между отдельными слоями при сохранении суммарной толщины термопасты в МГТИ. Графики показывают, что при увеличении толщины одного слоя термопасты увеличивается перепад температур на данном слое. При этом толщины других слоев уменьшаются, что приводит к уменьшению перепада температуры на этих слоях и сохранению неизменными значений температуры на внешних границах МГТИ. Таким образом, реализуется условие стабильности (сохранения) режимов работы ТРЭ и ТРЭ при случайных законах распределения термопасты между отдельными слоями МГТИ.

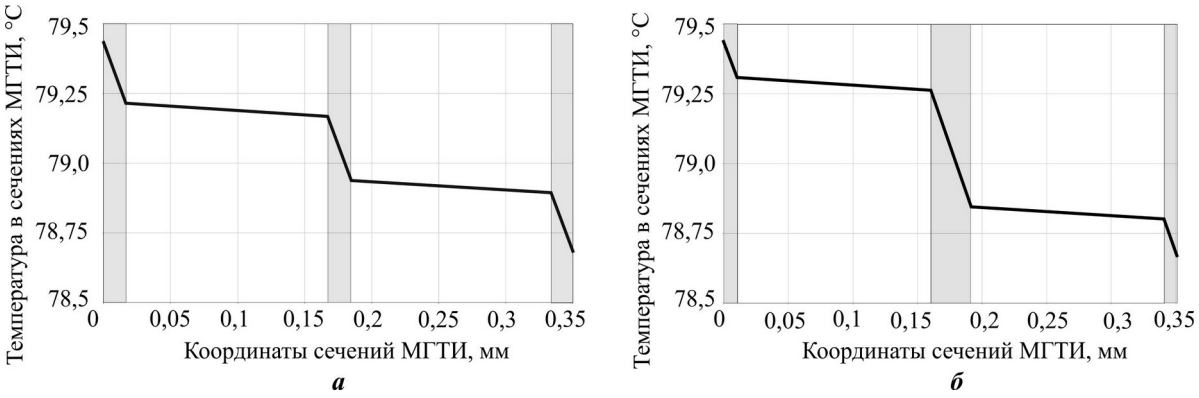


Рис.3. Распределение температуры в МГТИ толщиной 0,35 мм с медной фольгой толщиной 0,15 мм при равных (*а*) и разных (*б*) толщинах слоев термопасты Arctic Silver

Fig.3. Temperature distribution in MGTI 0.35 mm thick with 0.15 mm thick copper foil and equal (*a*) and different thicknesses (*b*) layers of Arctic Silver thermal paste

При использовании перфорации необходимы корректировка значений и замена коэффициента теплопроводности материала фольги на оценку среднего значения коэффициента теплопроводности металлической фольги в направлении теплового потока. Если обозначить отношение площади отверстий перфорации к площади листа фольги параметром $k_{\text{прф}}$, то нижней оценкой коэффициента эффективной теплопроводности материала фольги будет величина

$$\lambda_{\text{м .эфф}} = (1 - k_{\text{прф}}) \lambda_{\text{м}}$$

при исходном значении теплопроводности материала $\lambda_{\text{м}}$. Такая оценка получена при условии пренебрежения вкладом в теплопередачу вещества, заполняющего полости перфорации металлической фольги после формирования МГТИ.

В математическую модель рабочих процессов в систему охлаждения ТВЭ следует включить и рабочие процессы в ТРЭ, к которым относятся теплопередача в материале ТРЭ и теплообмен с внешней средой и поступающим в ТРЭ внешним хладагентом и т.д.

При стационарном режиме работы ТВЭ для определения температуры теплоотводящего устройства (радиатора) в зоне его контакта с МГТИ можно использовать соотношение

$$T_{\text{ТРЭ}} = T_{\text{н}} + \frac{q}{\alpha_{\text{эфф}}},$$

где $T_{\text{н}}$ – наружная температура, или температура охлаждающей среды; $\alpha_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи теплоотводящего устройства, приведенный к выходному сечению МГТИ.

Более точная модель тепловых процессов ТРЭ должна включать в себя как теплообменные процессы с внешним хладагентом, так и распределение температуры в ТРЭ в пространстве между поверхностью контакта ТВЭ с МГТИ площадью $F_{\text{МГТИ}}$ и охлаждаемой поверхностью площадью $F_{\text{охл}}$.

Плотность тепловых потоков при внешнем охлаждении ТРЭ определяется уравнением вида

$$q_{\text{охл}} = \alpha_{\text{охл}} \left(\text{T}_{\text{охл .ср}} - \text{T}_{\text{н}} \right),$$

где $\alpha_{\text{охл}}$ – коэффициент теплоотдачи ТРЭ; $T_{\text{охл.ср}}$ – среднее значение температуры на охлаждаемой поверхности ТРЭ.

Процессы теплопередачи в 3D-моделях ТРЭ имеют достаточно сложный вид, так как в ТРЭ изменяются и значения, и направления тепловых потоков, а также площади поперечных сечений в направлении распространения тепловых потоков. Площади увеличиваются от значения площади МГТИ $F_{\text{МГТИ}}$ до значения площади охлаждаемой поверхности $F_{\text{охл}}$. Если выполнить замену пространственных тепловых процессы в ТРЭ на эквивалентные тепловые процессы в прямой призме, площадь основания которой равна площади МГТИ $F_{\text{МГТИ}}$, а высота равна $\delta_{\text{ТРЭ}}$, то температура $T_{\text{охл.ср}}$ определяется соотношением вида

$$T_{\text{охл .ср}} = T_{\text{ТРЭ}} - \frac{\delta_{\text{ТРЭ}}}{\lambda_{\text{ТРЭ}}} q .$$

Численное значение высоты $\delta_{\text{ТРЭ}}$ позволяет характеризовать эффективность процессов теплопередачи в материалах конструкции ТРЭ, оценивать обоснованность выбора геометрических размеров и их соотношений в конструкции.

Данная модель приемлема для воздушного, жидкостного и жидкокапельного охлаждения. Численные значения параметров теплоотдачи могут быть определены экспериментально или методами численного моделирования термогидрогазодинамических процессов [7], а распределения температуры в ТРЭ – методами численного моделирования 3D-задач теплопроводности [8].

Температура ТВЭ на поверхности контакта с МГТИ определяется при известной температуре охлаждающей среды $T_{\text{н}}$ уравнением вида

$$\Delta T_{\text{МГТИ}} = T_{\text{н}} + \left(\frac{\delta_{\text{ТРЭ}}}{\lambda_{\text{ТРЭ}}} + \frac{F_{\text{МГТИ}}}{F_{\text{охл}} \alpha_{\text{охл}}} \right) q + \left(\frac{\delta_{\text{тп1}} + \delta_{\text{тп2}} + \delta_{\text{тп3}}}{\lambda_{\text{тп}}} + \frac{\delta_{\text{м1}}}{\lambda_{\text{м1}}} + \frac{\delta_{\text{м2}}}{\lambda_{\text{м2}}} \right) q .$$

Нижнее значение внешней температуры поверхности ТРЭ дополнительно ограничено условиями возможности конденсации влаги из окружающей среды при снижении температуры поверхности ТРЭ ниже точки росы, что налагает ограничение на минимальное значение температуры охлаждающей среды. Верхнее значение внешней температуры поверхности ТРЭ ограничено условиями работы ТВЭ при максимально возможных значениях температуры, что налагает ограничение на максимальное значение температуры охлаждающей среды.

Эффективность конкретных реализаций МГТИ можно оценить путем введения коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ, численное значение которого определяется как отношение толщины термоинтерфейса к термическому сопротивлению МГТИ:

$$\lambda_{эфф}=\frac{\delta_{МГТИ}}{\left(\delta_{тп\,1}+\delta_{тп\,2}+\delta_{тп\,3}\right)/\lambda_{тп}+\delta_{м\,1}/\lambda_{м\,1}+\delta_{м\,2}/\lambda_{м\,2}},$$

где $\delta_{МГТИ}=\delta_{тп\,1}+\delta_{тп\,2}+\delta_{тп\,3}+\delta_{м1}+\delta_{м2}$, и коэффициента эффективности МГТИ, который определяется как отношение термического сопротивления обычного термоинтерфейса к термическому сопротивлению МГТИ:

$$K_{эфф}=\frac{R_{ти}}{R_{МГТИ}}=\frac{\delta_{МГТИ}/\lambda_{тп}}{\left(\delta_{тп1}+\delta_{тп2}+\delta_{тп3}\right)/\lambda_{тп}+\delta_{м\,1}/\lambda_{м1}+\delta_{м2}/\lambda_{м2}}.$$

Коэффициент эффективности позволяет определить, во сколько раз уменьшится перепад температуры при использовании МГТИ при одинаковой толщине термоинтерфейсов:

$$K_{эфф}=\frac{\Delta T_{ти}/q}{\Delta T_{МГТИ}/q}=\frac{\Delta T_{ти}}{\Delta T_{МГТИ}}=\frac{\lambda_{эфф}}{\lambda_{тп}}.$$

На рис.4 приведена зависимость коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ от отношения суммарных толщин металлической фольги и термопасты в термоинтерфейсе

$$l=\left(\delta_{м\,1}+\delta_{м2}\right)/\left(\delta_{тп\,1}+\delta_{тп\,2}+\delta_{тп\,3}\right).$$

В качестве термопасты МГТИ в расчетах используются данные для термопасты Arctic Silver 5 с коэффициентом теплопроводности 8,7 Вт/(м·К) [9]. Расчеты выполнялись для двух вариантов МГТИ: с двумя слоями медной фольги с коэффициентом теплопроводности 397 Вт/(м·К); с двумя слоями алюминиевой фольги с коэффициентом теплопроводности 220 Вт/(м·К). Прямоугольный сегмент 3 на рис.4 – экспериментальные значения коэффициента эффективной теплопроводности для жидкого металла Collaborator Liquid Pro. Сравнение МГТИ с термоинтерфейсом с жидким металлом выполнено исходя из следующих соображений: так как $K_{эфф}=\lambda_{эфф}/\lambda_{тп}$, зависимости коэффициента эффективности МГТИ повторяют зависимость коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ (см. рис.4), а численные значения коэффициента эффективности МГТИ изменяются в диапазоне от 2 до 9 для термопасты Arctic Silver 5. Для термоинерфейсов, представленных на рис.2, коэффициент эффективности равен 6 для МГТИ с металлокаркасом из медной фольги и 5,5 для МГТИ с металлокаркасом из алюминиевой фольги.

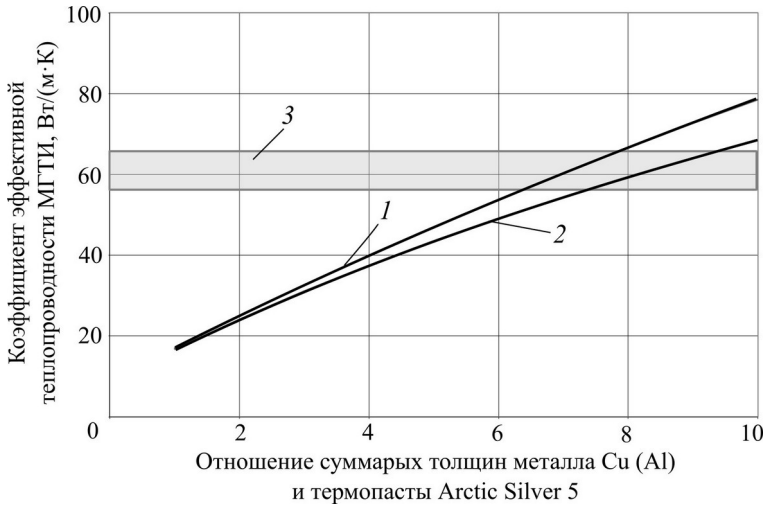


Рис.4. Зависимость коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ от относительной толщины металлического каркаса и термопасты: *1* – каркас из меди; *2* – каркас из алюминия; *3* – экспериментальные значения коэффициента эффективной теплопроводности для жидкого металла Collaborator Liquid Pro

Fig.4. Dependence of the effective thermal conductivity coefficient of MGTI on the relative thickness of the metal frame and thermal paste: *1* – copper frame; *2* – aluminum frame; *3* – experimental values of the effective thermal conductivity for liquid metal Collaborator Liquid Pro

На сегодняшний день жидкий металл можно назвать самым эффективным среди всех термоинтерфейсов [10] в силу того, что его теплопроводность практически на порядок выше других известных теплопроводящих паст и прокладок. Кроме того, жидкий металл является негорючим и нетоксичным веществом. Несмотря на свои явные преимущества перед термопастами и теплопроводящими прокладками, жидкий металл имеет следующие недостатки: трудно наносится, поэтому требуется высокая квалификация обслуживающего персонала; нельзя наносить на алюминиевую поверхность из-за возможной коррозии; трудно удаляется с поверхности; имеет высокую стоимость по сравнению со стоимостью термопасты; не обеспечивает полного контакта между процессором и радиатором из-за образующихся в процессе нанесения воздушных полостей.

