
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит шесть раз в год

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований,
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники

Редакционная коллегия

Л. М. Лыньков (зам. главного редактора),
В. Р. Степицкий (зам. главного редактора),
О. В. Бойправ (ответственный секретарь редколлегии),
М. П. Батура, В. Е. Борисенко, М. Г. Гасанов, С. В. Козлов,
В. А. Лабунов, Ю. В. Писецкий, А. С. Сигов,
А. Г. Смирнов, М. М. Татур, В. Ю. Цветков

Редакционный совет

И. И. Абрамов, В. Е. Агабеков, И. С. Азаров, А. И. Белоус, Н. В. Гапоненко,
С. В. Гапоненко, В. В. Голенков, В. Ф. Голиков, А. Л. Гурский, А. П. Достанко,
В. А. Емельянов, А. А. Иванюк, Ф. Ф. Комаров, В. К. Конопелько, А. П. Кузнецов,
А. А. Кураев, В. И. Курмашев, В. Л. Ланин, Н. И. Листопад, В. Е. Матюшков,
Ф. И. Пантелеенко, В. А. Пилипенко, С. Л. Прищепа, Н. К. Толочко,
А. А. Хмыль, В. В. Цегельник, Г. П. Яблонский, В. Н. Ярмолик

СОДЕРЖАНИЕ

Соловьёв Я. А., Гайдук П. И. Особенности структурно-фазовых превращений в слоях сплава Ni–Pt–V на кремнии при быстрой термической обработке.....	5
Греков И. А., Янушкевич К. О., Чубенко Е. Б., Бондаренко В. П. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе легированных алюминием и никелем пленок оксида цинка.....	14
Зайцев В. А., Подрябинкин Д. А., Мельникова В. В., Данилюк А. Л. Взаимовлияние электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом в условиях зарядовой неустойчивости	22

Янушкевич В. Ф., Драчёв Д. В., Громыко В. М. Практическая апробация способа регистрации границ углеводородов на основе измерения собственного излучения залежей..	30
Марчук Т. М., Денис А. А., Гринкевич А. В. Исследование логарифмической системы автоматической регулировки усиления.....	38
Свирид В. Л. Формирование и трансформация термостабильных токов посредством составных униполярных и биполярно-униполярных структур интегральной схемотехники..	46
Линец Г. И., Баженов А. В., Гривенная Н. В., Гончаров В. Д. Теория и практика дистанционного радиолокационного зондирования земной поверхности.....	55
Ayad H., Alhtab R., Alzawi M. Evaluation of 5G Systems Microstrip Antennas Performance and Approaches for SAR Reduction of Human Head at the Frequency 38 GHz (Айад Х., Альхтаб Р., Альзави М. Оценка производительности микрополосковых антенн систем 5G и подходы к снижению коэффициента удельного поглощения головой человека электромагнитного излучения на частоте 38 ГГц).....	63
Мешкова К. Е., Давыдов М. В., Пацев С. В., Савейко А. Р., Пашкилевич В. В. Моделирование и экспериментальная апробация аппаратно-программного комплекса для определения импедансометрических параметров амниотической жидкости.....	68
Ярмолик В. Н., Петровская В. В., Шевченко Н. А. Мера различия для управляемых вероятностных тестов.....	76
Полуян Т. В., Цветков В. Ю. Двухуровневая мобильная самоорганизующаяся сеть с комбинированным режимом работы	84
Шалькевич П. К., Лавникович Д. С., Городная Ю. С., Чеменцова А. В. Система управления данными и программное обеспечение для комплексной оценки состояния биосферы	92
Kurayev A. A., Matveyenka V. V. Transforming the Energy of Vacuum by Using the Oscillator Based on Casimir Effect (Кураев А. А., Матвеенко В. В. Преобразование энергии вакуума с помощью генератора на основе эффекта Казимира)	100
Vishniakou U. A., Chu Yue Yu. Model and Structure of IoT Network for Alzheimer’s Disease Diagnostics (Вишняков В. А., Чуюэ Юй. Модель и структура сети интернета вещей для диагностики болезни Альцгеймера).....	105

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Подписано в печать 07.08.2024. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 13,72. Уч.-изд. л. 11,65. Тираж 80 экз. Заказ 138.

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 329а, г. Минск, 220013, Республика Беларусь
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-41. doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 24.12.2020.
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6

Учредитель – учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Индекс для индивидуальной подписки 00787. Индекс для ведомственной подписки 007872

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2024

DOKLADY BGUIR

Published 6 times a year

The journal is being published since January, 2003

The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. No 1087

The journal is included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index

Editor-in-Chief

Vadim Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics

CONTENTS

Solovjov Ja. A., Gaiduk P. I. Features of Structural and Phase Transformations in Layers of Ni–Pt–V Alloy on Silicon During Rapid Heat Treatment	5
Grekov I. A., Yanushkevich K. O., Chubenko E. B., Bondarenko V. P. UV-Photodetectors Based on Zinc Oxide Films Doped with Aluminum and Nickel	14
Zaitsau U. A., Podryabinkin D. A., Melnikova V. V., Danilyuk A. L. Transistor Structure with a Two-Dimensional Channel Electrophysical Parameters Interrelation Under Conditions of Instability	22
Yanushkevich V. F., Drachev D. V., Gromyko V. M. Practical Testing of a Method for Recording Hydrocarbon Boundaries Based on Measuring the Deposits' Own Radiation	30
Marchuk T. M., Denis A. A., Grinkevich A. V. Study of Logarithmic System of Automatic Gain Control	38
Svirid V. L. Formation and Transformation of Thermostable Currents by Means of Composite Unipolar and Bipolar-Unipolar Structures of Integrated Circuit	46
Linets G. I., Bazhenov A. V., Grivennaya N. V., Goncharov V. D. Theory and Practice of Remote Radar Probing the Earth's Surface	55

Ayad H., Alhtab R., Alzawi M. Evaluation of 5G Systems Microstrip Antennas Performance and Approaches for SAR Reduction of Human Head at the Frequency 38 GHz	63
Meshkova K. E., Davydov M. V., Patseev S. V., Saveyko A. R., Paskilevich V. V. Modeling and Experimental Approbation of a Hardware and Software Complex for Determining the Impedance Parameters of an Amniotic Fluid	68
Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Shauchenka M. A. Difference Measure for Controlled Random Tests	76
Paluyan T. V., Tsviatkou V. Yu. Two-Level Mobile Self-Organizing Network with Combined Operation Mode	84
Shalkevich P. K., Lavnikovich D. S., Gorodnaya Yu. S., Chementsova A. V. Data Management System and Software for Comprehensive Assessment of the State of the Biosphere	92
Kurayev A. A., Matveyenka V. V. Transforming the Energy of Vacuum by Using the Oscillator Based on Casimir Effect	100
Vishniakou U. A., Chuyue Yu. Model and Structure of IoT Network for Alzheimer’s Disease Diagnostics.....	105

Responsible Secretary T. Mironenka

Signed for printing 07.08.2024. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.
Ed.-pr. I. 13,72. Ed.-ed. I. 11,65. Edition 80 copies. Order 138.

Editorial Address: P. Brovki St., 6, Off. 329a, Minsk, 220013, Republic of Belarus
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
Tel.: +375 17 293-88-41. doklady@bsuir.by; http://:doklady.bsuir.by

Printed in BSUIR. License LP No 02330/264 from 24.12.2020.
220013, Minsk, P. Brovki St., 6

Founder – Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”
Index for individual subscription 00787. Index for departmental subscription 007872



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-5-13>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СЛОЯХ СПЛАВА Ni–Pt–V НА КРЕМНИИ ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Я. А. СОЛОВЬЁВ¹, П. И. ГАЙДУК²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 26.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Методами резерфордского обратного рассеяния, рентгенофазового анализа, просвечивающей электронной микроскопии и дифракции установлены особенности структурно-фазовых превращений в слоях сплава Ni–Pt–V толщиной 30 нм на поверхности монокристаллического *n*-Si(111) при быстрой термической обработке некогерентным световым потоком постоянной мощности от кварцевых галогенных ламп, направленным на обратную сторону подложки, длительностью 7 с до достижения температуры от 350 до 500 °С. Показано, что в данных условиях термообработки происходит формирование слоев Ni_xSi_y, характеризующихся различной степенью упорядоченности (эпитаксиальности). Установлено, что быстрая термообработка при температуре 350 °С сопровождается перераспределением атомов никеля и кремния до состава ~Ni₃Si на границе раздела пленка-подложка с уменьшением доли Si к поверхности с формированием доменов гексагональной (P321) фазы силицида β-Ni₃₁Si₁₂ эпитаксиальных подложек. Быстрая термообработка при температуре от 400 до 500 °С приводит к дальнейшему диффузионному перераспределению реагирующих компонентов до композиционного состава ~Ni₅₀Si₅₀ и формированию орторомбической (Pnma) фазы силицида NiSi, имеющего трансротационную степень эпитаксиальности. При этом упорядоченный рост силицида NiSi происходит на эпитаксиальных доменах β-Ni₃₁Si₁₂, сохраняющихся на границе раздела силицид-подложка вплоть до температуры 500 °С.

Ключевые слова: силициды, сплав никель-платина-ванадий, быстрая термическая обработка, структурно-фазовое превращение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Исследования проводились в рамках проектов Государственных программ научных исследований (№ ГР 20212702, 20191100). Авторы признательны О. В. Мильчанину и С. В. Злоцкому за помощь при проведении эксперимента.

Для цитирования. Соловьёв, Я. А. Особенности структурно-фазовых превращений в слоях сплава Ni–Pt–V на кремнии при быстрой термической обработке / Я. А. Соловьёв, П. И. Гайдук // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-5-13>.

FEATURES OF STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS IN LAYERS OF Ni–Pt–V ALLOY ON SILICON DURING RAPID HEAT TREATMENT

JAROSLAV A. SOLOVJOV¹, PETER I. GAIDUK²

¹JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 26.01.2024

Abstract. Using the methods of Rutherford backscattering, X-ray phase analysis, transmission electron microscopy and diffraction, the features of structural and phase transformations in layers of Ni–Pt–V alloy with a thickness of 30 nm on the surface of monocrystalline *n*-Si(111) under rapid heat treatment with incoherent constant-power light flux from quartz halogen lamps directed to the reverse side of the substrate for a duration of 7 s until a temperature of 350 to 500 °C is reached have been established. It is shown that under these conditions of heat treatment, the formation of Ni_{*x*}Si_{*y*} layers occurs, characterized by varying degrees of ordering (epitaxy). It was found that rapid heat treatment at a temperature of 350 °C is accompanied by a redistribution of nickel and silicon atoms to the composition ~Ni₃Si at the film-substrate interface with a decrease in the proportion of Si towards the surface with the formation of domains of the hexagonal (P321) phase of the β-Ni₃₁Si₁₂ silicide epitaxial to the substrate. Rapid heat treatment at temperature from 400 to 500 °C leads to a further diffusion redistribution of the reacting components to a composite composition of ~Ni₅₀Si₅₀ and the formation of an orthorhombic (Pnma) phase of NiSi silicide having a transrotational degree of epitaxy. In this case, the ordered growth of NiSi silicide occurs on the epitaxial domains of β-Ni₃₁Si₁₂, which persist at the interface between the silicide and the substrate up to a temperature of 500 °C.

Keywords: silicides, nickel-platinum-vanadium alloy, rapid heat treatment, structural and phase transformation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The research was carried out within the framework of projects of the State Scientific Research Programs (SR No 20212702, 20191100). The authors are grateful to O. V. Milchanin and S. V. Zlotsky for their help in performing the experiment.