Для практических расчетов при проектировании систем охлаждения по результатам численных расчетов получены следующие аппроксимирующие зависимости для МГТИ типа медь – термопаста Arctic Silver 5:

- для коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\mathrm{Cu-Ar}} = 0{,}002618\,l^3 - 0{,}17678\,l^2 + 8{,}484138\,l + 0{,}002618;$$

- для коэффициента эффективности МГТИ (безразмерный):

$$K_{\mathrm{Cu-Ar}} = 0{,}0030\,l^3 - 0{,}02032\,l^2 + 0{,}975188\,l + 1{,}002204.$$

Также получены зависимости для МГТИ типа алюминий – термопаста Arctic Silver 5:

- для коэффициента эффективной теплопроводности МГТИ, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\mathrm{Al-Ar}} = 0{,}006113\,l^3 - 0{,}288009\,l^2 + 8{,}249651\,l + 8{,}779356;$$

- для коэффициента эффективности МГТИ (безразмерный):

$$K_{\mathrm{Al-Ar}} = 0{,}000703\,l^3 - 0{,}033105\,l^2 + 0{,}94823\,l + 1{,}009121.$$

Аппроксимирующие зависимости получены с максимальной относительной погрешностью не более 0,015 % для МГТИ типа медь – термопаста Arctic Silver 5 и максимальной относительной погрешностью не более 0,06 % для МГТИ типа алюминий – термопаста Arctic Silver 5. Данные зависимости позволяют после выбора толщины и материала фольги, а также толщины и материала термопасты определить коэффициент эффективной теплопроводности МГТИ и его термическое сопротивление МГТИ, найти перепад температуры на МГТИ при известном значении выделяемой ТВЭ тепловой мощности и площади МГТИ.

Заключение. Представленные в работе расчетные и экспериментальные данные подтверждают перспективность применения нового класса МГТИ для повышения эффективности отвода тепла. Полученные в результате моделирования соотношения позволяют определить тепловые режимы ТВЭ с МГТИ при произвольном выборе геометрических параметров МГТИ, что дает возможность создавать недорогие высокоэффективные термоинтерфейсы, легко встраиваемые в элементы электронной компонентой базы.

Корректность выполненных расчетов подтверждается тем, что экспериментальные и расчетные данные для температуры на термоинтерфейсе совпадают с точностью 0,1 ºС.

Литература

1. ***Сакуненко Ю.И., Кондратенко В.С.*** Устройство отвода тепла от тепловыделяющих элементов / Патент РФ № 2602805.2016. Бюл. № 32.

2. ***Кондратенко В.С., Сакуненко Ю.И., Высоканов А.А.*** Металлогибридные термоинтерфейсы с высокой теплопроводностью // Прикладная физика. 2017. №1. С. 85–89.

3. ***Кондратенко В.С., Высоканов А.А., Сакуненко Ю.И.*** Металлогибридные термоинтерфейсы для отвода тепла от тепловыделяющих элементов // Приборы. 2018. №4(214). С. 46–50.

4. Разработка металлогибридного термоинтерфейса: экспериментальное исследование и математическое моделирование / ***В.С. Кондратенко, А.А. Высоканов, Ю.И. Сакуненко и др.*** // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 166–173.

5. Моделирование тепловых процессов в тепловыделяющих элементах с применением металлогибридных термоинтерфейсов/ ***В.С. Кондратенко, В.В. Кадомкин, А.А. Высоканов и др.*** // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2018. № 3 (139). С. 10–15.

6. ***Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Vysokanov A.A., Kondratenko E.V.*** Innovative metalhybrid thermal interface // Economic Management Information Technology. 2019. Vol. 5. No. 3. P. 61–67.

7. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / ***В.С. Авдуевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов и др.*** / под общ. ред. В.С. Авдуевского, В.К. Кошкина. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.

8. ***Щеляев А.Е., Маркова Т.В.*** Моделирование тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры // Радиоэлектронные технологии. 2017. № 5(15). С. 83–86.

9. Arctic Silver Incorporated-Arctic Silver. URL: http://www. arcticsilver.com/as5.htm (дата обращения: 30.01.2017).

10. Coollaboratory Liquid Pro-Coollaboratory. URL: http://www. coollaboratory.com/product/coollaboratory-liquid-pro (дата обращения: 30.01.2017).

Поступила в редакцию 23.12.2019 г.; после доработки 10.01.2020 г.; принята к публикации 16.06.2020 г.

Кудж Станислав Алексеевич – доктор технических наук, ректор МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78), rector@mirea.ru

Кондратенко Владимир Степанович – доктор технических наук, профессор, советник ректората, заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78), vsk1950@mail.ru

Кадомкин Виктор Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Института комплексной безопасности и специального приборостроения МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78), vvkadomkin@yandex.ru

Высоканов Андрей Александрович – аспирант кафедры оптических и биотехнических систем и технологий МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, 78), maectpo_777@mail.ru

References

1. Sakunenko Y.I., Kondratenko V.S. *The device of heat removal from fuel elements*. RF Patent No. 2602805.2016. (in Russian).

2. Kondratenko V.S., Sakunenko Y.I., Vysokanov A.A. The metal hydride thermal interface materials with high thermal conductivity. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2017, no. 1, pp. 85–89. (in Russian).

3. Kondratenko V.S., Vysokanov A.A., Sakunenko Y. I. The metal hydride thermal interface materials for heat removal from fuel elements. *Pribory = Devices*, 2018, no. 4(214), pp. 46–50. (in Russian).

4. Kondratenko V.S., Vysokanov A.A., Sakunenko Y. I., Tretyakova O.N., Molotkov A.A., Tikmenov V.N. Development of a metal-hybrid thermal interface: experimental research and mathematical modeling. *Uspekhi prikladnoj fiziki = Successes of Applied Physics*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 166–173. (in Russian).

5. Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Vysokanov A.A., Sakunenko Y.I., Sleptsov M.A., Lysenko O.G. Modeling of thermal processes in fuel elements using metal – hybrid thermal interfaces. Oboronnyj kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu = *Defense complex-scientific and technical progress of Russia*, 2018, no. 3 (139), pp. 10–15. (in Russian).

6. Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Vysokanov A.A., Kondratenko E.V. Innovative metalhybrid thermal interface. *Economic Management Information Technology (EMIT)*, 2019, vol.5, no.3, pp. 61–67.

7. Avduevskii V.S., Galitseisky B.M., Glebov G.A. et al. *Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket and space technology.* Under the General editorship of V.S. Avduevskii, V.K. Koshkin. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1992. 528 p. (in Russian).

8. Shelaev A.E., Markova T.V. Modeling of thermal modes of electronic equipment. *Radio-Electronic Technologies,* 2017, no. 5(15), pp. 83–86. (in Russian).

9. *Arctic Silver Incorporated – Arctic Silve*r. Available at: http://www. arcticsilver.com/as5.htm (accessed: 30.01.2017).

10. *Coollaboratory Liquid Pro – Coollaboratory*. Available at: http://www.coollaboratory.com/product/coollaboratory-liquid-pro (accessed: 30.01.2017).

Received 23.12.2019; Revised 10.01.2020; Accepted 16.06.2020.

Information about the authors:

Stanislav A. Kudzh – Dr. Sci. (Eng.), Rector, MIREA – Russian Technological University (Russia, 119454, Moscow, Vernadsky pr., 78), rector@mirea.ru

Vladimir S. Kondratenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector's Adviser, Head of the Optical and Biotechnical Systems and Technologies Department, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (Russia, 119454, Moscow, Vernadsky pr., 78), vsk1950@mail.ru

Viktor V. Kadomin – Ph. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Information Security Department, Institute of Comprehensive Security, MIREA – Russian Technological University (Russia, 119454, Moscow, Vernadsky pr., 78), vvkadomkin@yandex.ru

Andrey A. Vysokanov – PhD Student of the Optical and Biotechnical Systems and Technologies Department, Institute of Physics and Technology, MIREA – Russian Technological University (Russia, 119454, Moscow, Vernadsky pr., 78), maectpo_777@mail.ru

УДК 621.316.79:662.927 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-358-366

Стабилизация температуры теплового химического источника тока для увеличения временного ресурса работы

А.И. Сергеев[1], В.В. Захаров[2], О.В. Волкова[2]

[1]Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
[2]Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия

olga@ihte.uran.ru

Стабилизатор температуры увеличивает эксплуатационное время работы батареи и предназначен для термоактивируемых тепловых химических источников тока. В работе задача поддержания оптимального теплового баланса в ограниченном объеме в течение длительного времени решена путем стабилизации температуры батареи в оптимальном диапазоне. Представлен стабилизатор температурного режима источника тока, использующий для работы энергию самой батареи. Показано, что отличительной особенностью стабилизатора является совмещение функции нагревательного элемента и температурного сенсора. Экспериментальные исследования проведены с помощью инструментального контроля качества работы стабилизатора на макете и реальных батареях. Разработан и реализован экспериментально стабилизатор температуры, с помощью которого возможно достаточно длительно (до 1 ч) поддерживать заданную температуру при высокой экономичности расхода энергии батареи теплового химического источника тока. Это достигнуто благодаря тому, что энергия батареи расходуется практически только в режиме нагрева. Стабилизатор отличается малыми размерами, прост в реализации и настройке. Представленное техническое решение стабилизатора может найти применение в других областях техники для стабилизации температурного режима без использования дополнительного температурного сенсора.

Ключевые слова: термоактивируемый химический источник тока; стабилизатор температуры; нагревательный элемент; сенсор температуры

Для цитирования: Сергеев А.И., Захаров В.В., Волкова О.В. Стабилизация температуры теплового химического источника тока для увеличения временного ресурса работы // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 358–366. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-358-366.

© А.И. Сергеев, В.В. Захаров, О.В. Волкова, 2020

Stabilizing of Temperature of Thermal Chemical Current Source for the Increase of Temporal Resource of Work

A.I. Sergeev[1], V.V. Zakharov[2], O.V. Volkova[2]

[1]Ural Federal University named after the first President of Russia, B.N.Eltsin, Ekaterinburg, Russia
[2]Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

olga@ihte.uran.ru

Abstract: The temperature stabilizer is designed for thermally activated thermal chemical current sources, in which it is necessary to maintain the optimal thermal balance in a limited amount for a long time. In the work the formulated problem has been solved by stabilizing the battery temperature in the optimal range. The stabilizer of the temperature range of the current source, using for its work the energy battery itself, has been presented. The stabilizer distinctive feature is the combination of the of the heating element function and of the temperature sensor. The experimental studies with the instrument control of the stabilizer work quality have been performed on the layout and real batteries. The temperature stabilizer, with the help of which it has been shown that it is possible to maintain the specific temperature for quite a long time (up to one hour) at high energy efficiency of the current source thermal chemical battery, has been developed and implemented experimentally. This has been achieved due to the fact that the energy of the battery is consumed almost only in the heating mode. The stabilizer is small, easy to implement and to adjust. The presented stabilizer solution can be used in other applications requiring the temperature stabilization without using an additional temperature sensor.