For citation. Solovjov Ja. A., Gaiduk P. I. (2024) Features of Structural and Phase Transformations in Layers of Ni–Pt–V Alloy on Silicon During Rapid Heat Treatment. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-5-13> (in Russian).

Введение

Силициды никеля широко используются в современной технологии КМОП СБИС, поскольку удачно сочетают в себе слоевые и контактные характеристики приборного качества с низким потреблением кремния при их формировании [1–3]. Известно несколько стабильных фаз силицидов Ni при комнатной температуре (Ni₂Si, Ni₃₁Si₁₂, NiSi, NiSi₂ и др. [4]), среди которых NiSi выгодно отличается высокой проводимостью, способностью образовывать высокий потенциальный барьер при контакте с кремнием и, как следствие, формировать диоды Шоттки с хорошей идеальностью вольтамперных характеристик и низкими токами утечки. Вместе с тем при высокотемпературных условиях формирования (эксплуатации) возможна трансформация NiSi в фазу NiSi₂, при этом увеличивается слоевое сопротивление и существенно ухудшаются контактные характеристики [5]. Кроме того, при высоких температурах из-за агломерации пленки NiSi теряют морфологическую стабильность и деградируют, что наиболее критично для тонких пленок.

Для решения указанных проблем вместо чистого Ni предложено использовать слои сплавов, включающих добавки примесных атомов (Pt, W, V, Pd и др.), которые позволяют улучшать термическую стабильность силицидов никеля [6]. Среди всех легирующих элементов Pt является наиболее эффективным, а слои силицидов Ni(Pt)Si с концентрацией Pt до 10 ат.% используются для формирования контактных слоев в технологии СБИС с проектными нормами менее 45 нм. В [7–9] отмечено, что для силицида на основе Ni введение Pt увеличивает температуру образования NiSi₂ и стабилизирует фазу NiSi. Согласно [10], силицид сплава Ni–Pt значительно улучшает электрофизическую стабильность NiSi за счет достижения низкой утечки на переходах даже при высоких температурах. Стабилизацию слоев силицидов Ni(Pt)Si связывают с сегрегацией Pt

на межзеренных границах и со структурно-фазовыми изменениями. В этой связи, как отмечено в [11], добавление Pt подавляет фиброподобное осевое текстурирование (аксиотаксию) зерен в слоях NiSi и уменьшает шероховатость границы раздела силицид-кремний. Предполагается, что легирование исходных слоев никеля платиной стимулирует эпитаксиальный рост NiSi на подложках Si. Эпитаксиальная текстура слоя силицида может резко уменьшить агломерацию, что позволяет радикально улучшать термическую стабильность структур. Поэтому исследование структурно-фазовых превращений при быстрой термической обработке (БТО) тонких слоев на основе сплава Ni–Pt на кремнии является важным как с научной, так и с практической точек зрения.

Цель исследований – установление особенностей структурно-фазовых превращений в слоях сплава Ni–Pt–V на поверхности кремния при БТО.

Методика проведения эксперимента

Для эксперимента использовали подложки, представляющие собой эпитаксиальные слои легированного фосфором кремния с удельным сопротивлением 0,5 Ом·см и толщиной 5 мкм, сформированные на подложках монокристаллического кремния *p*-типа с удельным сопротивлением 0,005 Ом·см и ориентацией (111). После стандартной очистки в перекисно-аммиачном растворе и последующей обработки в растворе плавиковой кислоты на поверхность эпитаксиального слоя наносили слои Ni–Pt–V толщиной 30 нм магнетронным распылением мишени состава Ni (87,32 ат.%)–Pt (6,14 ат.%)–V (6,54 ат.%) в среде аргона чистотой, не хуже 99,993 %, при давлении 0,8 Па на установке 01НИ-7-015. Затем на установке JetFirst 100 подложки подвергали БТО в режиме теплового баланса путем облучения их обратной стороны некогерентным световым потоком кварцевых галогенных ламп постоянной мощности в среде азота в течение 7 с до достижения температуры от 350 до 500 °С. Перед нагревом камеру двукратно вакуумировали с промежуточным и финальным напуском азота чистотой 99,995 %. Контроль температуры рабочей стороны подложки осуществлялся термопарой с точностью $\pm 0,5$ °С.

Исследования структуры и фазового состава образцов проводились методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием электронного микроскопа Hitachi H-800 при ускоряющем напряжении 200 кВ с применением гониометрического устройства. При анализе особенностей структурно-фазовых состояний многослойных структур использовались стандартные методы получения и анализа дифракционного контраста в сочетании с данными микродифракции. Для ПЭМ-исследований образцы препарировались в виде поперечных (Х-ПЭМ) и планарных (Р-ПЭМ) сечений, что позволяло получать полную и статистически достоверную информацию о структурно-фазовых состояниях слоев, в том числе и по толщине. Препарирование образцов для Р-ПЭМ осуществлялось химико-динамическим травлением по методу «вращающегося стакана» в полирующем травителе состава $\text{HNO}_3:\text{HF} = 6:1$.

Химические профили атомов и толщину слоев в структурах Ni–Pt–V/Si измеряли методом рендерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов He^+ с энергией 1,2 МэВ. Образцы фиксировали на кассете-держателе, укрепленной на двухосевом гониометре, и ориентировали относительно падающего пучка с точностью, лучше 0,02°. Частицы, рассеянные под углом 170°, регистрировали кремниевым поверхностно-барьерным детектором. Диаметр анализирующего пучка составлял 0,7–1,0 мм, ток пучка – 5–20 нА, общая доза ионов при снятии одного спектра – 5–100 мкКл. Разрешающая способность регистрирующего тракта составляла 11–14 кэВ. Исследования РОР проводили с использованием ядерно-физического комплекса на основе электростатического ускорителя ионов AN-2500 фирмы High Voltage. При преобразовании шкалы энергий в шкалу глубин применялся пакет расчетных программ HEAD6. Для определения элементного состава и профиля концентраций элементов в образцах проводилось послойное моделирование спектров РОР до практически полного совпадения с экспериментальными спектрами.

Исследования фазового состава структур Ni–Pt–V/Si выполняли методом рентгенофазового анализа (РФА). Измерения проводились на дифрактометре Ultima IV фирмы Rigaku с использованием геометрии параллельного пучка в медном (CuK α) излучении с длиной волны 0,154179 нм. Съемка образцов велась как в геометрии Брэгга – Брентано, так и при малых углах падения рентгеновского пучка. Для исследования фазового состава покрытий образец размещался на столике приставки для тонких пленок. Предварительно производилась автоматическая настройка высоты

образца. Измерения выполнялись в диапазоне углов $2\theta = 20^\circ\text{--}120^\circ$ с шагом $0,05^\circ$ и скоростью движения детектора 2 град./мин в геометрии Брэгга – Брентано. При анализе фазового состава использовалось программное обеспечение PDXL-2 (Rigaku).

Результаты исследований и их обсуждение

Сравнительный анализ спектров РОР от структур Ni–Pt–V/Si (рис. 1) позволяет заключить, что при увеличении температуры БТО от 350 до 500 °С происходит изменение элементного состава по всей толщине приповерхностного слоя.

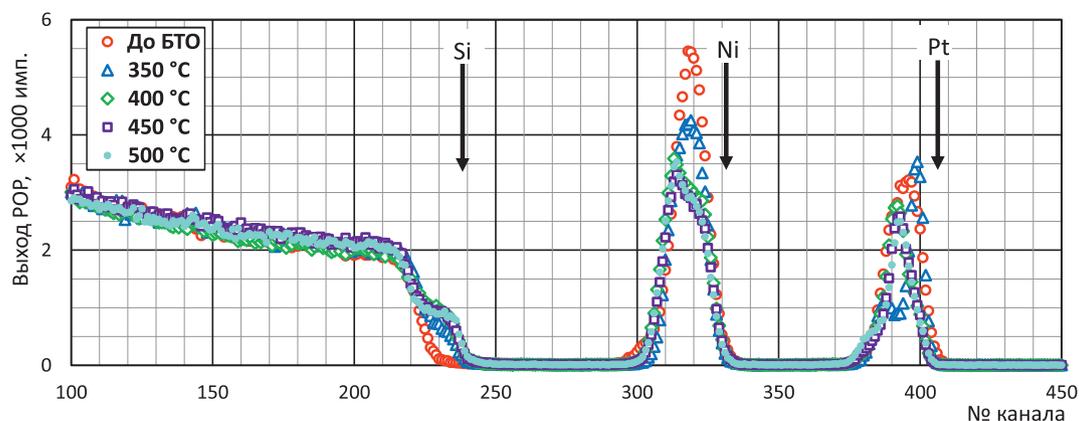


Рис. 1. Спектры резерфордского обратного рассеяния от структур Ni–Pt–V/Si после осаждения и быстрой термической обработки при различных температурах

Fig. 1. Rutherford backscattering spectra from Ni–Pt–V/Si structures after deposition and rapid heat treatment at various temperatures

БТО при 350 °С сопровождается диффузионным перераспределением атомов никеля и кремния до композиционного состава $\sim\text{Ni}_3\text{Si}$ на границе раздела пленка-подложка с плавным уменьшением доли Si до состава около $\text{Ni}_{70}\text{V}_{11}\text{Pt}_{14}\text{Si}_5$ в тонком (~ 9 нм) приповерхностном слое. Это стало ожидаемым фактом, поскольку первыми формируемыми силицидами в паре Ni–Si чаще всего являются силициды, обогащенные металлом (Ni_2Si , $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$, Ni_3Si , Ni_3Si_2) [1]. При температуре БТО выше 400 °С происходит дальнейшее диффузионное перераспределение реагирующих компонентов до композиционного состава $\sim\text{Ni}_{50}\text{Si}_{50}$, что обычно соответствует формированию моносилцида никеля (NiSi). Однако на границе раздела кремний/силицид сохраняется тонкий (около 9–10 нм) слой силицида, обогащенного металлом ($\sim\text{Ni}_{61}\text{Si}_{37}\text{Pt}_2$), даже после БТО при температуре 500 °С, о чем свидетельствует пик выхода РОР в области каналов 310–315 (рис. 1). Этот результат достаточно сильно противоречит литературным данным [1, 2, 12], в которых многократно показано, что, во-первых, силициды, обогащенные металлом, полностью трансформируются в моносилцид при температуре выше 400 °С, а во-вторых, процесс формирования NiSi начинается с границы раздела силицид/кремний и продолжается к поверхности, что обусловлено диффузионным переносом атомов никеля – преобладающего диффузанта в паре Ni–Si [12, 13]. Поэтому сохранение слоя $\text{Ni}_{61}\text{Si}_{37}\text{Pt}_2$ на границе раздела при одновременном формировании слоя NiSi в приповерхностной области является достаточно неожиданным фактом.

Результаты структурно-фазовых исследований методами РФА, ПЭМ и просвечивающей электронной дифракции (ПЭД) (рис. 2–4) хорошо коррелируют с данными РОР. ПЭМ-исследования структуры исходных пленок сплава Ni–Pt–V (не приведены) показывают, что после нанесения пленки имеют текстурированную поликристаллическую структуру со средним размером зерен около 5–10 нм, что хорошо коррелирует с данными многочисленных исследований магнетронно-осажденных слоев Ni в сходных условиях. В частности, методом РФА установлено (рис. 2), что фазовый состав исходной пленки сплава Ni–Pt–V представляет собой однофазную систему на основе гранцентрированной кубической решетки Ni (Fm–3m) с измененным параметром решетки (0,3568 нм против 0,3524 нм у чистого Ni) вследствие внедрения атомов Pt и V. Согласно правилу Вегарда, состав пленки Ni–Pt–V был оценен как $\text{Ni}_{3,68}\text{Pt}_{0,32}$. Из данных РФА также видно, что исходные пленки Ni–Pt–V обладают преимущественной ориентацией (111). Быстрый

термический отжиг при температурах 200–300 °С не приводит к изменению фазового состава пленки, но при этом параметр решетки пленки Ni–Pt–V последовательно уменьшается от 0,3564 до 0,3549 и 0,3545 нм при температурах БТО 200, 250 и 300 °С соответственно, что, очевидно, связано с притоком атомов кремния и их встраиванием в решетку сплава Ni–Pt–V.

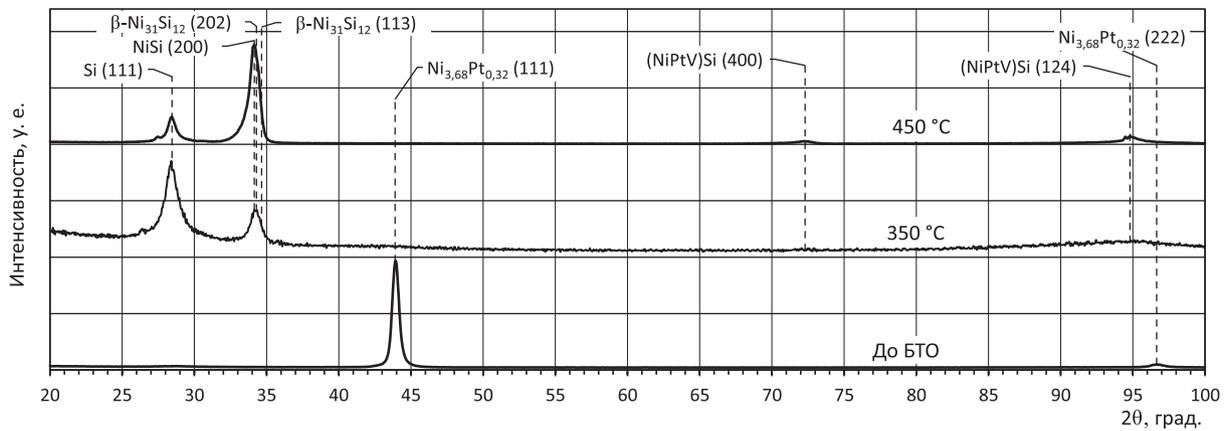


Рис. 2. Рентгенограммы, полученные от образцов структур Ni–Pt–V/Si до и после быстрой термической обработки и при температурах 350 и 450 °С
Fig. 2. X-ray diffraction patterns obtained from samples of Ni–Pt–V/Si structures before and after rapid heat treatment and at temperatures of 350 and 450 °С

Ситуация кардинально изменяется после БТО при температуре выше 350 °С, которая приводит к началу формирования силицидной фазы. На рентгенограмме исчезает пик при $2\theta \sim 42^\circ\text{--}46^\circ$ (рис. 2), обусловленный дифракцией на исходном сплаве Ni–Pt–V, но появляется несимметричный пик в области $2\theta \sim 33^\circ\text{--}36^\circ$, который, по-видимому, является суперпозицией пиков при $2\theta = 34,275^\circ$ и $2\theta = 34,654^\circ$, связанных с дифракцией соответственно от плоскостей (202) и (113) фазы $\beta\text{-Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ гексагональной (P321) модификации. Стоит однако отметить, что аналогичный пик может быть также обусловлен суперпозицией дифракционных пиков от фазы орторомбического (Pnma) NiSi: $2\theta = 34,25^\circ$ от плоскостей (200), $2\theta = 36,056^\circ$ от плоскостей (102) и $2\theta = 36,116^\circ$ от плоскостей (111). Однако, по данным РОР, композиционный состав пленок (от $\text{Ni}_{70}\text{Si}_5$ до $\text{Ni}_{68}\text{Si}_{29}$), полученных при такой низкой температуре БТО, достаточно далек от требуемого 50%-ного для фазы NiSi, если только не предположить формирование небольшого количества островков фазы моносилцида никеля на границе раздела силицид-кремний. Повышение температуры БТО до 400 °С и выше приводит к росту объема силицидной фазы, что ведет к резкому увеличению пика в интервале углов дифракции $2\theta \sim 33^\circ\text{--}36^\circ$. Из сравнения данных РОР и РФА можно достаточно уверенно заключить, что такое увеличение пика связано с формированием орторомбической фазы NiSi и увеличением ее объема. Положение дифракционного пика на оси углов при этом изменяется лишь незначительно в силу близости значений межплоскостных расстояний указанных фаз. При этом возможным процессом является превращение части гексагонального $\beta\text{-Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ в орторомбическую фазу NiSi. Однако тот факт, что композиционный состав тонкого слоя силицида непосредственно на границе с подложкой кремния остается металло-обогащенным, позволяет утверждать, что фаза $\beta\text{-Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ в смеси с фазой NiSi остается на границе раздела вплоть до температуры БТО 500 °С.

Результаты ПЭМ- и ПЭД-исследований структурно-фазового состояния слоев Ni–Pt–V/(111)-Si после БТО при температуре 350 °С в светлом и темном полях (рис. 3, b, d) демонстрируют упорядоченное распределение узких линий (темных на светлом поле и светлых на темном; часть из них указаны стрелками), которые простираются на расстояние до сотни нанометров. Положение этих линий, их зависимость от дифракционных условий формирования изображения, изменение их положения при наклоне образца в колонне микроскопа указывают, что линии (экстинкционные контуры) обусловлены изменением толщины и (или) изгибом тонких пластинок (ламелей), расположенных вдоль границы раздела с подложкой кремния. Структура сформированного силицида существенно отличается от структуры обычного поликристаллического слоя, что подтверждается как отсутствием характерного зернистого контраста на ПЭМ-мик-

рофотографиях на рис. 3 *b, d*, так и картиной электронной дифракции, которая содержит лишь очень слабые кольца от исходного слоя Ni–Pt–V на фоне сильных точечных рефлексов от силицида (рис. 3, *a*). При этом необходимо отметить, что ПЭД-картина содержит дифракционные рефлексы (часть из них заключены в прерывистые круги), расположенные симметрично относительно рефлексов кремния, и идентифицируют гексагональную β -фазу $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ [14]. Важной особенностью формы основных рефлексов от фазы $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ является наличие тяжелой интенсивности, которые указывают на пластинчатую (чешуйчатую) структуру зерен силицидной фазы (доменов) с плавной разориентацией плоскостей вдоль поверхности пластин [15, 16]. В частности, дугообразный вид тяжелой с неоднородной интенсивностью указывает на то, что пластинчатые зерна силицида расположены вдоль поверхности и имеют центральную область, плоскости которой ориентированы почти параллельно плоскостям кремния.

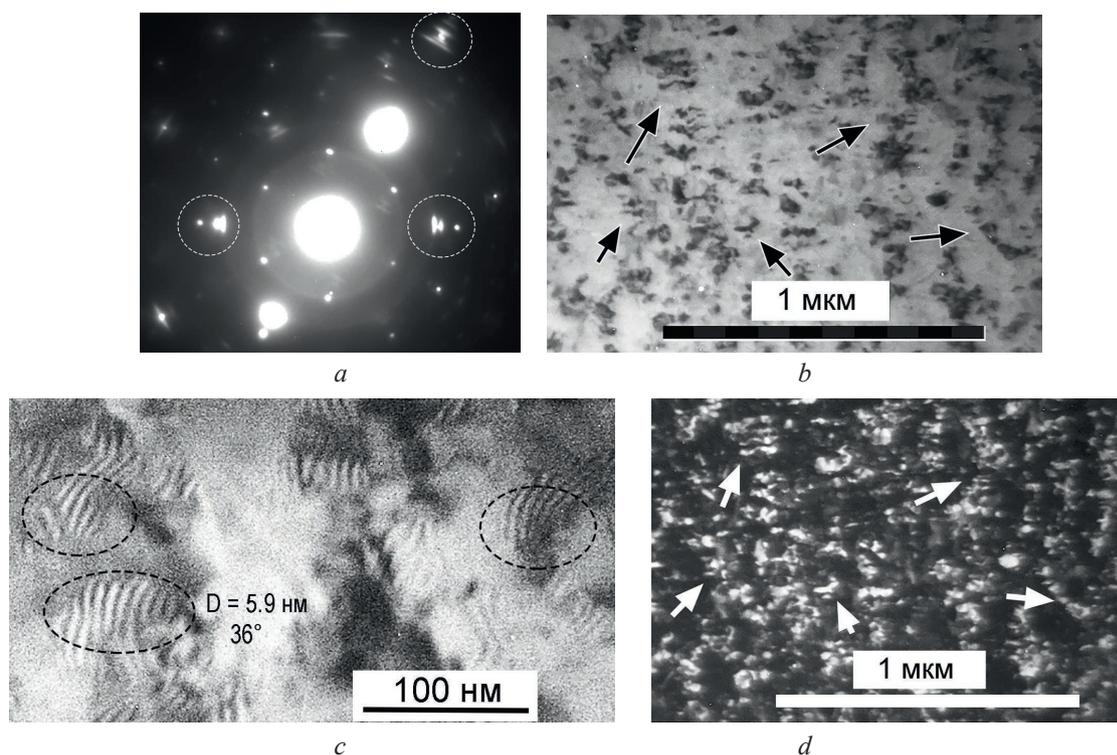


Рис. 3. Снимки структур, полученные от образцов Ni–Pt–V/Si после осаждения и быстрой термической обработки при 350 °C: *a* – микродифракция; *b, c* – светлопольные микрофотографии просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ); *d* – темнопольная ПЭМ-микрофотография

Fig. 3. Photographs of structures obtained from Ni–Pt–V/Si samples after deposition and rapid heat treatment at 350 °C: *a* – microdiffraction; *b, c* – bright-field transmission electron microscopy (TEM) micrographs; *d* – dark-field TEM micrograph

Светлопольное ПЭМ-изображение (рис. 3, *c*), полученное в двухлучевых Брэгговских условиях, демонстрирует муаровые полосы, возникающие в результате интерференции плоскостей $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ с плоскостями кремния. Анализ картин муара позволяет сделать заключение, что в центральной области доменов плоскости силицида недеформированы или слабо деформированы. С удалением от центра плоскости постепенно изгибаются, и происходит их разориентация относительно плоскостей подложки. В соответствии с исследованиями, проведенными в [17, 18], такие особенности дифракции и ПЭМ-контраста на микрофотографиях свидетельствуют о формировании квазиэпитаксиальных доменов силицидной фазы.

Как следует из результатов РОР и РФА, при температуре БТО выше 400 °C происходит формирование слоя с композиционным и фазовым составами, близкими к NiSi. Более того, ПЭМ- и ПЭД-исследования (рис. 4) дают дополнительные доказательства эпитаксиального упорядочения слоя NiSi относительно подложки. Так, светлопольные ПЭМ-микрофотографии (рис. 4, *a*) характеризуются множественными пересекающимися экстинкционными контурами изгиба, ха-

рактически доменную структуру силицидной фазы в виде тонких пластинок (ламелей), кристаллографические плоскости в которых расположены вдоль плоскостей кремния, но плавно изменяют свою ориентацию вдоль поверхности доменов, проявляя при этом эффекты изгиба. С другой стороны, соответствующая картина электронной дифракции (рис. 4, *b*, вставка) содержит точечные рефлексы (202) и (211) NiSi, соосные с (220)-рефлексами кремния. Все эти признаки однозначно свидетельствуют о квазиэпитаксиальном ориентационном соотношении пленки силицида никеля с подложкой кремния.