Keywords: thermal batteries; temperature stabilizer; heating element; temperature sensor

For citation: Sergeev A.I., Zakharov V.V., Volkova O.V. Stabilizing of temperature of thermal chemical current source for the increase of temporal resource of work. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 358–366. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-358-366.

Введение. Разработка новых типов источников энергии для питания не только электронного оборудования, но и силовых электрических агрегатов, например электродвигателей исполнительных устройств, – актуальная задача, стоящая перед разработчиками. Перспективными в этом направлении представляются термоактивируемые химические источники тока (ТХИТ). Преимущество ТХИТ перед другими видами источников электрической энергии состоит в возможности обеспечения высокой удельной мощности в широком диапазоне температур окружающей среды (от – 60 до + 50º С) [1–11]. Однако ТХИТ характеризуются относительной непродолжительностью работы – до 20 мин. Для увеличения времени работы батареи необходимо обеспечить поддержание ее температуры на оптимальном уровне. Перспективным техническим решением задачи является применение стабилизатора температуры, нагревательный элемент которого встроен в корпус батареи [11–13].

Типовые схемотехнические решения использования нагревателя в качестве сенсора приведены в работах [14–16]. Однако эти решения имеют следующий существенный недостаток: они неэкономичны, что особенно критично для автономных источников энергии, в качестве которых применяются батареи и аккумуляторы. Кроме того, при относительно громоздкой схемотехнике они используют напряжение промышленной частоты.

Схемотехника и описание работы стабилизатора температуры. Разработанный авторами стабилизатор температуры не имеет указанных недостатков. Поясним работу стабилизатора температуры, ограничиваясь только функциональной схемой, так как схемотехническая реализация описываемых блоков может быть различная. Функциональная схема стабилизатора температуры показана на рис.1.

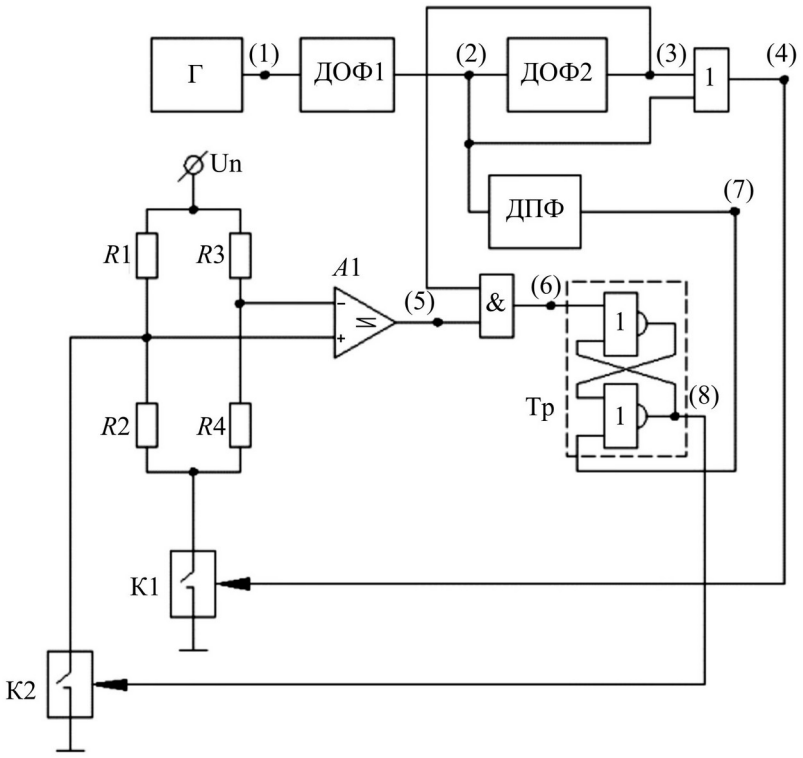


Рис.1. Функциональная схема стабилизатора: *R*1...*R*4 – резистивный мост; сопротивление *R*1 – тепловыделяющий (нагревательный) элемент, или температурный сенсор, встроенный в корпус ТХИТ; *R*2 – эталонное сопротивление; К1 и К2 – управляемые коммутаторы; *A*1 – компаратор напряжения; Г – генератор прямоугольных импульсов; ДОФ1 и ДОФ2 – дифференциаторы отрицательных фронтов логических сигналов; ДПФ – дифференциатор положительных фронтов логических сигналов; Тр – *RS*-триггер; 2ИЛИ и 2И – элементы логики

Fig.1. Function circuit of stabilizer: *R*1...*R*4 – resistorbridge; *R*1 – heating resistor or tem-perature sensor on inner body of the thermal; *R*2 – calibrating resistor; К1 и К2 – commuta-tors; *A*1 – voltage comparator; Г – generator of the right-angled impulses; ДОФ1 и ДОФ2 – differentiators of the negative front of the logical signals; ДПФ – differentiators of the positive front of the logical signals; Тр – *RS*-trigger; 2ИЛИ and 2И – elements of the logic

В стабилизаторе температуры в качестве коммутаторов К1 и К2 используются MOSFET-транзисторы IRF3805 либо аналогичные им. Данные транзисторы управляются логическими сигналами с уровнями КМОП и имеют сопротивление сток – исток в закрытом состоянии не менее 3,3 МОм. Также применяются компаратор LM397 с малым

током потребления либо аналогичный ему по характеристикам и сопротивление (*R*2) *С*2-29 либо сопротивление другого типа с высокой температурной стабильностью. В качестве делителя напряжения правого плеча моста *R*3, *R*4 лучше использовать многооборотный высокоомный резистор СП5-2 или СП5-3 с сопротивлением 47 или 33 кОм, центральный вывод которого подключен ко входу компаратора *А*1. Остальные блоки, в том числе и генератор, реализованы на элементах стандартной КМОП-логики. Стабилизатор напряжения для питания КМОП-микросхем и компаратора *А*1 на схеме не показан. Это может быть недорогой и экономичный интегральный стабилизатор напряжения серии LM7800 либо аналогичный с питанием от батареи ТХИТ.

Батарея ТХИТ имеет конструкцию «стакан в стакане», т.е. содержит внешний и внутренний металлические корпусы, промежуток между которыми заполнен теплоизолирующим материалом. Тепловыделяющий элемент *R*1 – проволочный (нихром) резистор, расположенный между теплоизолирующим материалом и внутренним корпусом и прилегающий к нему. Сопротивление *R*1 зависит от необходимой мощности для поддержания оптимальной температуры элементов ТХИТ и обычно не превышает 15 Ом. Важно обеспечить гальваническую развязку и наилучший тепловой контакт нагревателя с внутренним металлическим корпусом ТХИТ для минимизации разности температур между ними в процессе работы батареи. Источником питания стабилизатора температуры является ТХИТ. Стабилизатор находится в одном из трех режимов работы: холодный режим (без тепловыделения); режим анализа («опроса») температуры ТХИТ; режим нагрева ТХИТ (с максимальным тепловыделением нагревательного элемента *R*1).

Холодный режим соответствует оптимальной температуре корпуса ТХИТ (500–600 ºС), которая зависит от модификации. Установлено, что допустимая абсолютная погрешность поддержания температуры корпуса батареи составляет примерно ± 15 ºС. При уменьшении температуры за рамки указанной погрешности не гарантируется сохранение выходного напряжения батареи и максимального тока нагрузки в течение длительного времени. Увеличение температуры ведет к неоправданной потере энергии. И то и другое сокращает временной ресурс нормальной работы ТХИТ.

Частота «опроса» температуры определяет погрешность ее поддержания. Увеличение частоты сверх необходимого значения уменьшает погрешность, но при этом незначительно снижается экономичность и, соответственно, временной ресурс работы ТХИТ.

Отметим, что батарея ТХИТ исходно активируется пиротехническим нагревателем. Элементы ТХИТ разогреваются до температуры, превышающей оптимальную температуру примерно на 50 ºС. Эти элементы находятся во внутреннем корпусе и отделены от него тонким газовым промежутком, они имеют высокую теплоемкость в отличие от теплоемкостей внешнего и внутреннего корпусов батареи. Для предотвращения утечки тепла (остывания) элементов ТХИТ и сохранения их номинальной температуры внутренний корпус должен иметь температуру элементов с допустимой погрешностью примерно ± 15 ºС. Нагревательный элемент и внутренний корпус служат тепловым барьером между внешней средой и элементами ТХИТ, который обеспечивает постоянную температуру последних. Длительность режима нагрева зависит от инерционности процессов теплопередачи как в окружающую среду, так и к внутреннему корпусу ТХИТ и определяется экспериментально. Основную роль при хорошем тепловом контакте между нагревательным элементом и внутренним корпусом батареи играют процессы теплопередачи через теплоизоляцию и внешний корпус в окружающую среду.

Работа стабилизатора температуры поясняется осциллограммами, показанными на рис.2. Приведенные на осциллограммах сигналы сняты в указанных на функциональной схеме контрольных точках (1) – (8).

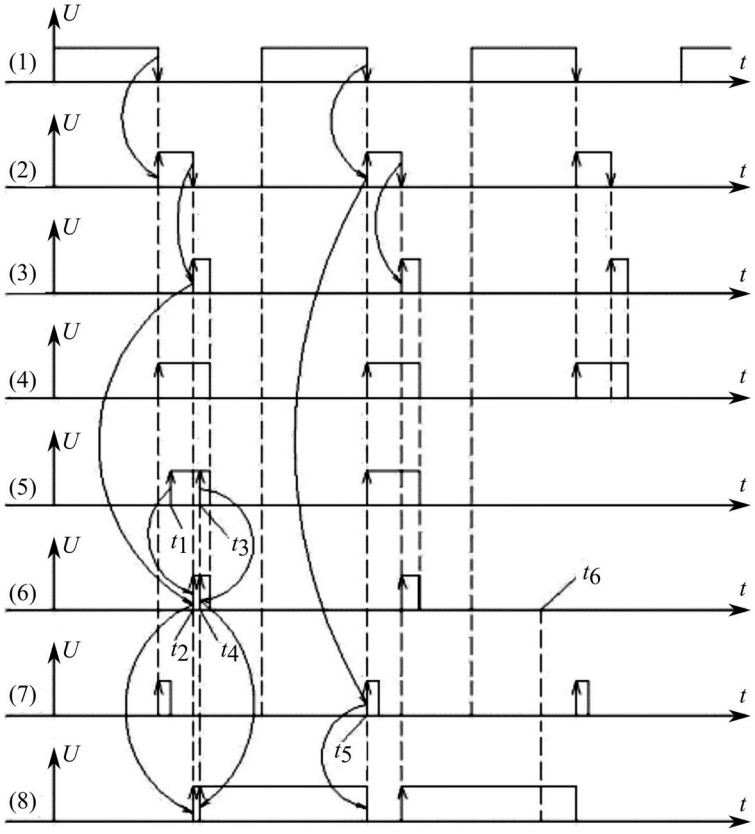


Рис.2. Осциллограммы сигналов стабилизатора: (1)–(8) – контрольные точки
Fig.2. Oscillograms of signals of the stabilizer: (1)–(8) – control points

В холодном режиме ключи К1 и К2 разомкнуты. Токи через мост и нагревательный элемент *R*1 не протекают, поэтому расход энергии батареи ТХИТ стабилизатором температуры минимальный. Потерями энергии в блоках логики на КМОП-элементах можно пренебречь. Генератор вырабатывает прямоугольные сигналы (1). ДОФ1 формирует прямоугольные импульсы (2) по отрицательному фронту сигналов генератора. ДОФ2 формирует прямоугольные импульсы (3) по отрицательному фронту сигналов ДОФ1. Выходные сигналы ДОФ1 и ДОФ2 суммируются элементом ИЛИ, по положительному фронту суммарного сигнала которого (4) замыкается коммутатор К1. Стабилизатор переходит в режим анализа температуры. Анализ температуры проводится примерно один раз каждые 2–4 с (определяется частотой генератора) в течение 50–150 мкс. При таком малом интервале времени тепловыделением в нагревателе *R*1 (потерями энергии) можно пренебречь. Сопротивления *R*1 и *R*2 образуют делитель напряжения питания моста. Если температура *R*1, равная температуре батареи, стала ниже номинальной, то сопротивление тепловыделяющего *R*1 возрастает и напряжение на неинвертирующем входе компаратора *A*1 становится больше, чем на инвертирующем, которое задается делителем *R*3 и *R*4. На выходе компаратора *A*1 (при разомкнутом К2) формируется логический уровень «1» (5), например, в моменты времени *t*1 или *t*3. Тогда на выходе (6) элемента 2И в моменты времени *t*2 или *t*4 формируется так же логический уровень «1», при появлении которого на выходе (8) триггера формируется логический уровень «1». При этом замыкается К2 и стабилизатор переходит в режим нагрева.

В режиме нагрева в левом плече моста через сенсор (нагреватель *R*1) протекает максимальный ток. Происходит нагрев *R*1 и, соответственно, батареи. Данный режим длится до момента времени *t*5, т.е. до появления положительного фронта (логического уров-

ня «1») с ДПФ (7). На выходе триггера возникает логический уровень «0». Ключ К2 размыкается, а К1 замыкается, и стабилизатор снова переходит в режим анализа.

В случае если температура батареи и, соответственно, $R1$ находятся в пределах установленной погрешности или несколько выше, например, к моменту времени $t6$, то компаратор $A1$ не срабатывает. Стабилизатор после режима анализа переходит в холодный режим до следующего анализа. В холодном режиме температура нагревателя $R1$ и батареи уравнивается. Возможные ложные срабатывания компаратора $A1$ в холодном режиме никак не влияют на работу устройства, поскольку для срабатывания триггера необходимо наличие двух логических сигналов «1» – на выходах (3) и (5).

Порог срабатывания компаратора, соответствующий нужной номинальной температуре батареи, устанавливается регулировкой многооборотного резистора правого плеча моста $R3$ и $R4$. Применение резистивного моста позволяет минимизировать и даже исключить влияние нестабильности и пульсаций источника питания на регулировку температуры ТХИТ.

Переходные процессы переключения MOSFET-транзисторов на осциллограммах не рассматриваются по причине пренебрежимо малой их длительности (десятки наносекунд) при периоде колебаний генератора в несколько секунд. По той же причине потреблением энергии и тепловыделением при этих процессах также можно пренебречь.

Методика настройки стабилизатора температуры. Для отработки схемотехнического решения стабилизатора температурного режима и проверки его работы использована модельная установка, включающая в себя макет батареи ТХИТ с параметрами, имитирующими тепловой режим в процессе активной работы батареи. Схема установка представлена на рис.3.

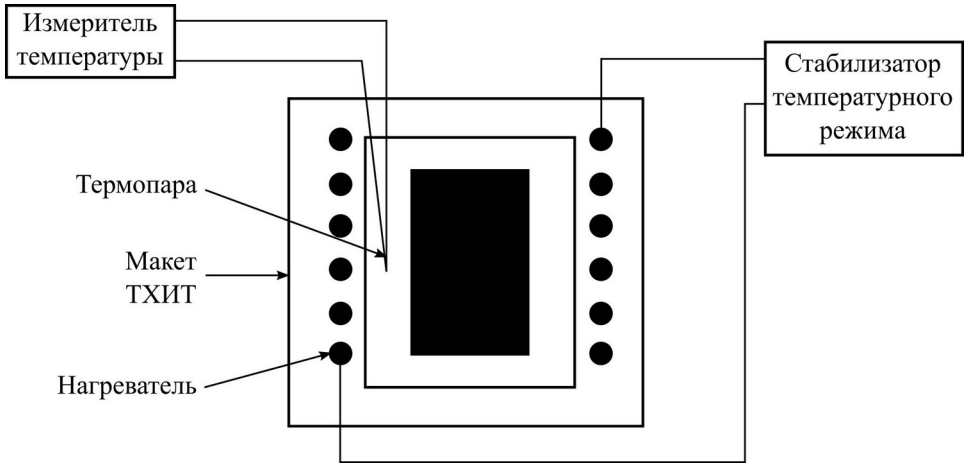


Рис.3. Схема модельной установки
Fig.3. Model apparatus

Макет ТХИТ представляет собой теплоизолирующий корпус батареи, содержащий внутри металлический стакан, на внешней поверхности которого находится нагревательный элемент. В металлический стакан помещен керамический тигель, массогабаритные параметры которого соответствуют сборке элементов ТХИТ. Методика отработки режимов работы стабилизатора заключается в следующем. Тигель нагревается до температуры, превышающей на 50 ºС температуру, необходимую для работы элементов ТХИТ. Через 30 с включается стабилизатор температурного режима. Питание стабилизатора осуществляется от внешнего источника напряжения (на рис.3 не показан). Температура внутри макета в процессе отработки режимов контролируется термопарой.

Результаты испытаний работы стабилизатора в составе батареи. Испытания стабилизатора в составе готовых батарей ТХИТ проведены в Институте высокотемпературной электрохимии УрО РАН (г. Екатеринбург). На рис.4 (кривая *1*) приведен график изменения температуры сборки электрохимических элементов ТХИТ после ее активации без термостабилизации с применением теплоизоляции батареи от внешней среды. Батарея ТХИТ включается путем ее активации пиротехническим нагревателем. Время активации составляет не более 20 с, при этом температура внутри корпуса батареи ТХИТ повышается до 670 ºС.

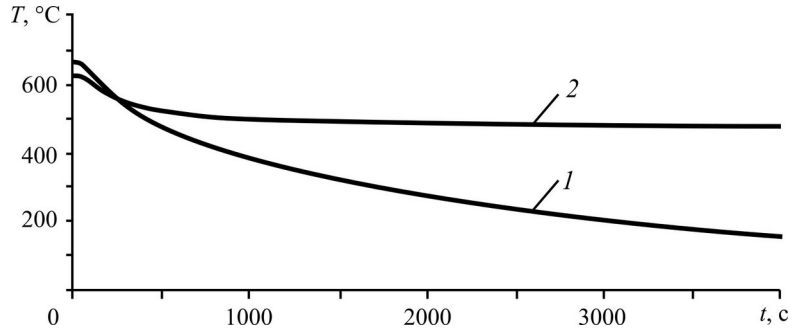


Рис.4. Изменение температуры ТХИТ без термостабилизации (кривая *1*) и с применением стабилизатора температуры (кривая *2*)
Fig.4. Temperature variation of thermal battery without stabilizer (curve *1*) and with stabilizer (curve *2*)

Из рис.4 (кривая *1*) видно, что температура сборки электрохимических элементов снижается примерно за 500 с до 500 ºС, а за 4000 с – до 150 ºС. Скорость снижения температуры зависит от толщины теплоизоляции, но ее увеличение ухудшает массогабаритные характеристики ТХИТ.

На рис.4 (кривая *2*) приведен график изменения температуры сборки электрохимических элементов ТХИТ после ее активации с применением в составе ТХИТ стабилизатора температуры при использовании той же самой теплоизоляции батареи от внешней среды. Задаваемая температура составляет приблизительно 550 ºС. Видно, что снижение температуры сборки электрохимических элементов уменьшается до 550 ºС примерно за то же время, что и без термостабилизации. Дальнейшее уменьшение температуры составляет не более 10 ºС от заданной за 4000 с.

Заключение. Разработанный стабилизатор температуры ТХИТ имеет хорошие характеристики работы в составе батареи, что обеспечивает стабильный режим в требуемом диапазоне температур с точностью ± 10 ºС. Погрешность поддержания температуры можно значительно уменьшить регулировкой частоты задающего генератора. При необходимости может быть использован также экономичный прецизионный компаратор *A*1, например, LMV762 либо аналогичный. Времязадающие цепи генератора и дифференциаторов фронтов стабилизатора не критичны к выбору пассивных элементов и допускают изменение значений в широких пределах. Правильно собранный стабилизатор не требует настройки. Задание желаемой температуры сводится к установке порога срабатывания компаратора многооборотным резистором правого плеча моста. Верхний предел стабилизируемой температуры зависит от нагревательного элемента.

Стабилизатор температуры ТХИТ может найти применение и для других целей, особенно при дефиците электроэнергии.

Литература

1. ***Guidotti R.A., Masset P.*** Thermally activated («thermal») battery technology. Part I: An overview // Journal of Power Sources. 2006. Vol. 161. P. 1443–1449.

2. ***Skundin A.M.*** Electrochemical power sources: handbook. Moscow: Institute of High-Power Engineering, 2003. 740 p.

3. ***Kukoz F.I., Trush F.F., Kondratenkov V.I.*** Thermally activated batteries. Rostov: Izd. Rostov. Univ., 1989. 208 p.

4. ***Guidotti R., Reinhardt F.W., Dai J., Reisner D.E.*** Performance of thermal cells and batteries made with plasma-sprayed cathodes and anodes // Journal of Power Sources. 2006. Vol. 160. P. 1456–1464.

5. ***Nelson P.A.*** Advanced high-temperature batteries // Journal of Power Sources. 1990. Vol. 29. P. 565–577.

6. ***Masset P.J., Guidotti R.A.*** Thermally activated («thermal») battery technology. Part IIIa: FeS_2 cathode material // Journal of Power Sources. 2008. Vol. 177. P. 595–609.

7. ***Masset P.J., Guidotti R.A.*** Thermally activated («thermal») battery technology. Part IIIb: Sulfur and oxide-based cathode materials // Journal of Power Sources. 2008. Vol. 178. P. 456–466.

8. ***Butler P., Wagner C., Guidotti R., Francis I.*** Long-life, multi-tap thermal battery development // Journal of Power Sources. 2004. Vol. 136. P. 240–245.

9. ***Au M.*** Nanostructured thermal batteries with high power density// Journal of Power Sources. 2003. Vol. 115. P. 360-366.

10. ***Masset P.J.*** Thermal stability of FeS_2 cathode material in «thermal» batteries: effect of dissolved oxides in molten salt electrolytes // Z. Naturforsch. 2008. Vol. 63a. P. 596–602.

11. ***Волкова О.В., Захаров В.В., Резницких О.Г.*** Электровосстановление хлорида хрома (III) в тепловом химическом источнике тока // Расплавы. 2017. № 4. 294–301.

12. Батарея элементов тепловых химических источников тока / ***В.В. Захаров и др.*** // Патент РФ № 2573860. 2014. Бюл. № 3.

13. Батарея элементов тепловых химических источников тока/ ***В.В. Захаров и др.*** // Патент РФ № 2706728. 2019. Бюл. № 32.

14. ***Елизаров П.*** Стабилизатор температуры жала паяльника от 08.12.2014. Приднестровский портал радиолюбителей radio –hobby.org. URL: http://radio-hobby.org/modules/news/article.php?storyid=1493 (дата обращения: 10.02.2020).

15. ***Матыцин А.*** Стабилизатор температуры жала паяльника от 20.12.2009. RadioRadar.net: Электронно-информационный портал. URL: http://www.radioradar.net/radiofan/miscellaneous/stabilized_temperature_soldering_tip.html (дата обращения: 10.02.2020).

16. ***Евсеев А.*** Стабилизированный регулятор мощности // Радио. 2002. № 4. С. 36–39.

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.; после доработки 14.02.2020 г.; принята к публикации 16.06.2020 г.

Сергеев Александр Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), aiseas@mail.ru

Захаров Валерий Вячеславович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук (Россия, 620137, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 22), zaharov@ihte.uran.ru

Волкова Ольга Вячеславовна – кандидат химических наук, научный сотрудник Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук (Россия, 620137, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 22), olga@ihte.uran.ru

References

1. Guidotti R.A., Masset P. Thermally activated («thermal») battery technology. Part I: An overview. *Journal of Power Sources*, 2006, vol. 161, pp. 1443–1449.

2. Skundin A.M. *Electrochemical Power Sources*. Handbook. Moscow, Institute of High-Power Engineering, 2003. 740 p. (in Russian)

3. Kukoz F.I., Trush F.F., Kondratenkov V.I. *Thermally activated batteries*. Rostov. Univ. Publ., 1989. 208 p. (in Russian).