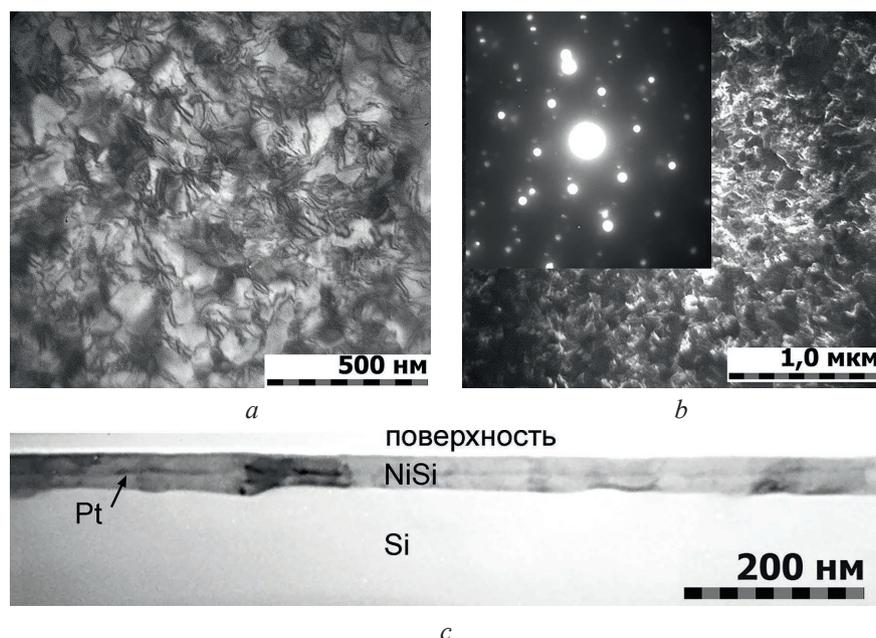


Рис. 4. Снимки структур, полученные от образцов Ni–Pt–V/Si после осаждения и быстрой термической обработки при 500 °С: *a* – светлопольная ПЭМ-микрофотография; *b* – темнопольная ПЭМ-микрофотография с микродифракцией (на вставке); *c* – ПЭМ-микрофотография поперечного сечения

Fig. 4. Photographs of structures obtained from Ni–Pt–V/Si samples after deposition and rapid heat treatment at 500 °C: *a* – bright-field TEM micrograph; *b* – dark-field TEM micrograph with microdiffraction (inset); *c* – TEM micrograph of cross section

По результатам ПЭМ-исследований и моделирования спектров РОР восстановлена схема расположения слоев, приведенная на рис. 5.

9 нм Ni ₇₀ Si ₅ V ₁₁ Pt ₁₄ // Ni Pt V + Ni _x Si _y	10 нм Ni ₄₂ Si ₄₉ V ₈ Pt ₁ // NiSi (Pt and V doped)
11 нм Ni ₇₀ Si ₁₈ V ₁₁ Pt ₁ // Ni _x Si _y + Ni Pt V	31 нм Ni ₄₅ Si ₄₉ Pt ₆ // NiSi (Pt doped)
15 нм Ni ₆₈ Si ₂₉ Pt ₃ // β-Ni ₃₁ Si ₁₂ (Pt doped)	9 нм Ni ₆₁ Si ₃₇ Pt ₂ // β-Ni ₃₁ Si ₁₂ + NiSi (Pt doped)
Si-substrate	Si-substrate

Рис. 5. Расположение слоев в структуре Ni–Pt–V/Si после быстрой термической обработки при температуре: *a* – 350 °С; *b* – 500 °С

Fig. 5. Layer arrangement in the Ni–Pt–V/Si structure after rapid heat treatment at temperature: *a* – 350 °C; *b* – 500 °C

Таким образом, упорядоченный рост силицидной фазы состава Ni_xSi_y происходит на эпитаксиальных доменах β-Ni₃₁Si₁₂, сохраняющихся на границе раздела силицид-подложка вплоть до температуры БТО 500 °С.

Заключение

1. Установлены особенности структурно-фазовых превращений в слоях сплава Ni–Pt–V на поверхности кремния при быстрой термической обработке некогерентным световым потоком

постоянной мощности от кварцевых галогенных ламп, направленным на обратную сторону подложки, длительностью 7 с.

2. Быстрый термический отжиг при температурах 200–300 °С не приводит к изменению фазового состава пленки, но при этом параметр решетки пленки сплава Ni–Pt–V последовательно уменьшается от 0,3564 до 0,3545 нм, что обусловлено притоком атомов кремния и их встраиванием в решетку сплава.

3. При температуре быстрой термической обработки 350 °С наблюдается перераспределение атомов никеля и кремния с формированием слоев состава Ni_xSi_y , характеризующихся различной степенью упорядоченности (эпитаксиальности). Установлено, что быстрая термообработка при 350 °С сопровождается перераспределением атомов никеля и кремния до состава $\sim Ni_3Si$ на границе раздела пленка-подложка с уменьшением доли Si к поверхности с формированием доменов гексагональной (P321) фазы силицида $\beta-Ni_{31}Si_{12}$ эпитаксиальных подложек.

4. Температура быстрой термообработки от 400 до 500 °С приводит к дальнейшему диффузионному перераспределению реагирующих компонентов до композиционного состава $\sim Ni_{50}Si_{50}$ и формированию орторомбической (Pnma) фазы силицида NiSi, имеющего трансротационную степень эпитаксиальности. При этом упорядоченный рост силицида NiSi происходит на эпитаксиальных доменах $\beta-Ni_{31}Si_{12}$, сохраняющихся на границе раздела силицид-подложка вплоть до температуры быстрой термической обработки 500 °С.

5. Полученные результаты могут быть использованы в микроэлектронике при формировании контактно-барьерных структур в КМОП-технологии с проектными нормами менее 90 нм и диодов Шоттки с расширенным температурным диапазоном.

Список литературы / References

1. Borisenko V. E., Hesketh P. J. (1997) *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. Berlin, Springer.
2. Chen L. J. (2004) *Silicide Technology for Integrated Circuits*. London, Institution of Engineering and Technology.
3. Wolansky D., Blaschke J. P., Drews J., Grabolla T., Heinemann B., Lenke T., et al. (2020) Nickel and Nickel-Platinum Silicide for BCDMOS Devices. *ECS Trans.* 98 (5), 351–361. <http://doi.org/10.1149/09805.0351ecst>.
4. Wang R. N., Feng J. Y., Huang Y. (2003) Mechanism About Improvement of NiSi Thermal Stability for Ni/Pt/Si (111) Bi-Layered System. *Applied Surface Science*. 207 (1–4), 139–143. [http://doi.org/10.1016/S0169-4332\(02\)01327-2](http://doi.org/10.1016/S0169-4332(02)01327-2).
5. Adusumilli P., Seidman D., Murray C. (2012) Silicide-Phase Evolution and Platinum Redistribution During Silicidation of $Ni_{0.95}Pt_{0.05}/Si(100)$ Specimens. *Applied Physics Letters*. 112 (6). <http://doi.org/10.1063/1.4751023>.
6. Li M. Y., Chen J. M., Liu C. C., Lin J. F. (2011) CESL-Stressor-Induced Morphological Instability of Pt-Dissolved Ni Germanosilicide Formed on Silicon Germanium Epilayer. *IEEE Electron Device Letters*. 32 (12), 1725–1727. <http://doi.org/10.1109/LED.2011.2166991>.
7. Mangelinck D., Dai J. Y., Pan J. S., Lahiri S. K. (1999) Enhancement of Thermal Stability of NiSi Films on (100)Si and (111)Si by Pt Addition. *Applied Physics Letters*. 75 (12), 1736–1738. <http://doi.org/10.1063/1.124803>.
8. Cioldin F. H., Diniz J. A., Vaz A. R., Calligaris G. A., Cardoso L. P., Doi I. (2017) Study of the Phase Transitions of Nickel Platinum Silicide Obtained by Sputtering and Rapid Thermal Processing. *32nd Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro)*. <http://doi.org/10.1109/SBMicro.2017.8113007>.
9. Ahmet P., Shiozawa T., Nagahiro K., Nagata T., Kakushima K., Tsutsu K., et al. (2008) Thermal Stability of Ni Silicide Films on Heavily Doped n^+ and p^+ Si Substrates. *Microelectronic Engineering*. 85 (7), 1642–1646. <http://doi.org/10.1016/j.mee.2008.04.001>.
10. Lee P. S., Pey K. L., Mangelinck D., Ding J., Chi D. Z., Chan L. (2001) New Silicidation Technology with Ni(Pt) Alloy for MOSFETs. *IEEE Electron Device Letters*. 22 (12), 568–570. <http://doi.org/10.1109/55.974579>.
11. Detavernier C., Özcan A. S., Jordan-Sweet J., Stach E. A., Tersoff J., Ross F. M., et al. (2003) An Off-Normal Fibre-Like Texture in Thin Films on Single-Crystal Substrates. *Nature*. 426, 641–645. <http://doi.org/10.1038/nature02198>.
12. Murarka S. P. (1986) *Silicides for VLSI Applications*. Moscow, Mir Publ. 176 (in Russian).
13. Tu K. N., Chu W. K., Mayer J. W. (1975) Structure and Growth Kinetics of Ni_2Si on Silicon. *Thin Solid Films*. 25 (2), 403–413. [http://doi.org/10.1016/0040-6090\(75\)90058-9](http://doi.org/10.1016/0040-6090(75)90058-9).
14. Frank K., Schubert K. (1971) Kristallstruktur von $Ni_{31}Si_{12}$. *Acta Crystallographica Section B*. 27 (5), 916–920. <https://doi.org/10.1107/S0567740871003261>.

15. Hirsch P. B., Howie A., Nicholson R. B., Pashley D. W., Whelan M. J. (1968) *Electron Microscopy of Thin Crystals*. Moscow, Mir Publ. 574 (in Russian).
16. Tomas G., Goridge M. J. (1983) *Transmission Electron Microscopy of Materials*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
17. Alberti A., Bongiorno C., Alippi P., Magna A. L., Spinella C., Rimini E. (2006) Structural Characterization of Ni₂Si Pseudoepitaxial Transrotational Structures on [001] Si. *Acta Crystallografica Section B*. 62 (5), 729–736. <https://doi.org/10.1107/S0108768106029727>.
18. Alberti A., Magna A. L. (2013) Role of the Early Stages of Ni-Si Interaction on the Structural Properties of the Reaction Products. *Journal of Applied Physics*. 114 (12). <https://doi.org/10.1063/1.4818630>.

Вклад авторов

Соловьёв Я. А. осуществил постановку задачи для проведения исследований, изготовил образцы, построил графики.

Гайдук П. И. осуществил анализ и интерпретацию результатов исследований, подготовил рукопись статьи.

Authors' contribution

Solovjov Ja. A. carried out the formulation of the problem for conducting research, made samples, constructed graphs.