4. Guidotti R., Reinhardt F.W., Dai J., Reisner D.E. Performance of thermal cells and batteries made with plasma-sprayed cathodes and anodes. *Journal of Power Sources,* 2006, vol. 160, pp. 1456–1464.

5. Nelson P.A. Advanced high-temperature batteries. *Journal of Power Sources,* 1990, vol. 29, pp. 565–577.

6. Masset P.J., Guidotti R.A. Thermally activated («thermal») battery technology. Part IIIa: FeS_2 cathode material. *Journal of Power Sources*, 2008, vol. 177, pp. 595–609.

7. Masset P.J., Guidotti R.A. Thermally activated («thermal») battery technology. Part IIIb: Sulfur and oxide-based cathode materials. *Journal of Power Sources*, 2008, vol. 178, pp. 456–466.

8. Butler P., Wagner C., Guidotti R., Francis I. Long-life, multi-tap thermal battery development. *Journal of Power Sou*rces, 2004, vol. 136, pp. 240–245.

9. Au M. Nanostructured thermal batteries with high power density. *Journal of Power Sources*, 2003, vol. 115, pp. 360–366.

10. Masset P.J. Thermal Stability of FeS2 Cathode Material in «Thermal» Batteries: Effect of Dissolved Oxides in Molten Salt Electrolytes. *Z. Naturforsch.* 2008, vol. 63a, pp. 596–602.

11. Volkova O.V., Zakharov V.V., Reznitskikh O.G. Chromium (III) Chloride as a Promising Cathode Material for Thermal Batteries. *Rasplavy*, 2017, vol. 4, pp. 294–301.

12. Zakharov V.V. et al. *Battery of thermal chemical cells*. Patent RF 2573860. October 31. 2014. (in Russian).

13. Zakharov V.V. et al. *Battery of thermal chemical cells*. Patent RF 2706728. July 19. 2019.

14. Elizarov P. *Soldering iron tip temperature stabilizer of 08.12.2014.* Dnestr portal of radio fans radio – hobby.org. Available at: http://radio-hobby.org/modules/news/article.php?storyid=1493 (accessed: 10.02.2020). (in Russian).

15. Matitsin A. *Soldering iron tip temperature stabilizer of 20.12.2009.* RadioRadar.net: Electronically - the information portal. Available at: http://www.radioradar.net/radiofan/miscellaneous/stabilized_temperature_soldering_tip.html (accessed: 10.02.2020) (in Russian).

16. Evseev A. The stabilized power regulator. *Radio = Radio,* 2002, no. 4, pp. 36–39. (in Russian).

Received 14.02.2020; Revised 14.02.2020; Accepted 16.06.2020

Information about the authors:

Alexander I. Sergeev – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Electrical Engineering Department of Ural Power Engineering Institute, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin (Russia, 620002, Ekaterinburg, Mir st., 19), aiseas@mail.ru

Valery V. Zakharov – Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, 620137, Ekaterinburg, S. Kovalevskaya st., 22), Zaharov@ihte.uran.ru

Olga V. Volkova – Cand. Sci. (Chem.), Researcher of the Institute of High-Temperature Electrochemistry, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Russia, 620137, Ekaterinburg, S. Kovalevskaya st., 22), olga@ihte.uran.ru

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 681.51.011:004.93 **DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-367-373**

Подготовка базы данных для автоматизированного контрольно-пропускного пункта на режимный объект

Ю.П. Лисовец, Е.Л. Романова, Вай Ян Мин

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

lisovec@gmail.com

В настоящее время методы биометрической идентификации на основе уникальных физических и поведенческих характеристик человека широко используются в системах контроля и доступа к информации. Система распознавания лиц позволяет автоматизировать проход на охраняемые объекты с помощью компьютерного зрения. При этом важную роль в такой системе играет создание базы данных лиц людей, имеющих допуск на режимный объект. В работе применен метод главных компонент для реализации процесса распознавания лиц. Метод позволяет уменьшить размерность данных с утратой минимального количества важной информации. Алгоритм Виолы – Джонса применен для обнаружения лица, создания базы данных лиц и тестирования результатов распознавания. Для вычисления расстояний между тестовыми изображениями и изображениями базы данных использована евклидова метрика. Показано, что предварительная обработка базы данных позволяет улучшить результаты распознавания.

***Ключевые слова*:** распознавание лиц; метод главных компонент; метод Виолы – Джонса

***Для цитирования*:** Лисовец Ю.П., Романова Е.Л., Вай Ян Мин. Подготовка базы данных для автоматизированного контрольно-пропускного пункта на режимный объект // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 367–373. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-367-373

© Ю.П. Лисовец, Е.Л. Романова, Вай Ян Мин, 2020

Preparing a Database for an Automated Checkpoint at a Sensitive Area

U.P. Lisovec, E.L. Romanova, Wai Yan Min

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

lisovec@gmail.com

Abstract: Currently, the biometric identification methods based on the unique physical and behavioral characteristics of a person are widely used in control systems and access to information. The face recognition system permits to automate an access to protected objects using computer vision. An important role in such a system plays the creation of a database for persons with an access to the object. Here, the creation of the database of persons with an access to the working object plays an important role in such system. In this work the principal component method for implementing the face recognition process has been proposed. The method permits to reduce the dimensionality of the data with the loss of the least amount of important information. The Viola-Jones algorithm is used to detect faces, to create a database of faces and to test the recognition results. For calculating the distances between the test images and the database images the Euclidean distance metric has been used. It has been shown that the preliminary processing of the data can improve the recognition results.

***Keywords*:** face recognition; principal component and analysis method; Viola – Jones method; face detection

***For citation*:** Lisovec U.P., Romanova E.L., Wai Yan Min. Preparing a database for an automated checkpoint at a sensitive area. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 367–373. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-367-373

Введение. Система распознавания лиц – это одна из наиболее перспективных технологий биометрической бесконтактной идентификации человека по лицу. За последние двадцать лет выполнено много теоретических и экспериментальных работ в этом направлении. Однако задача повышения точности распознавания лиц является одной из важных для практических применений. Система распознавания лиц используется в таких приложениях, как безопасность, контроль и управление доступом, наблюдение, взаимодействие человека и компьютера, создание, анализ и исследование различных баз данных изображений и т.д. [1, 2]. Разработанные на сегодняшний день методы и алгоритмы для распознавания лиц имеют свои преимущества и недостатки.

Известно, что человеческий мозг с трудом различает лица людей, относящихся к представителям другой расы. Это явление называется эффектом перекрестных рас (cross-race effect) [3]. В связи с появлением в последние годы большого количества студентов-иностранцев данная проблема возникла, в частности, в отделе внутренней безопасности МИЭТ. Система прохода в МИЭТ устроена таким образом, что сотрудник отдела внутренней безопасности должен сверить лицо входящего человека с его фотографией из базы данных, которую он видит на экране. Если сотрудник считает, что перед ним другой человек, то он выясняет его личность. Цель настоящей работы – разработка искусственного интеллекта, способного лучше человека различать лица как одной, так и «перекрестной расы».

Создание базы данных изображений лиц. Для реализации проекта распознавания лиц необходима база изображений лиц, качество которой является важнейшим фактором. В экспериментах участвовали сорок магистрантов из Республики Союз Мьянма, обучающихся в МИЭТ. Сделано по пятьдесят фронтальных фотографий каждого из них при стандартном освещении. Допускались небольшие движения головой. Обнаружение лиц на снимках проводилось с помощью алгоритма Виола – Джонса [4, 5].

Для создания базы данных выбрано по десять фотографий десяти человек. Остальные фотографии использовались для тестирования алгоритмов распознавания. Основой для распознавания служили расстояния между тестовыми изображениями и изображениями в базе. Для распознавания лиц использовался метод главных компонент (МГК), реализованный в среде MATLAB. МГК является наиболее известным способом уменьшения объема данных без потери важной информации и применяется в различных областях. При реализации этого метода изображения лиц представляют в виде линейной комбинации взвешенных собственных векторов, называемых «собственные лица» (Eigenfaces). Собственные векторы получают из ковариационной матрицы базы данных изображений в количестве 100 штук [6]. В работе используются изображения в оттенках серого, значения пикселей на них находятся в диапазоне от 0 (черный) до 255 (белый).

Для реализация программы каждое изображение преобразуется в вектор-столбец (10304 × 1) и объединяется в матрицу D (базу данных) размерности (10304 × 100):

$$D = [X_1, X_2, X_3, \ldots, X_n].$$

Далее среднее изображение всего набора данных M вычисляется для получения общих черт каждого изображения из набора данных:

$$M = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} X_k .$$

Для выполнения нормализации среднее изображение набора данных вычитается из каждого вектора изображения набора данных:

$$B_k = X_k - M, \quad k = 1, 2, \ldots, n,$$
$$A = [B_1, B_2, B_3, \ldots, B_k].$$

Ковариационная матрица C определяется как

$$C = A^T A,$$
$$A^T A v_i = \lambda_i v_i.$$

Затем в соответствии с МГК выбираются двадцать собственных лиц (собственных векторов), соответствующих наибольшим собственным значениям [6, 7]. Каждое изображение лица из набора данных проецируется на пространство лица по следующей формуле:

$$Y_k = o^T(X_k - M),$$

где o^T – выбранные собственные векторы; $(X_k - M)$ – нормализация каждого изображения в базе. Собственный вектор каждого изображения получен с использованием данного уравнения (Y_1 – для первого изображения, Y_2 – для второго изображения и т. д.).

После получения тестового изображения оно проецируется на пространство лица для нахождения собственного вектора для тестового изображения:

$$I = o^T(X - M),$$

где $(X - M)$ – нормализация тестового изображения.

В процессе распознавания входное тестовое изображение сравнивается с изображениями в базе данных и вычисляются евклидовы расстояния между ними. Каждое расстояние представляет собой меру отклонения входного тестового изображения лица из базы данных [8]. С использованием МГК для каждого изображения лица из базы вычисляются евклидовы расстояния между всеми его изображениями. В результате получено десять симметричных матриц размерности 10 × 10, на главной диагонали которых стоят нули. В силу симметричности матрицы в дальнейшем будем рассматривать только элементы, стоящие выше главной диагонали.

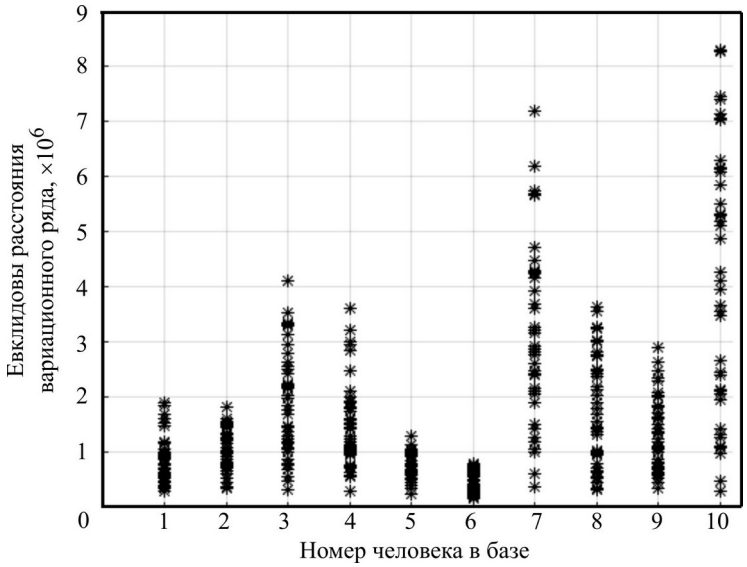


Рис.1. Вариационный ряд расстояний между векторами-изображениями лица каждого человека в базе данных
Fig.1. Variation series of distances between faces vectors-images of each person in the database

Таблица 1

Элементы симметричной матрицы расстояний между собственными векторами-изображениями для 7-го человека в базе данных, расположенные выше главной диагонали

Table 1

Elements of the symmetric distance matrix between eigenvectors-images for the seventh person in the database, located above the main diagonal

1270181	2423185	2606381	**5744614**	2929115	378703.3	4236614	2885063	2161221
	3203733	3150880	**6190666**	3695645	1067201	4462235	3153699	1429775
		997992.9	3694786	612274.1	2410532	2773512	1901170	4269099
			3619633	1196776	2482651	2913008	2152442	4240492
				3260864	**5644061**	3605091	3922742	**7174473**
					2914556	2762449	2058294	4715307
						4163199	2814759	2099184
							1512313	**5672974**
								4299427

Для того чтобы оценить разброс расстояний между изображениями, для каждого лица из базы данных взяты сорок пять значений элементов этих матриц, стоящих над главной диагональю. Эти значения отсортированы по возрастанию, и получен вариационный ряд расстояний для каждого изображения лица из базы данных (рис.1).