Gaiduk P. I. carried out the analysis and interpretation of the research results, prepared the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Соловьёв Я. А., канд. техн. наук, доц., зав. отрасл. лаб. новых технологий и материалов, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Гайдук П. И., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. физической электроники и нанотехнологий, Белорусский государственный университет

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Корженевского, 16
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая
компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Тел.: +375 17 398-14-03
E-mail: jsolovjov@integral.by
Соловьёв Ярослав Александрович

Information about the authors

Solovjov Ja. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company

Gaiduk P. I., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Physical Electronics and Nanotechnologies Department, Belarusian State University

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo St., 16
JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL”
Holding Managing Company
Tel.: +375 17 398-14-03
E-mail: jsolovjov@integral.by
Solovjov Jaroslav Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-14-21>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.383.4; 621.315.592

ФОТОПРИЕМНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕМ И НИКЕЛЕМ ПЛЕНОК ОКСИДА ЦИНКА

И. А. ГРЕКОВ, К. О. ЯНУШКЕВИЧ, Е. Б. ЧУБЕНКО, В. П. БОНДАРЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 30.10.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Комбинированием методов золь-гель и гидротермального осаждения на стеклянных подложках получены тонкопленочные покрытия из оксида цинка с примесью никеля и алюминия. Исследования структуры и состава пленок методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской и рамановской спектроскопии показали, что они состоят из плотноупакованных кристаллитов оксида цинка, легированных примесными атомами никеля и алюминия. На основе полученных пленок изготовлены фотоприемники резистивного типа. Показано, что при облучении светом ультрафиолетового диапазона с длиной волны менее 400 нм удельное сопротивление структуры уменьшается с 190–210 до 7,5–8,0 Ом·см. Достигнутое время отклика при нарастании светового импульса – 48 с, тогда как время спада составляет ≈ 700 с.

Ключевые слова: оксид цинка, золь-гель, гидротермальное осаждение, фотодетектор, ультрафиолетовое излучение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе легированных алюминием и никелем пленок оксида цинка / И. А. Греков [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 14–21. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-14-21>.

UV-PHOTODETECTORS BASED ON ZINC OXIDE FILMS DOPED WITH ALUMINUM AND NICKEL

IGOR A. GREKOV, KONSTANTIN O. YANUSHKEVICH, EUGENE B. CHUBENKO,
VITALY P. BONDARENKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 30.10.2023

Abstract. By combining sol-gel and hydrothermal deposition methods on glass substrates, thin-film coatings of zinc oxide doped with nickel and aluminum were obtained. Studies of the structure and composition of the films using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray and Raman spectroscopy have shown that they consist of close-packed zinc oxide crystallites doped with impurity atoms of nickel and aluminum. Resistive type photodetectors were manufactured based on the films obtained. It has been shown that when irradiated with ultraviolet light with a wavelength less than 400 nm, the resistivity of the structure decreases from 190–210 to 7.5–8.0 Ohm·cm. The achieved response time for the rise of the light pulse is 48 s, while the decay time is ≈ 700 s.

Keywords: zinc-oxide, sol-gel, hydrothermal deposition, photodetector, ultraviolet radiation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Grekov I. A., Yanushkevich K. O., Chubenko E. B., Bondarenko V. P. (2024) UV-Photodetectors Based on Zinc Oxide Films Doped with Aluminum and Nickel. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 14–21. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-14-21> (in Russian).

Введение

В настоящее время стремительно растет потребность в технологиях детектирования ультрафиолетового (УФ) излучения, так как интенсивное воздействие света с соответствующей данному диапазону энергией опасно для живых организмов и может приводить к травмам глаз, онкологическим заболеваниям и тепловым ударам. Но, кроме этого, фотодетекторы УФ-диапазона могут быть использованы для контроля состояния озонового слоя, обнаружения пламени, отслеживания движения ракет и других оснащенных реактивными двигателями объектов [1]. Для решения данных задач необходимы устройства с большим соотношением сигнал/шум и с высокой скоростью отклика.

Большая ширина запрещенной зоны (~3,37 эВ) и хорошая температурная стабильность оксида цинка (ZnO) позволяют применять его в качестве материала фоточувствительных слоев детекторов УФ-диапазона [2, 3]. Компоненты этого полупроводника широко распространены в природе и легкодоступны. Оксид цинка образует кристаллы с гексагональной структурой типа вюрцита и проявляет электронную проводимость за счет внутренних точечных дефектов донорного типа, которая может быть стабилизирована на необходимом уровне путем дополнительного легирования [4]. Тонкопленочные фотодетекторы УФ-диапазона на основе ZnO получают разными способами, например: спрей-пиролизом [5], химическим осаждением из газовой фазы [6], гидротермальным [7, 8] и золь-гель методами [9–12]. Низкотемпературные методы гидротермального и золь-гель осаждения отличаются доступностью, простотой реализации, возможностью использовать разные материалы в качестве подложки и достаточной воспроизводимостью.

На время отклика фотодетекторов и на другие их характеристики влияют многие факторы, такие как толщина функционального слоя, размер зерна, термическая обработка после осаждения, легирование и морфология пленки [10], связанные со способом получения ZnO. Время фототклика УФ-фотодетекторов на основе ZnO может варьироваться от микросекунд до нескольких часов. В устройствах с фоточувствительными слоями легированного алюминием и никелем оксида цинка, полученными золь-гель методом, достигнутое время отклика составляет 50–500 с при нарастании сигнала, а время восстановления темнового сопротивления – 50–100 с [11, 12]. В легированных германием пленках, состоящих из наностержней ZnO, сформированных гидротермальным методом, время отклика составляет 100 и более 800 с для роста и спада сигнала соответственно [7]. В УФ-фотодетекторах, полученных гидротермальным методом на основе пленки из наностержней оксида цинка, легированного железом, с зародышевым слоем, нанесенным золь-гель методом, время отклика составляет 50 с при включении УФ-освещения и 250 с – при его выключении [8].

В проводимых исследованиях для получения тонких пленок легированного ZnO и изготовления на их основе фотоприемников УФ-диапазона использовалась комбинация золь-гель метода и гидротермального осаждения. Зародышевый слой, сформированный золь-гель методом, позволил получить более плотную структуру полупроводниковой пленки при последующем гидротермальном осаждении, а двойной отжиг и легирование алюминием и никелем снизили время отклика для подобных структур при нарастании светового сигнала.

Методика проведения экспериментов

Формирование пленок легированного оксида цинка проводилось в два этапа. На первом на поверхности предметного стекла толщиной 0,1 мм золь-гель методом формировался зародышевый слой легированного алюминием ZnO. Для этого использовался золь на основе смеси изопропилового спирта, 0,1 М дигидрата ацетата цинка, 0,1 М моноэтаноламина с добавлением 0,005 М нитрата алюминия. Слои золя наносились методом центрифугирования с последующей промежуточ-

ной сушкой при температуре 160 °С в течение 5 мин. Всего было нанесено пять слоев золя. После нанесения и сушки последнего слоя проводился отжиг при температуре 250 °С в течение 2,5 ч.

На втором этапе на поверхности зародышевого слоя гидротермальным методом формировалась пленка легированного никелем ZnO. Для осаждения использовался закрытый стеклянный термостатируемый стакан, наполненный водным эквимолярным 0,025 М раствором дигидрата ацетата цинка и уротропина с добавлением 0,0025 М нитрата никеля, нагретым до температуры 95 °С. Длительность процесса осаждения при постоянном перемешивании составляла 1,5 ч с начала нагрева. После извлечения сформированной структуры из раствора, промывки в дистиллированной воде и сушки проводился повторный отжиг (2,5 ч при 250 °С). Для получения фотоприемников на основе легированного ZnO и измерения их электрических характеристик на поверхность полупроводниковой пленки через контактную маску были нанесены алюминиевые контакты толщиной 0,1 мкм методом распыления электронным пучком в вакууме.

Изображения поверхности и поперечного скола структур были получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi S-4800. Анализ химического состава и кристаллической структуры проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) и рамановской спектроскопии на 3D-сканирующем лазерном спектрометре SOL Instruments Confotec NR500 с использованием в качестве источника возбуждающего излучения лазера с рабочей длиной волны 473 нм. Электрические характеристики фотодетекторов измерялись с помощью источника-измерителя Keithley 2450 по двухпроводной схеме. При определении спектральной зависимости фототока в качестве источника излучения использовалась ксеноновая лампа мощностью 1 кВт, из широкого спектра которой двойным монохроматором Solar ТП DM160 выделялись монохроматические линии. Величину фототока определяли при значениях длин волн падающего света, изменяющихся с шагом 10–20 нм, с учетом времени фотоотклика образца. Все измерения проводили при комнатной температуре.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) изображения поперечного скола и поверхности сформированной пленки. Толщина покрытия составляет 240–245 нм. Пленка достаточно однородна и состоит из плотноупакованных кристаллитов с вертикальной ориентацией, имеющих диаметр 75–200 нм. Зародышевый слой, полученный золь-гель методом, и верхний слой, сформированный гидротермальным методом, на СЭМ-изображении визуально не различимы.

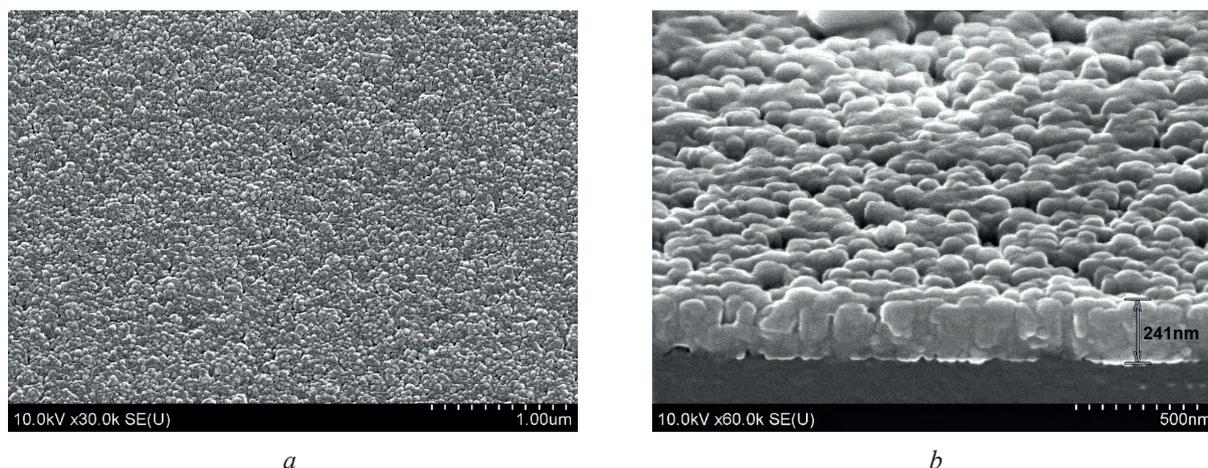


Рис. 1. Изображения поверхности (a) и поперечного скола (b) сформированной пленки
Fig. 1. Images of the surface (a) and cross-section (b) of the formed film

На спектре рамановского рассеяния сформированной пленки (рис. 2) наблюдаются интенсивные полосы с максимумом около 437 и 1157 см⁻¹, которые могут быть отнесены к колебательным модам кристаллической решетки E_2^{high} и $2A_1(LO)$ кристаллического ZnO со структурой типа вюрцита [2, 13]. Они хорошо видны на рис. 2 на спектрах порошка беспримесного оксида цин-

ка. Полоса $2A_1(LO)$, расположенная на 1157 см^{-1} , частично перекрывается линией с максимумом на 1101 см^{-1} , связанной со стеклянной подложкой. Широкая малоинтенсивная полоса с максимумом около 798 см^{-1} также относится к стеклянной подложке, использованной для изготовления образцов.

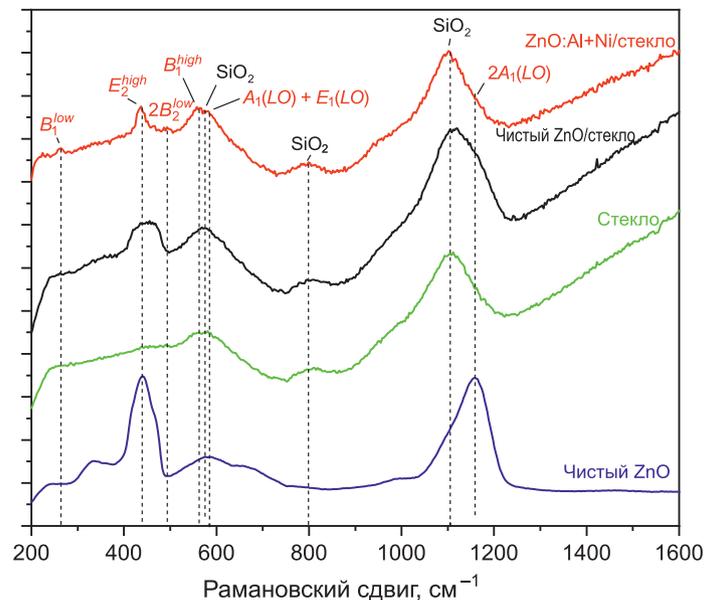


Рис. 2. Рамановские спектры пленок беспримесного и легированного оксида цинка
Fig. 2. Raman spectra of pure and doped zinc oxide films

Менее интенсивная линия с максимумом около $579,8\text{ см}^{-1}$ соответствует наложению двух продольных колебательных мод $A_1(LO)$ и $E_1(LO)$, связанных с точечными дефектами в ZnO [9, 14]. Полосы на $260, 492$ и 557 см^{-1} соответствуют активированному беспорядком комбинационному рассеянию с участием «немых» мод $B_1^{low}, 2B_2^{low}$ и B_1^{high} [10, 11, 15]. Они проявляются только на спектре образца с примесью Ni и Al. Полоса B_1^{high} расположена вблизи линии $A_1(LO) + E_1(LO)$ и частично перекрывается с ней, однако она достаточно хорошо может быть идентифицирована на спектре. Появление полос $B_1^{low}, 2B_2^{low}$ и B_1^{high} на спектре комбинационного рассеяния указывает на внедрение примесей алюминия и никеля в кристаллическую решетку ZnO, т. е. можно говорить о легировании данными металлами полупроводника. Об этом также свидетельствует изменение относительной интенсивности и ширины полос E_2^{high} и $2A_1(LO)$, относящихся к фоновым колебаниям решетки ZnO [16]. По результатам EDX-анализа установлено, что концентрация легирующих примесей составляет около $0,01\text{ ат.}\%$.

На рис. 3 представлены вольтамперные характеристики фотодетектора резистивного типа на основе сформированной пленки легированного ZnO, снятые в темноте и при облучении светом с длиной волны 400 нм . Характеристики линейны и симметричны, что указывает на омический характер полученных электрических контактов к полупроводнику. Под облучением наблюдается 25-кратный рост тока через структуру при заданном напряжении по сравнению с темновым током. Рассчитанное по экспериментальной вольтамперной характеристике темновое удельное сопротивление структуры составило $190\text{--}210\text{ Ом}\cdot\text{см}$, а при освещении светом УФ-диапазона оно снижалось до $7,5\text{--}8,0\text{ Ом}\cdot\text{см}$.

На рис. 4 представлена спектральная характеристика полученного фотодетектора, измеренная при внешнем смещении 1 В . Спад чувствительности в коротковолновом диапазоне спектра обусловлен не характеристикой фотодетектора, а ограничением используемого источника излучения, имеющего резкое снижение интенсивности на длинах волн $<300\text{ нм}$. Максимальный фототок наблюдается в спектральном диапазоне $345\text{--}355\text{ нм}$. При облучении поверхности пленки полупроводника светом с длиной волны более 400 нм происходит падение тока до 80% от максимального измеренного значения.

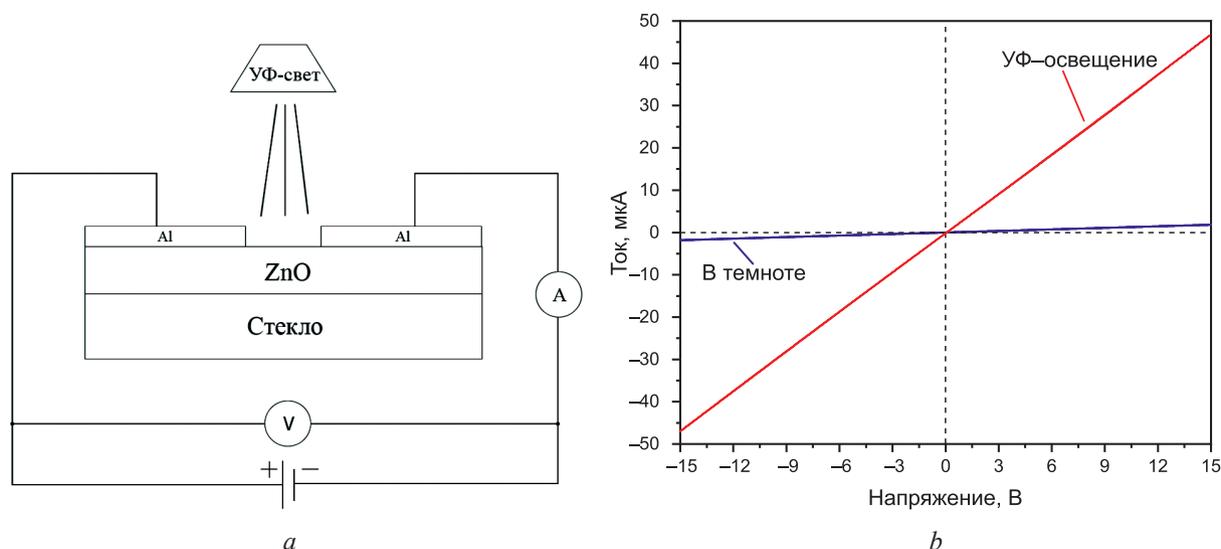


Рис. 3. Схема измерения (а) и вольтамперные характеристики (b) фотодетектора на основе пленки легированного оксида цинка
Fig. 3. Measuring circuit (a) and current-voltage characteristics (b) of a photodetector based on a doped zinc oxide film

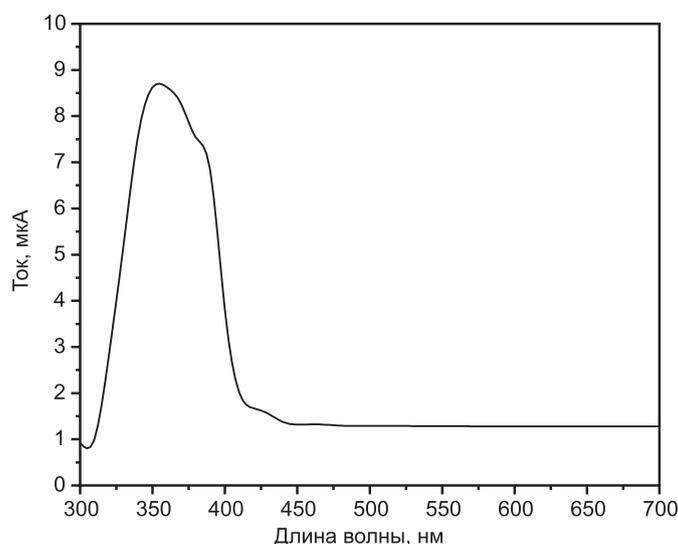


Рис. 4. Спектральная чувствительность фотодетектора на основе пленки легированного оксида цинка
Fig. 4. Spectral sensitivity of a photodetector based on a doped zinc oxide film

Время отклика фотодетектора, также измеренное при напряжении смещения 1 В и определенное при достижении 90 % от максимальной достигнутой амплитуды тока (рис. 5), при облучении УФ-светом с длиной волны 400 нм составило $t_{\text{возб}} = 48$ с. При выключении источника УФ-света время релаксации $t_{\text{рел}} \approx 700$ с [17].

Механизм наблюдаемой в структурах фотопроводимости связан с процессами адсорбции и десорбции кислорода на поверхности полупроводниковой пленки ZnO [18]. В темноте адсорбированный кислород захватывает свободные электроны из пленки ZnO и приобретает отрицательный заряд. Это приводит к формированию обедненной области на поверхности полупроводника и снижению концентрации носителей заряда. В результате проводимость ZnO снижается. Развитая поверхность сформированных структур способна усиливать данный эффект. В начальный момент при облучении поверхности пленки ZnO светом УФ-диапазона с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны ZnO, в объеме полупроводника в результате фотогенерации рождается большое число электронно-дырочных пар, что приводит к быстрому росту фототока.

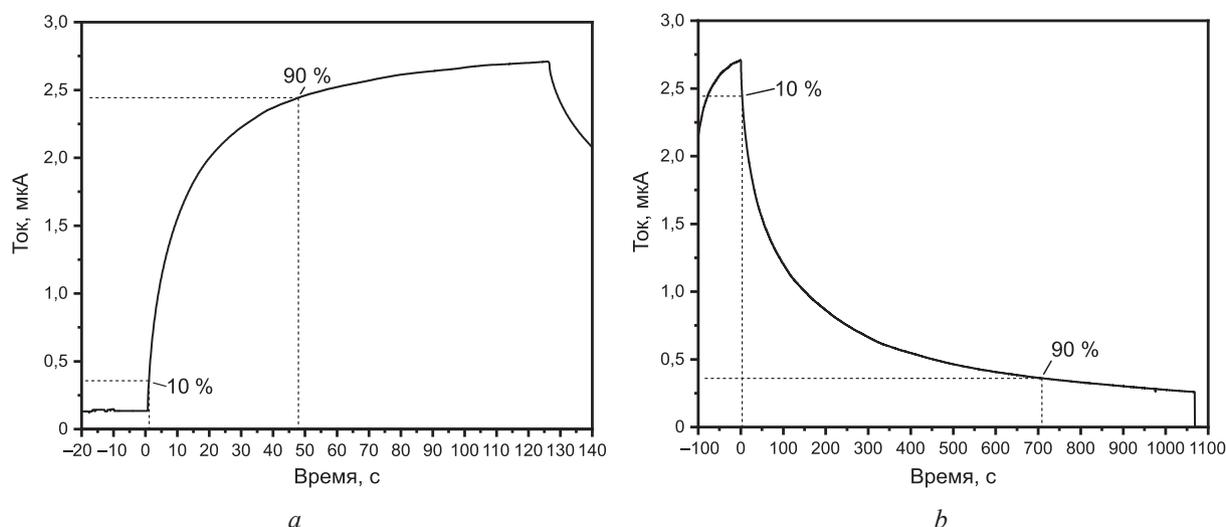


Рис. 5. Время отклика фотодетектора при включении (а) и отключении (b) УФ-света
Fig. 5. Photodetector response time when turning UV light on (a) and off (b)

Фотогенерированные дырки движутся к поверхности за счет градиента потенциала и рекомбинируют с электронами, захваченными адсорбированными атомами кислорода. Это приводит к восстановлению и десорбции атомов кислорода. Оставшиеся электроны постепенно накапливаются в полупроводнике до достижения равновесного состояния процесса адсорбции и десорбции кислорода, что способствует медленному нарастанию фототока. Как только облучение УФ-светом прекращается, в результате рекомбинации электронно-дырочных пар фототок снижается. Несмотря на то что рекомбинация приводит к уменьшению концентрации электронов, в легированной пленке ZnO их остается достаточное количество. Они постепенно покидают связанные с дефектами ловушечные уровни в объеме полупроводника, заполненные во время облучения светом, но затем захватываются реадсорбированными на поверхности атомами кислорода, что вызывает медленное затухание фототока.