Из рис.1 видно, что вариационные ряды для 7-го и 10-го человека отличаются от остальных. Это может приводить к погрешности при распознавании человека на входе. Заменим для 7-го и 10-го человека те изображения в базе данных, которые приводят к большому размаху выборки. Покажем это на примере вариационного ряда расстояний для 7-го человека. Найдем элементы верхней треугольной части матрицы (оставим только элементы выше главной диагонали). Выделим эти элементы жирным шрифтом. Матрицы взаимных расстояний заметно отличаются от других (табл.1).

Подбор изображений для замены в базе данных. Для замены изображений выбираются элементы, которые больше значения $M = 5 \times 10^6$, а именно 5744600, 6190700, 5644100, 7174500 и 5673000. Чтобы узнать, какие расстояния были большими, определяются их индексы. В результате получены пять пар значений: 1 и 5; 2 и 5; 5 и 7; 5 и 10; 8 и 10. Это указывает на необходимость замены 5, 7 и 10-го изображений этого человека в базе данных на его новые изображения, менее отличающиеся от остальных. Аналогичные действия осуществляются с изображениями 10-го человека. Анализ показал, что заменить надо 6, 7, 9 и 10-е изображения. Затем создается новая база данных с замененными изображениями. Получены десять новых симметричных матриц размерности 10 × 10 и новый вариационный ряд расстояний для каждого человека из базы данных (рис.2).

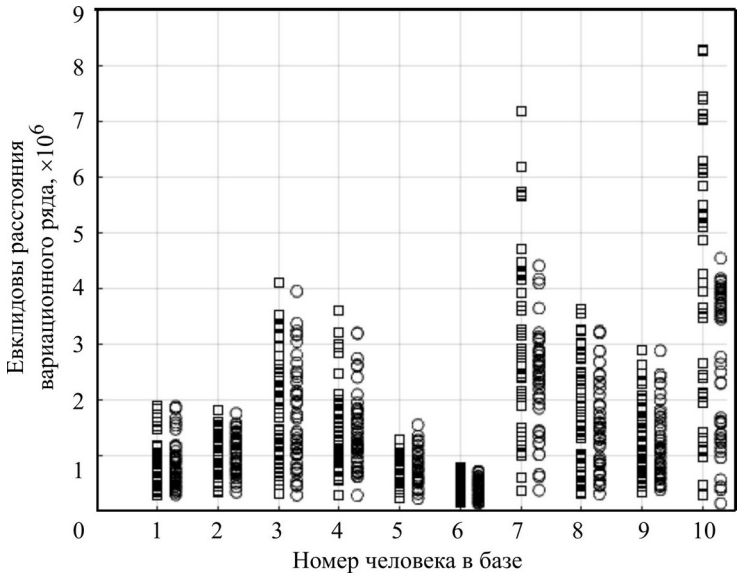


Рис.2. Вариационные ряды расстояний для каждого человека в базе данных до (□) и после (○) замены изображений
Fig.2. Variation series of distances for each person in the database before (□) and after (○) replacing images

Из рис.2 видно, что размах вариационных рядов для 7-го и 10-го человека после замены изображений уменьшился и незначительно отличается от остальных.

Эксперимент. Для тестирования результатов распознавания до и после замены изображений в базе данных использовалось сначала одно тестовое изображение на входе [9]. Результаты тестирования представлены в табл.2.

Таблица 2

Результаты идентификации до и после замены изображений в базе данных

Table 2

The results of identification before and after changing images in database

Количество тестовых изображений	До замены изображений		После замены изображений 7-го и 10-го человека в базе данных	
	Порог	Результат,%	Порог	Результат,%
Свой (100)	0,17	24	0,41	85
Чужой (300)		100		97,2

Для улучшения результатов распознавания количество тестовых изображений увеличено до пяти. Каждое тестовое изображение распознается по предыдущему способу, и если три тестовых изображения из пяти указывают на одного и того же человека из базы данных, то входящий человек есть в базе [8]. Сравнение результатов экспериментов идентификации при использовании одного тестового изображения и пяти тестовых изображений приведено в табл.3. Все эксперименты распознавания лица с использованием МГК выполнены на процессоре Intel (R) Core (TM) i3-3220 3.30 ГГц и ОЗУ с оперативной памятью 4 Гб. Время работы программы при использовании одного тестового изображения ≈0,48 с, при использовании пяти тестовых изображений ≈0,52 с.

Таблица 3

Результаты идентификации (%) при использовании одного и пяти тестовых изображений

Table 3

The comparison of identification results (%) while using single and five test images

Количество тестовых изображений	Одно изображение	Пять изображений
Свой (100)	85	100
Чужой (300)	97,2	100

Заключение. Проведенные исследования показали, что тщательный отбор изображений для использования в базе данных позволяет значительно улучшить результаты идентификации человека на входе. Применение МГК дает возможность уменьшить размерность данных с утратой минимального количества возможной информации.

Литература

1. ***Bakshi U., Singhal R.*** A survey on face detection methods and feature extraction techniques of face recognition // International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS). 2014. No. 3. Vol. 3. P. 233–237.

2. ***Barnouti, Nawaf Hazim.*** Improve face recognition rate using different image pre-processing techniques // American Journal of Engineering Research (AJER). 2016. No. 5. Vol.4. P. 46–53.

3. Cross-race effect. URL: https://ru.qwe.wiki/wiki/Cross-race_effect (дата обращения: 25.03.2020).

4. ***Viola P., Jones M.*** Robust real-time face detection // International Journal of Computer Vision. 2004. No. 57. P. 139–145.

5. ***Viola P., Jones M.*** Robust real-time object detection // 2nd International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision – Modelling, Learning, Computing, and Sampling (Vancouver, Canada, July 13, 2001). 2001. P. 4–14.

6. ***Вай Ян Мин, Лисовец Ю.П, Романова Е.Л, Тхет Наинг Вин.*** Применение статистической обработки данных для повышения эффективности распознавании лиц при использовании метода главных компонент // Электронные информационные системы. 2019. № 2 (21). С. 35–37.

7. ***Anand Singh, Erarica Mehra, Saundarya Dorle.*** Face recognition using principal component analysis // International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science. 2016. Vol. 4. Iss. 03. P. 611–614.

8. ***Вай Ян Мин.*** Моделирование контрольно-пропускного пункта для решения задачи обнаружения и идентификации лиц // 25-я Всероссийская межвузовская науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2018». М.: МИЭТ, 2018. С. 115.

9. ***Вай Ян Мин, Лисовец Ю.П., Романова Е.Л., Зо Льин У.*** Алгоритмы идентификации человека на входе автоматизированного контрольно-пропускного пункта с использованием метода главных компонент // Электронные информационные системы. 2020. № 1 (24). С. 41–43.

Поступила в редакцию 27.03.2020 г.; после доработки 27.03.2020 г.; принята к публикации 16.06.2020 г.

Лисовец Юрий Павлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики № 1 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), lisovec@gmail.com

Романова Екатерина Леонидовна – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики № 1 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), e_borzistaya@mail.ru

Вай Ян Мин – аспирант кафедры высшей математики № 1 Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), waiyanminn54@gmail.com

References

1. Bakshi U., Singhal R. A survey on face detection methods and feature extraction techniques of face recognition. *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science*, 2014 vol. 3, no. 3, pp. 233–237.

2. Barnouti Nawaf Hazim. Improve face recognition rate using different image pre-processing techniques. *American Journal of Engineering Research,*2016, vol. 5, no. 4, pp. 46–53.

3. *Cross-race effect.* Available at: https://ru.qwe.wiki/wiki/Cross-race_effect (accessed: 25.03.2020).

4. Paul Viola, Michael Jones. Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision,* 2004, no. 57. pp. 139–145.

5. Paul Viola, Michael Jones. Robust real-time object detection. *2nd International Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision – Modelling, Learning, Computing, and Sampling, Vancouver,* Canada, July 13, 2001. pp. 4–14.

6. Wai Yan Min, Lisovec U.P., Romanova E. L., Thet Naing Win. Application of statistical data processing to improve the efficiency of face recognition using the principal component analysis method. *Electronic information systems,* 2019, vol. 2, no.21. pp. 35–37. (in Russian).

7. Anand Singh, Erarica Mehra, Saundarya Dorle. Face Recognition Using Principal Component Analysis. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 2016, vol., no. 4, iss. 3, pp. 611–614.

8. Wai Yan Min. Checkpoint simulation for solving the problem of face detection and identification. *25th All-Russian interuniversity scientific and technical conference of students and postgraduates, «Microelectronics and Informatics-2018».* Moscow, MIET, 2008. (in Russian). P. 115

9. Wai Yan Min, Lisovec U.P., Romanova E. L., Zaw Lwin Oo. Algorithms for human identification at the entrance of an automated checkpoint by using the principal components analysis method. *Electronic information systems*, 2020, no. 1(24), pp. 41–43. (in Russian).

Received 27.03.2020; Revised 27.03.2020; Accepted 16.06.2020.

Information about the authors:

Yuri P. Lisovec – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Higher Mathematics №1 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), lisovec@gmail.com

Ekaterina L. Romanova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. of the Higher Mathematics №1 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), e_borzistaya@mail.ru

Wai Yan Min – PhD student of the Higher Mathematics №1 Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), waiyanminn54@gmail.com

УДК 004.457 DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-374-382

Разработка программного модуля отбора функций признаков на основе генетического алгоритма

Е.Н. Петров

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

fiddenmar@gmail.com

Современные алгоритмы машинного обучения с учителем используют признаковое описание объектов для создания классифицирующих моделей. Такое описание может включать в себя большое количество признаков в зависимости от решаемой задачи. В работе проведен анализ проблемной ситуации в рамках предметной области, связанной с составлением признакового описания объектов библиографических данных. Предложен способ решения данной проблемы за счет применения генетического алгоритма. Сформулированы принципы разработки программного модуля в общем виде и даны детали реализации на языке программирования Python. В результате решается проблема перегрузки признакового представления малозначимыми признаками, обучение и переобучение ускоряется без потери качества классификации. Генетический алгоритм разработанного программного модуля в составе программного комплекса обработки библиографических данных может применяться для отбора наиболее заначимых признаков. В ходе вычислительного эксперимента получены следующие результаты: число используемых признаков уменьшилось с 26 до 15, качество классификации увеличилось на 3 % за счет отсева признаков, способствующих переобучению.

Ключевые слова: генетический алгоритм; обработка данных; разработка программного обеспечения; язык программирования Python

Для цитирования: Петров Е.Н. Разработка программного модуля отбора функций признаков на основе генетического алгоритма // Изв. вузов. Электроника. 2020. Т. 25. № 4. С. 374–382. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-374-382

© Е.Н. Петров, 2020

GA-Based Feature Selection Software Module Development

E.N. Petrov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

fiddenmar@gmail.com

Abstract: The nowadays supervised machine learning algorithms use the feature description to classify objects. Such a description may include a great number of features provided the task demands it. In the work the genetic algorithm based feature selection as a part of the software complex of bibliographic data processing has been described. The analysis of the problem situation within the framework of the subject area, related to the feature description size of the bibliographic data objects, has been carried out. A method of solving the given problem due to the genetic algorithm feature selection has been proposed. The paper includes the general principles of the software model and the implementation details in the Python programming language. The problem of feature description and re-learning in bibliographic data processing has been solved, it has been shown that learning and re-learning accelerates without loss of the classification quality. The developed software for genetic algorithm feature selection can be applied within the framework of the software complex for bibliographic data processing.The following results have been obtained during the computational experiment: the number of features used decreased from 26 to 15, and the quality of classification increased by 3 % due to the elimination of features that contribute to retraining.