Заключение

1. Комбинированием золь-гель метода и метода гидротермального осаждения получены тонкие пленки оксида цинка, легированные никелем и алюминием. Использование нанесенного золь-гель методом зародышевого слоя на поверхности подложки позволило получить однородную пленку равномерной толщины, состоящую из ориентированных в вертикальном направлении кристаллитов оксида цинка размером 75–200 нм. Легирование оксида цинка никелем и алюминием подтверждается изменением состава линий на спектрах рамановского рассеяния, появление которых связано с замещением атомов цинка примесью в узлах кристаллической решетки.

2. При облучении светом ультрафиолетового диапазона поверхности фотоприемника резистивного типа, изготовленного на основе полученной пленки оксида цинка, легированной никелем и алюминием, его удельное сопротивление уменьшается с 190–210 до 7,5–8,0 Ом·см. Максимальный фототок наблюдается при облучении светом с длиной волны 345–355 нм. Достигнутое время отклика при нарастании светового импульса составило 48 с. Время затухания сигнала после прекращения действия света – около 700 с. Фотопроводимость полученных структур определяется адсорбцией и десорбцией атомов кислорода из воздуха на поверхности.

3. Полученные результаты указывают на возможность применения пленок оксида цинка, сформированных комбинированными методами золь-гель и гидротермального осаждения, для создания детекторов ультрафиолетового излучения.

4. Работа выполнена в рамках задания 2.2 ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», 2021–2025 годы. Авторы также выражают благодарность Д. В. Жигулину за проведение исследований образцов методами СЭМ и EDX.

Список литературы / References

1. Chen K. J., Hung F. Y., Chang S. J., Young S. J. (2009) Optoelectronic Characteristics of UV Photodetector Based on ZnO Nanowire Thin Films. *J. of Alloys and Compounds*. 479 (1–2), 74–677. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.01.026.
2. Sahal M., Sersar R., Mari B. (2016) Preparation of Intrinsic and Al-Doped ZnO Thin Layers by Spray Pyrolysis. *International Renewable and Sustainable Energy Conference*. 1–5. DOI: 10.1109/irsec.2016.7984051.
3. Buddha Deka Boruah (2019) Zinc Oxide Ultraviolet Photodetectors: A Rapid Progress Towards Conventional to Self-Powered. *Nanoscale Advances*. 1–74. DOI: 10.1039/c9na00130a.
4. Jarzebski Z. M. (1974) *Oxide Semiconductors*. Oxford, Pergamon Press.
5. Inamdar S. I., Ganbavle V. V., Rajpure K. Y. (2014) ZnO Based Visible-Blind UV Photodetector by Spray Pyrolysis. *Superlattices and Microstructures*. 76, 253–263. DOI: 10.1016/j.spmi.2014.09.041.
6. Zheng Z., Liu K., Chen X., Qiao B., Ma H., Liu D., et al. (2021) High-Performance Flexible UV Photodetector Based on Self-Supporting ZnO Nano-Networks Fabricated by Substrate-Free Chemical Vapor Deposition. *Nanotechnology*. 32 (47). DOI: 10.1088/1361-6528/ac1bda.
7. Young S.-J., Chiou C.-L., Liu Y.-H., Ji L.-W. (2016) Synthesis of Ga-Doped ZnO Nanorods by Hydrothermal Method and Their Application to Ultraviolet Photodetector. *Inventions*. 1 (1). DOI: 10.3390/inventions1010003.
8. Chey C. O., Masood A., Riazanova A., Liu X., Rao K. V., Nur O., et al. (2014) Synthesis of Fe-Doped ZnO Nanorods by Rapid Mixing Hydrothermal Method and Its Application for High Performance UV Photodetector. *J. of Nanomaterials*. 1–9. DOI: 10.1155/2014/524530.
9. Foo K. L., Kashif M., Hashim U., Ali M. E. (2013) Sol-Gel Derived ZnO Nanoparticulate Films For Ultraviolet Photodetector (UV) Applications. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. 124 (22), 5373–5376. DOI: 10.1016/j.ijleo.2013.03.120.
10. Liu C. Y., Zhang B. P., Lu Z. W., Binh N. T., Wakatsuki K., Segawa Y., et al. (2008) Fabrication and Characterization of ZnO Film Based UV Photodetector. *J. of Materials Science: Materials in Electronics*. 20 (3), 197–201. DOI: 10.1007/s10854-008-9698-x.
11. Han J., Zhang W., Chen W., Ray S., Zhang J., He M., et al. (2007) Terahertz Dielectric Properties and Low-Frequency Phonon Resonances of ZnO Nanostructures. *J. Phys. Chem.* 111 (35), 13000–13006. DOI: 10.1021/jp073343t.
12. Shah A., Ahmad M., Rahmanuddin, Khan S., Aziz U., Ali Z., et al. (2019) The Role of Al Doping on ZnO Nanowire Evolution and Optical Band Gap Tuning. *Applied Physics A*. 125 (10), 1–8. DOI: 10.1007/s00339-019-3005-y.
13. Khan A. (2010) Raman Spectroscopic Study of the ZnO Nanostructures. *J Pak Mater Soc*. 4 (1), 5–9. DOI: 2070-772X.
14. Manjón F. J., Marí B., Serrano J., Romero A. H. (2005) Silent Raman Modes in Zinc Oxide and Related Nitrides. *J. of Applied Physics*. 97 (5). DOI: 10.1063/1.1856222.
15. Chen K. J., Fang T. H., Hung F. Y., Ji L. W., Chang S. J., Young S. J., et al. (2008) The Crystallization and Physical Properties of Al-doped ZnO Nanoparticles. *Applied Surface Science*. 254 (18), 5791–5795. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.03.080.
16. Rana A. K., Kumar Y., Rajput P., Jha S. N., Bhattacharyya D., Shirage P. M. (2017) Search for Origin of Room Temperature Ferromagnetism Properties in Ni-Doped ZnO Nanostructure. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 9 (8), 7691–7700. DOI: 10.1021/acsami.6b12616.
17. Ning Y., Zhang Z., Teng F., Fang X. (2018) Novel Transparent and Self-Powered UV Photodetector Based on Crossed ZnO Nanofiber Array Homo Junction. *Small*. 14 (13). DOI: 10.1002/sml.201703754.
18. Hassan Z., Ahmed N. M., Yam F. K. (2012) Comparative Study of Ultraviolet Detectors Based on ZnO Nanostructures Grown on Different Substrates. *Journal of Applied Physics*. 112 (7). DOI: 10.1063/1.4757619.

Вклад авторов

Греков И. А. осуществил подготовку образцов и синтез пленок оксидов цинка золь-гель и гидротермальными методами, исследовал структуру пленок на Рамановском спектрометре, снял спектр fotocувствительности пленок и измерил вольтамперные характеристики. Принимал участие в интерпритации полученных результатов.

Янушкевич К. О. принимал участие в выборе методик формирования и исследовании образцов, а также в интерпритации полученных результатов.

Чубенко Е. Б. определил задачи исследования и принимал участие в интерпритации полученных результатов.

Бондаренко В. П. участвовал в обсуждении полученных результатов.

Authors' contribution

Grekov I. A. carried out the preparation of samples and synthesis of zinc oxide films by sol-gel and hydrothermal methods, studied the structure of the films on a Raman spectrometer, recorded the photosensitivity spectrum of the films and measured the current-voltage characteristics. Took part in the interpretation of the results obtained.

Yanushkevich K. O. took part in the choice of methods for the formation and study of the obtained samples, as well as in the interpretation of the results.

Chubenko E. B. defined the tasks of the research and took part in the interpretation of the obtained results.

Bondarenko V. P. participated in the discussion of the results.

Сведения об авторах

Греков И. А., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, мл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Материалы и структуры нанoeлектроники» (НИЛ 4.3), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Янушкевич К. О., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, мл. науч. сотр. НИЛ 4.3, БГУИР

Чубенко Е. Б., канд. техн. наук, доц., доц. каф. микро- и нанoeлектроники, вед. науч. сотр. НИЛ 4.3, БГУИР

Бондаренко В. П., канд. техн. наук, доц., зав. НИЛ 4.3, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 33 667-93-28
E-mail: igrekovscience@gmail.com
Греков Игорь Александрович

Information about the authors

Grekov I. A., Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Junior Researcher at the Scientific Research Laboratory "Materials and Structures of Nanoelectronics" (Lab. 4.3), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Yanushkevich K. O., Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Junior Researcher at the Lab. 4.3, BSUIR

Chubenko E. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Senior Researcher at the Lab. 4.3, BSUIR

Bondarenko V. P., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Lab. 4.3, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 33 667-93-28
E-mail: igrekovscience@gmail.com
Grekov Igor Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-22-29>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.323; 538.9

ВЗАИМОВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ С ДВУМЕРНЫМ КАНАЛОМ В УСЛОВИЯХ ЗАРЯДОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

В. А. ЗАЙЦЕВ, Д. А. ПОДРЯБИНКИН, В. В. МЕЛЬНИКОВА, А. Л. ДАНИЛЮК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 27.10.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Разработана модель и получены закономерности взаимовлияния электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом, обусловленные самоорганизацией зарядовых и емкостных свойств в условиях зарядовой неустойчивости. В качестве материала двумерного канала рассматриваются дихалькогениды переходных металлов. Исследовано влияние на электрофизические параметры транзисторной структуры с двумерным полупроводниковым каналом ширины запрещенной зоны материала канала, толщины подзатворного диэлектрика, емкости интерфейсных состояний. Показано, что в условиях неустойчивости, вызываемой ростом емкости интерфейсных состояний, зависимости электрохимического потенциала, концентрации электронов и квантовой емкости от потенциала полевого электрода имеют скачкообразный вид. Полученные результаты объясняются тем, что в условиях неустойчивости рост емкости интерфейсных состояний ведет к рассогласованию условия электронейтральности и статистики Ферми – Дирака при определенных величинах потенциала затвора из-за ограниченного характера плотности состояний двумерного канала, что ведет к проявлению зарядового дисбаланса. Данный эффект аналогичен переходу металл-полупроводник и может быть отнесен к бистабильным критическим явлениям. Разработанная модель и полученные результаты могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования элементной базы микро- и нанoeлектроники.

Ключевые слова: транзисторная структура, двумерный канал, электрохимический потенциал, квантовая емкость, зарядовая неустойчивость, интерфейс, переход металл/полупроводник, бистабильность.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Исследования выполнены при финансовой поддержке и в рамках решения задач заданий 3.2 и 3.15 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций», 2021–2025 гг.

Для цитирования. Взаимовлияние электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом в условиях зарядовой неустойчивости / В. А. Зайцев [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 22–29. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-22-29>.