Keywords: genetic algorithm; data processing; software development; Python programming language

For citation: Petrov E.N. GA-based feature selection software module development. *Proc. Univ. Electronics*, 2020, vol. 25, no. 4, pp. 374–382. DOI: 10.24151/1561-5405-2020-25-4-374-382

Введение. В настоящее время обработка библиографических данных с целью учета научных трудов в высших учебных заведениях и других организациях осуществляется операторами вручную с помощью неавтоматизированных программных средств, что увеличивает временные и трудовые затраты. При этом качество выполненной работы остается низким. В работах [1, 2] для решения данной задачи разработана методика классификации библиографических данных с помощью условно-случайных полей и проведена верификация этой методики. В настоящей работе разрабатывается дополнительный модуль отбора функций признаков на основе генетического алгоритма и приводится его программная реализация.

Постановка задачи. Современные методы машинного обучения можно условно разделить на обучение с учителем и без учителя [3]. Обучение с учителем позволяет создавать статистические модели классификации на основе прецедентов, записываемых в виде комбинации «стимул – реакция». В рамках разработки и программной реализации

методики классификации с помощью условно-случайных полей в качестве «стимула» используется признаковое описание объекта, а в качестве «реакции» – соответствующий ему класс.

Признаковое описание – в общем случае вектор, составленный из значений фиксированного набора признаков на данном объекте. Признаки могут иметь различные типы, причем необязательно числовые, и в разработанной методике имеют бинарный вид («1» свидетельствует о наличии признака у объекта, «0» – о его отсутствии). Размер вектора, включающего в себя признаковое описание, в зависимости от типа и сложности задачи может исчисляться десятками, сотнями или тысячами элементов. В то же время, хотя время обучения будет расти пропорционально числу признаков, их индивидуальная и синергетическая значимость могут быть минимальными, а значит, их исключение из признакового описания позволит ускорить процесс обучения с минимальными потерями качества классификации в рамках некоторой погрешности, особенно для переобучающихся систем.

Таким образом, задача отбора наиболее значимых признаков и составление признакового описания, являющегося компромиссом между эффективностью и временем обучения, актуальна. Разработка программного модуля отбора функций признаков на основе генетического алгоритма в составе программного комплекса обработки библиографических данных – частное решение этой задачи.

Генетический алгоритм. В основе решения поставленной задачи лежит ее формализация в виде, пригодном для использования генетического алгоритма.

Генетический алгоритм – это эвристический алгоритм поиска, применяемый для решения задач оптимизации и моделирования путем последовательного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. Данный алгоритм является разновидностью эволюционных вычислений. Отличительная особенность генетического алгоритма от других заключается в использовании оператора скрещивания, осуществляющего операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе [4].

Задача формализуется так, чтобы ее решение могло быть закодировано в виде вектора (генотипа) генов, где каждый ген может быть битом, числом или другим объектом. В контексте решения поставленной задачи таким генотипом служит набор генов-признаков в виде последовательности битов, где «1» свидетельствует о наличии признака у объекта, а «0» – о его отсутствии. Некоторым, обычно случайным, образом создается множество генотипов начальной популяции. Они оцениваются с использованием функции приспособленности [4], в результате чего с каждым генотипом ассоциируется определенное значение (приспособленность), которое определяет, насколько хорошо описываемый им фенотип решает поставленную задачу. В качестве такой функции приспособленности выбрана величина, обратная количеству элементов в признаковом описании. Таким образом, у особей с меньшим числом признаков значение функции приспособленности будет больше. Также введено дополнительное ограничение: макрозначение F-меры (невзвешенное среднее значение по всем классам) не может быть ниже определенного значения, зависящего от этого параметра у модели с полным набором функций признаков.

Создание первоначальной популяции осуществляется следующим образом: для каждой особи определяется случайное число признаков, которые могут иметь значение «1», после чего случайным образом определяются гены, которым это значение присваивается. Несмотря на то что получаемое таким образом первое поколение оказывается неконкурентоспособным, генетический алгоритм достаточно быстро приводит его в жизнеспособную популяцию.

На этапе отбора каждая особь сначала проверяется на соответствие дополнительному ограничению и удаляется из популяции, если ему не соответствует. Затем, если число оставшихся особей превышает половину популяции, часть особей удаляется с помощью турнирной селекции, т.е. выбираются две случайные особи, из них остается та, у которой приспособленность выше. Затем к популяции применяются скрещивание и мутация, и на их основе генерируется следующее поколение.

Скрещивание особей в рамках решения задачи проводится с помощью фенотипного аутбридинга – подхода, при котором первый родитель выбирается случайно, а второй выбирается таким, чтобы имел наименьшую похожесть на первого родителя, измеряемую в зависимости от значения функции приспособленности [5]. Функцией похожести в данном случае является модуль разности приспособленностей особей. В качестве родителей выбираются все особи текущей популяции вне зависимости от удовлетворения ограничения на минимальное макрозначение *F*-меры. Такой подход к генерации следующего поколения позволяет сохранить разнообразие особей от поколения к поколению и предотвратить появление доминантного генотипа.

Создание новой особи реализовано следующим образом. За основу берется дизъюнкция генотипов родителей, после чего из числа признаков, имеющих значение «1», сохраняется случайная выборка признаков в количестве, равном среднему числу используемых родительских признаков, а остальные зануляются. В результате становится возможным сохранение существующих взаимодействий признаков и появление новых связей в последующих поколениях при постепенном уменьшении общего количества используемых признаков. К полученной популяции применяются случайные мутации, позволяющие избежать замыканий генотипов в локальном максимуме функции приспособленности. Для каждой особи вероятность появления мутации составляет 5 % для каждого признака и выражается в инвертировании бита использования признака.

Рассмотренные действия повторяются итеративно, моделируя эволюционный процесс, продолжающийся до тех пор, пока не будет найдено субоптимальное решение – минимальное количество признаков, дающих макрозначение *F*-меры не менее заданного значения.

Разработка программного модуля. Логика отбора признаков с помощью генетического алгоритма вынесена в отдельный программный модуль в составе программного комплекса преобразования библиографических данных (рис.1).

Разработанный модуль взаимодействует с модулем обучения, оценки и визуализации, формируя итоговое признаковое описание классов для подготовки и использования модели классификации на основе представленного набора признаков. Это же признаковое описание использует модуль классификации и преобразования, запрашивая его у модуля обучения, оценки и визуализации.

При работе модуля на вход ему подаются обучающая и тестовая выборки библиографических данных и признаковое описание их классов. Результатом работы программного модуля является признаковое описание меньшего или того же размера, полученное в ходе отбора вычисляемых признаков с помощью генетического алгоритма и имеющее макрозначение *F*-меры, полученное на тестовой выборке, не менее определенного значения (рис.2.).

По умолчанию входные и выходные параметры передаются в рамках программного комплекса. Однако для большей гибкости и удобства использования разработанного функционала программный модуль также имеет самостоятельный режим работы с возможностью передачи и получения данных через интерфейс командной строки. Схема алгоритма отбора признаков библиографических данных представлена на рис.3.

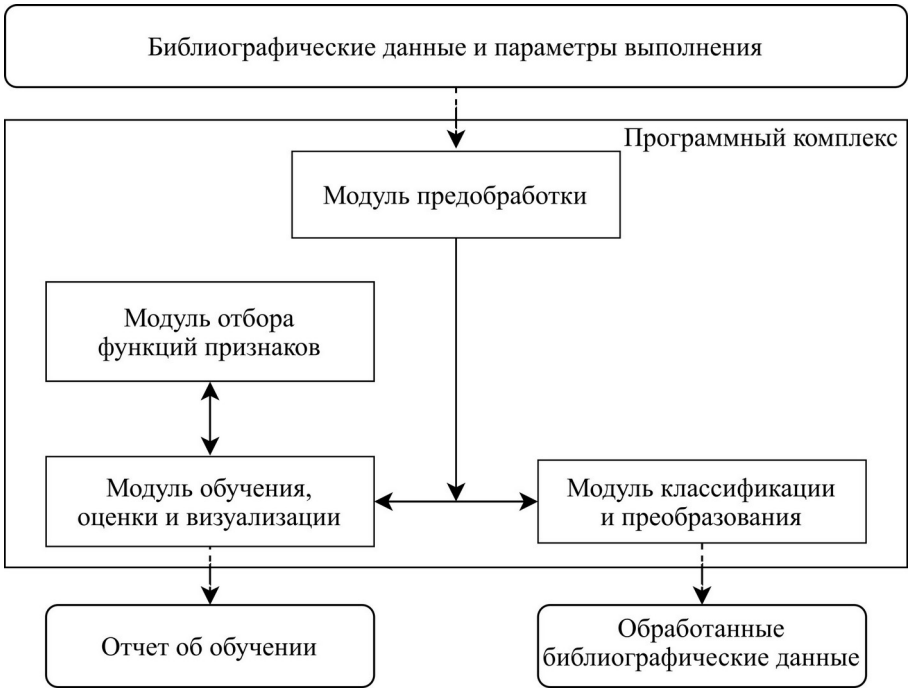


Рис.1. Структурная схема программного комплекса преобразования библиографических данных
Fig.1. Bibliographic data conversion software structure

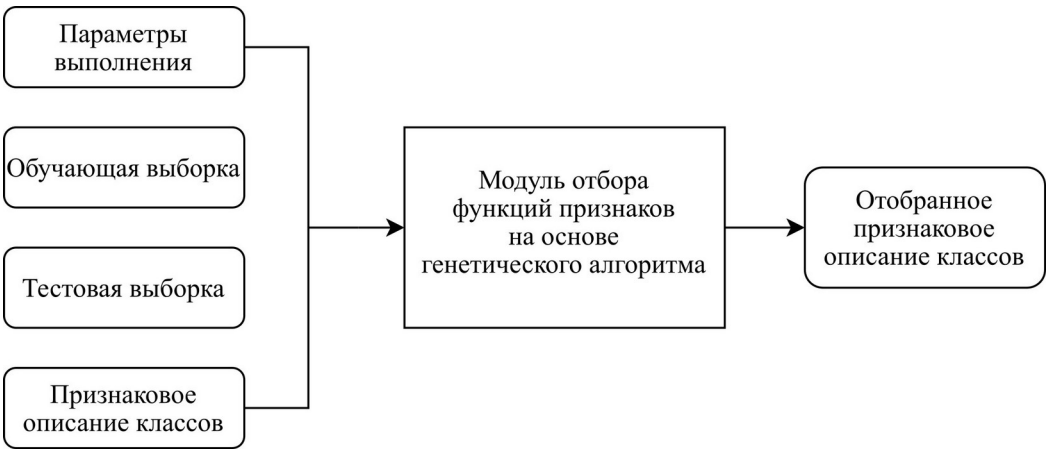


Рис.2. Схема работы программного модуля отбора функций признаков на основе генетического алгоритма
Fig.2. GA-based feature selection module scheme

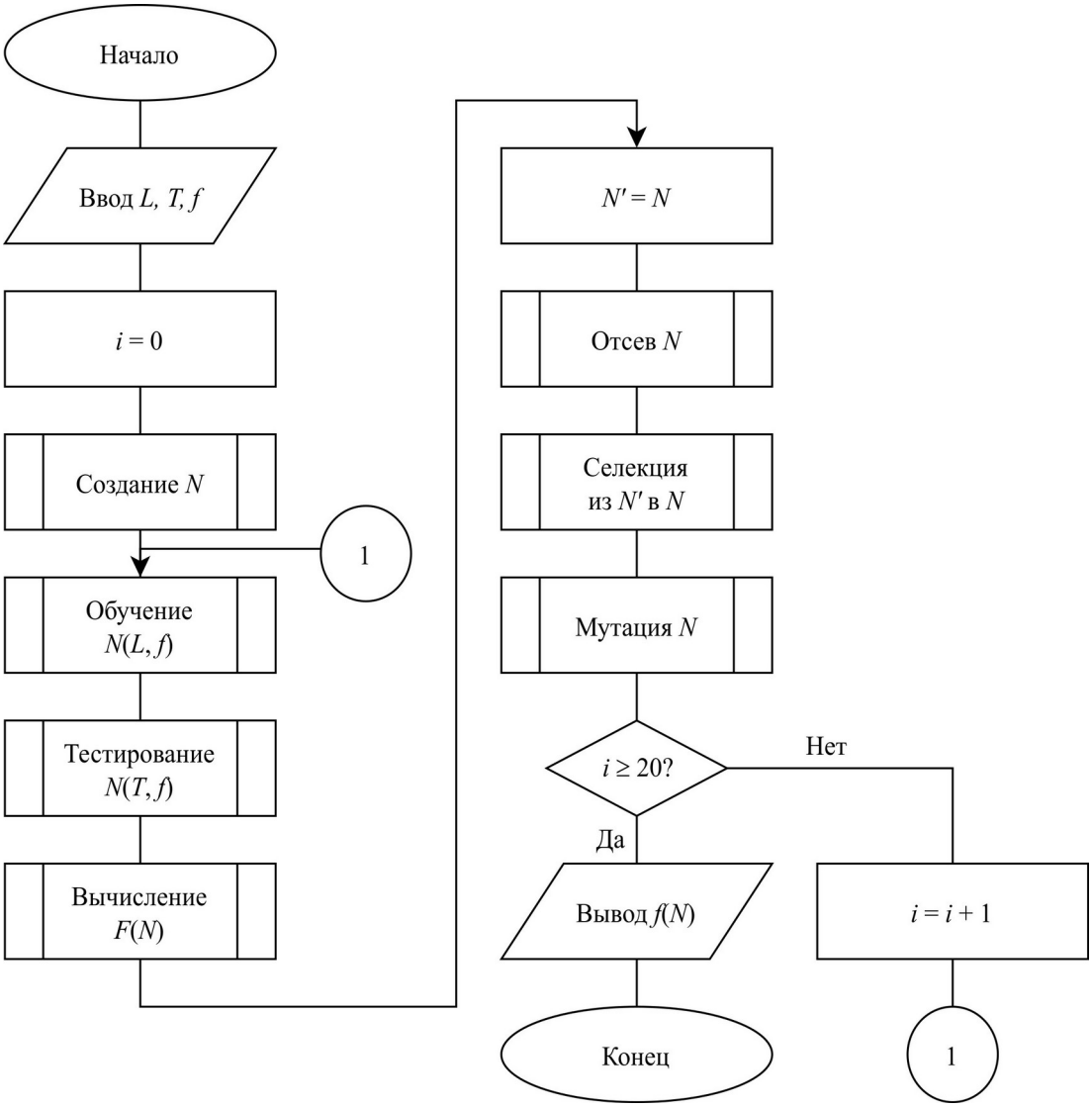


Рис.3. Схема алгоритма программного модуля отбора признаков на основе генетического алгоритма
Fig.3. GA-based feature selection module algorithm

В начале работы поступающие на вход обучающая выборка L и тестовая выборка T фиксируются на все время работы модуля. Также фиксируется исходный набор функций признаков f. Создается начальная популяция N, для каждой особи в популяции проводятся обучение и тестирование модели классификации библиографических данных на основе условно-случайных полей. Затем для каждой особи вычисляются макрозначение F-меры и функция приспособленности, после чего в новую популяцию переносятся особи, имеющие макрозначение F-меры не менее определенного значения. Если таких особей оказалось больше половины популяции, среди них проводится турнирная селекция. После этого остальные места в новой популяции занимают особи, полученные с помощью фенотипного аутбридинга старой популяции под воздействием мутации с вероятностью возникновения m %. Для новой популяции повторяется вся последовательность операций, начиная с обучения модели и заканчивая формированием следующего поколения. Алгоритм продолжает свою работу до тех пор, пока не будет достигнуто k-е поколение, после чего формирует и выводит результирующее признаковое описание, определяемое по наибольшему значению функции приспособленности.



Рис.4. Файловая структура программного модуля
Fig.4. Software module file structure

При реализации алгоритма выбраны следующие параметры генетического алгоритма: 20 особей в популяции, 20 поколений, вероятность мутации 5 %. Итоговое отсевное значение *F*-меры выбрано равным значению *F*-меры модели, обученной на полном наборе признаков. Для сохранения перспективных генотипов для каждого поколения сформировано свое отсевное значение, допускающее отклонение от итогового пропорционально числу прошедших итераций. Для сокращения времени обучения моделей за счет библиотечного модуля joblib обученные модели сохраняются в подпапке models (рис.4). В качестве имени файла используется хеш-значение генотипа, полученное с помощью функции hash.

Таким образом, становится возможным восстановление уже обученной модели из памяти в том случае, если особь с таким генотипом уже фигурировала в одном из поколений. С учетом того, что на каждом шаге эволюционного процесса до половины особей переносится в новое поколение, при дополнительном пересечении экономия вычислений может превышать 50 %. Генотип в данном случае представляет собой бинарную последовательность, поэтому для выбора имени можно использовать результат преобразования этого генотипа к целому числу:

model_dump_filename = int("".join(str(gen) for gen in genotype), 2)

Однако современные операционные системы поддерживают имена файлов размером до 255 символов, что соответствует преобразованию генотипа размера 844. Использование хеш-значения для генерации имени обусловлено независимостью его длины от размера генотипа и, как следствие, большей универсальностью. При этом общий размер популяции и число поколений делают возникновение коллизий маловероятным.

Результаты и их обсуждение. В ходе вычислительного эксперимента в качестве входных данных использовалась тестовая выборка размеченных библиографических записей, составленных на основе научных трудов сотрудников Института СПИНТех МИЭТ за последние пять лет на русском и английском языках общим объемом 2519 элементов. Входные данные делились на две части в соотношении 80 : 20 для обучения и проверки соответственно [6]. На этих данных проводились обучение и тестирование эталонной модели, использующей все признаки, а также генетической модели, использующей отобранные с помощью разработанного программного модуля признаки. *F*-мера эталонной модели составила 0,934. Развитие *F*-меры генетической модели представлено в табл.1.

Таким образом, качество классификации, выражающееся в макрозначении *F*-меры, увеличилось на 3 %. В то же время количество используемых признаков в признаковом описании сократилось на 40 % (с 26 до 15). Среди сокращенных признаков выделены следующие группы: признак начала предложения; признаки символьного состава для предыдущего и следующего слов; признаки регистра для предыдущего и следующего слов; признаки пунктуационных знаков для текущего и следующего слов. Наибольшее

число признаков сокращено в описании следующего слова, наименьшее – текущего. Сравнение поклассовых значений для *F*-меры представлено в табл.2. Качество классификации возросло для всех классов, кроме специальных разделителей.

Таблица 1

Развитие *F*-меры генетической модели

Table 1

Evolution of genetic model's *F*-score

Поколение	Наибольшие значения *F*-меры в поколении	Поколение	Наибольшие значения *F*-меры в поколении
1	0,896; 0,890; 0,889	11	0,940; 0,918; 0,912
2	0,896; 0,890; 0,889	12	0,940; 0,932; 0,918
3	0,896; 0,890; 0,889	13	0,943; 0,940; 0,932
4	0,896; 0,890; 0,889	14	0,943; 0,940; 0,932
5	0,896; 0,891; 0,890	15	0,943; 0,940; 0,932
6	0,896; 0,891; 0,890	16	0,968; 0,943; 0,940
7	0,897; 0,896; 0,895	17	0,968; 0,943; 0,940
8	0,897; 0,896; 0,895	18	0,968; 0,967; 0,946
9	0,940; 0,901; 0,897	19	0,968; 0,967; 0,946
10	0,940; 0,912; 0,901	20	0,968; 0,967; 0,946

Таблица 2

Поклассовое сравнение значений *F*-меры

Table 2

F-score comparison class by class

Класс библиографических данных	Эталонная модель	Генетическая модель
Авторы	0,975	1,000
Название статьи	0,995	1,000
Название журнала	0,907	0,958
Место издания	0,750	1,000
Страницы	0,929	0,929
Издательство	0,545	1,000
Номер издания	0,811	0,955
Год издания	0,865	0,882
Разделители	0,973	0,960

Заключение. Разработанный программный модуль отбора функций признаков на основе генетического алгоритма позволяет решать задачу отбора наиболее значимых признаков. Исключение малозначимых признаков в процессе отбора упрощает итоговую модель классификации, в результате чего снижается риск переобучения и повышается качество классификации. В ходе вычислительного эксперимента получены следующие результаты: число используемых признаков уменьшилось с 26 до 15, качество классификации увеличилось на 3 % за счет отсева признаков, способствующих переобучению.

Таким образом, проблема избыточности признакового описания в задаче классификации библиографических данных в рамках работы над программным комплексом преобразования библиографических данных решена.

Литература

1. ***Петров Е.Н.*** Исследование и разработка методики и алгоритма классификации библиографических данных с помощью условно-случайных полей // Итоги диссертационных исследований. Т. 2. Материалы X Всероссийского конкурса молодых ученых. М.: РАН, 2018. С. 91–98.

2. ***Петров Е.Н., Черников Б.В., Борисова Е.А.*** Верификация методики классификации библиографических данных на основе условно-случайных полей. Ч.1 // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11. С. 113–118.

3. ***Berry M.W., Mohamed A.Z., Yap B.W.*** Supervised and unsupervised learning for data science. Springer International Publishing, 2019. 187 p.

4. ***Вороновский Г.К., Махотило К.В., Петрашев С.Н., Сергеев С.А.*** Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Х.: Основа, 1997. 112 с.

5. An improved gene expression programming based on niche technology of outbreeding fusion / ***C.X. Wang, J.J. Zhang, S.L. Wu et al*** // Informatica. 2017. Vol. 41. P. 25–30.

6. ***Wang J., Li Z., Huang W., Xiao K.*** Character information extraction based on CRFsuite // 2016 International Conference on Advanced Electronic Science and Technology (AEST 2016). Atlantis Press, 2016. P. 147–154.

Поступила в редакцию 15.04.2020 г.; после доработки 20.05.2020 г.; принята к публикации 16.06.2020 г.

Петров Евгений Николаевич – аспирант Института системной и программной инженерии и информационных технологий Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1), fiddenmar@gmail.com

References

1. Petrov E.N. Research and development of CRF-based bibliographic data classification method. *Results of Thesis Researches*. *In Proceedings of X Russian Young Researches Competiotion.* Moscow, 2018, vol. 2, pp. 91–98. (in Russian).

2. Petrov E.N., Chernikov B.V., Petrov E.N., Borisova E.A. Software implementation and verification of CRF-based bibliographic data classification method. *Modern high technologies*, 2020, no. 11, part 1, pp. 113–118. (in Russian).

3. Berry M.W., Mohamed A.Z., Yap B.W. *Supervised and unsupervised learning for data science*. Springer International Publishing, 2019. 187 p.

4. Voronovsky G.K., Mahotilo K.V., Petrashev S.N., Sergeev S.A. et al. *Genetic algorithms, artificial neural networks and virtual reality problems*. X., Osnova Publ., 1997. 112 p. (in Russian).

5. Wang C.X., Zhang J.J., Wu S.L., Zhang F., Tromp J.G. An improved gene expression programming based on niche technology of outbreeding fusion. *Informatica,* 2017, vol. 41, pp. 25–30.

6. Wang J., Z. Li, W. Huang, K. Xiao Character information extraction based on CRFsuite. *2016 International Conference on Advanced Electronic Science and Technology (AEST 2016)*. Atlantis, 2016.

Received 15.04.2020; Revised 20.05.2020; Accepted 16.06.2020.

Information about the author:

Evgeny N. Petrov – PhD student of Institute of System and Software Engineering and Computer Science, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), fiddenmar@gmail.com

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 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 также 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