TRANSISTOR STRUCTURE WITH A TWO-DIMENSIONAL CHANNEL ELECTROPHYSICAL PARAMETERS INTERRELATION UNDER CONDITIONS OF INSTABILITY

ULADZIMIR A. ZAITSAU, DENIS A. PODRYABINKIN, VIOLETTA V. MELNIKOVA,
ALEXANDER L. DANILYUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 27.10.2023

Abstract. A model has been developed and patterns of mutual influence of the electrophysical parameters of a transistor structure with a two-dimensional channel, due to the self-organization of charge and capacitive properties under conditions of charge instability, have been obtained. Transition metal dichalcogenides are considered as a material for a two-dimensional channel. The influence on the electrical parameters of a transistor structure with a two-dimensional semiconductor channel of the band gap of the channel material, the thickness of the gate dielectric, and the capacitance of interface states is considered. It is shown that under conditions of instability caused by an increase in the capacitance of interface states, the dependence of the electrochemical potential, electron concentration and quantum capacitance on the potential of the field electrode has an abrupt form. The results obtained are explained by the fact that, under conditions of instability, an increase in the capacitance of interface states leads to a mismatch between the electrical neutrality condition and the Fermi-Dirac statistics at certain values of the gate potential due to the limited nature of the density of states of the two-dimensional channel, which leads to the manifestation of a charge imbalance. The resulting effect is similar to the metal-semiconductor transition and can be attributed to bistable critical phenomena. The developed model and the results obtained can be used in computer-aided design systems for the element base of micro- and nanoelectronics.

Keywords: transistor structure, two-dimensional channel, electrochemical potential, quantum capacitance, charge instability, interface, metal-semiconductor transition, bistability.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The research was carried out with financial support and as part of solving the tasks of assignment 3.2 and 3.15 of the State Scientific Research Program “Photonics and Electronics for Innovation”, 2021–2025.

For citation. Zaitsau U. A., Podryabinkin D. A., Melnikova V. V., Danilyuk A. L. (2024) Transistor Structure with a Two-Dimensional Channel Electrophysical Parameters Interrelation Under Conditions of Instability. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 22–29. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-22-29> (in Russian).

Введение

Создание нового поколения элементной базы приборов и устройств обработки и передачи информации является одним из ключевых направлений развития микро- и нанoeлектроники. Помимо решения технологических проблем, создание и внедрение новой энергоэффективной элементной базы микро- и нанoeлектроники также требует непрерывного совершенствования моделей и алгоритмов для проектирования и функционирования современных устройств обработки информации.

Кроме увеличения быстродействия и степени интеграции, одной из ключевых проблем является повышение энергоэффективности элементов обработки информации. Для таких приборов, как транзисторы, это связывается с применением двумерных материалов в качестве проводящих каналов [1–3]. Транзисторы с двумерными каналами лишены некоторых недостатков, присущих традиционным МДП-транзисторам. Отсутствие обедненной области, например, способствует снижению влияния паразитных параметров. В то же время транзисторам с двумерными каналами присущи свои особенности. К последним, например, относится важная роль квантовой емкости, существенно зависящей от вида плотности состояний в двумерном канале [4]. Перспективными материалами для двумерных каналов транзисторных структур нового поколения считаются дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), таких как молибден и вольфрам. Эти ДПМ обладают прямозонной энергетической структурой, и их применение позволяет получить требуемые электрические параметры транзисторов с двумерными каналами [5, 6]. Можно считать, что в настоящее время многие технологические проблемы получения двумерных ДПМ решены [7]. Однако

остаётся ещё нерешённым ряд проблем, связанных с режимами их функционирования в транзисторных структурах, в которых они выполняют роль проводящих каналов. В таких структурах влияние различного рода факторов на электрофизические параметры и электрические характеристики будет существенно иным по сравнению с традиционными МДП-транзисторами. В частности, это влияние будет отличаться более высокой чувствительностью к свойствам материалов и интерфейсов [8, 9].

Режимы функционирования полевого транзистора с двумерным каналом в значительной мере определяются такими электрофизическими параметрами, как электрохимический потенциал χ , заряд канала Q , квантовая ёмкость канала C_Q , ёмкости канала C_{CH} и затвора C_G , ёмкость интерфейсных состояний C_{it} . Эти параметры влияют друг на друга и, в конечном счёте, определяют электрические выходные характеристики транзистора [10–12]. Одно из последствий указанных выше особенностей транзисторной структуры с двумерным каналом – это возникновение зарядовых неустойчивостей и гистерезисных явлений [13].

Таким образом, актуальным является исследование взаимовлияния электрофизических параметров транзисторных структур с двумерными каналами с учётом возможности возникновения зарядовых неустойчивостей. Цель исследований – моделирование взаимовлияния между электрохимическим потенциалом, концентрацией носителей заряда, зарядом канала, квантовой ёмкостью, ёмкостями канала и затвора, потенциалом полевого электрода, ёмкостью подзатворного диэлектрика, ёмкостью состояний на интерфейсах транзисторной структуры с двумерным каналом в условиях зарядовой неустойчивости.

Модель взаимовлияния электрофизических параметров

Рассмотрим транзисторную структуру, содержащую канал из двумерного кристалла, в качестве которого используется ДПМ, а также полевой электрод, отделённый от канала подзатворным диэлектриком. В качестве материала двумерного полупроводникового канала могут применяться такие ДПМ, как MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , ZrSe_2 , HfSe_2 , PtTe_2 [5, 6, 8]. Концентрация электронов в двумерном канале на единицу площади, с одной стороны, определяется величиной его электрохимического потенциала, связанного с ней посредством статистики Ферми – Дирака [10, 11]:

$$n_e(\chi) = \int_{E_c}^{\infty} D(E) f(E - \chi) dE, \quad (1)$$

где f – функция Ферми – Дирака; χ – электрохимический потенциал; E_c – энергия минимума зоны проводимости; $D(E)$ – плотность состояний [12]

$$D(E) = \frac{4\pi m_e}{h^2} \sum_n H(E - E_n); \quad (2)$$

H – функция Хэвисайда; m_e – эффективная масса электронов; E_n – энергия n^{th} -подзоны (основной вклад в концентрацию носителей заряда вносит основное состояние с $n = 0$); h – постоянная Планка.

Для концентрации дырок n_h записывается аналогичное выражение, как для n_e .

С другой стороны, исходя из условия электронейтральности, основное уравнение электростатики для двумерного канала определяется взаимосвязью между концентрацией носителей заряда и электрохимическим потенциалом посредством потенциала полевого электрода с учётом ёмкостей подзатворного диэлектрика и интерфейсных состояний [10, 11]

$$\chi \left(1 + \frac{C_{it}}{C_{ox}} \right) + \frac{q^2 n_S(\chi)}{C_{ox}} = qU_G, \quad (3)$$

где $n_S = n_e - n_h$; q – элементарный заряд; U_G – потенциал полевого электрода.

Уравнения (1)–(3) самосогласованным образом определяют зависимости концентрации носителей заряда и электрохимического потенциала от потенциала полевого электрода U_G , ёмкости подзатворного диэлектрика и ёмкости интерфейсных состояний. В конечном итоге, они определяют самосогласованную взаимосвязь всех электрофизических параметров транзисторной

структуры с двумерным каналом. Квантовая емкость канала, в свою очередь, определяется плотностью состояний и электрохимическим потенциалом в следующем виде [4]:

$$C_Q = \int_{-\infty}^{+\infty} D(E) \left(-\frac{df(E-\chi)}{dE} \right) dE. \quad (4)$$

Кроме квантовой емкости C_Q , важными параметрами являются емкости затвора C_G и канала C_{CH} , которые также взаимосвязаны с концентрацией носителей заряда и квантовой емкостью. Они необходимы для построения эквивалентных (электрических) схем транзисторов с двумерным полупроводниковым каналом. В области низких частот емкости затвора и канала записываются следующим образом [10, 11]:

$$C_G = \frac{C_Q + C_{it}}{1 + (C_Q + C_{it}) / C_{ox}}; \quad (5)$$

$$C_{CH} = \frac{C_Q}{1 + (C_Q + C_{it}) / C_{ox}}, \quad (6)$$

где C_{ox} , C_{it} – емкости подзатворного диэлектрика и интерфейсных состояний соответственно.

Совместное решение уравнений (1)–(6) позволяет проследить взаимовлияние электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом, выявить специфические особенности такого взаимовлияния в условиях зарядовой неустойчивости.

Результаты расчетов и их обсуждение

Для проведения расчетов использовались следующие величины параметров транзисторной структуры с двумерным каналом: температура $T = 300$ К, ширина запрещенной зоны материала двумерного канала $E_g = 0,22-1,04$ эВ, удельная емкость подзатворного диэлектрика $C_{ox} = (9,43-9,57) \cdot 10^{-4}$ Ф/м², удельная емкость интерфейса $C_{it} = (3-4) \cdot 10^{-3}$ Ф/м², потенциал полевого электрода $U_G = 0-5$ В, эффективная масса электронов $(0,45-0,56)m_0$ (m_0 – масса свободного электрона). Относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика принималась равной $\epsilon = 4$, а его толщина варьировалась в пределах $d = 37-42$ нм. Для случая $U_G > 0$, $n_e \gg n_h$, $n_e = n_S$ проводились расчеты электрохимического потенциала канала χ , концентрации электронов n_e , квантовой емкости C_Q , емкостей затвора C_G и канала C_{CH} при варьировании ширины запрещенной зоны E_g , емкостей подзатворного диэлектрика C_{ox} и интерфейсных состояний C_{it} .

С целью моделирования взаимовлияния электрофизических параметров в условиях зарядовой неустойчивости проводились расчеты путем решения самосогласованной системы уравнений (1), (3). Полученные результаты показали, что с увеличением потенциала полевого электрода и при варьировании ширины запрещенной зоны электрохимический потенциал монотонно растет и выходит на насыщение в отсутствие неустойчивости (рис. 1, кривая 8), а при наличии неустойчивости изменяется скачкообразно (рис. 1, кривые 1–7). Переход к неустойчивости и возникновение скачков на $\chi(U_G)$ происходят при росте емкости C_{it} с $3 \cdot 10^{-3}$ до $3,7 \cdot 10^{-3}$ Ф/м². При этом с ростом ширины запрещенной зоны и постоянных величинах емкости подзатворного диэлектрика C_{ox} и интерфейса C_{it} пороговое значение потенциала U_{Gt} , при котором происходит резкое изменение $\chi(U_G)$, уменьшается с 5,0 до 1,9 В. Однако изменение U_{Gt} наблюдается только при росте E_g/kT с 8,45 до 12,00, а при $E_g/kT \geq 12,00$ значение U_{Gt} практически не меняется и составляет 1,9–2,0 В (k – постоянная Больцмана). На зависимостях электрохимического потенциала от U_G при варьировании толщины подзатворного диэлектрика в диапазоне 37–42 нм при постоянной величине ширины запрещенной зоны, равной $10kT$, также наблюдается скачкообразный характер, причем увеличение толщины d ведет к росту порогового значения потенциала затвора U_{Gt} с 0,5 до 4,5 В.

Зависимости концентрации электронов n_S от U_G (рис. 2) аналогичны зависимостям $\chi(U_G)$, т. е. также имеют скачкообразный характер, отражающий наличие зарядовой неустойчивости. Величины пороговых потенциалов U_{Gt} аналогично зависят от ширины запрещенной зоны, но при этом более резко выражены полки при $U_G < U_{Gt}$: наблюдается существенное снижение концентрации при росте E_g/kT до 40. При $U_G > U_{Gt}$ зависимости $n_S(U_G)$ растянуты по оси ординат: концентрация выхода в область монотонности снижается с 10^{12} до 10^2 см⁻².

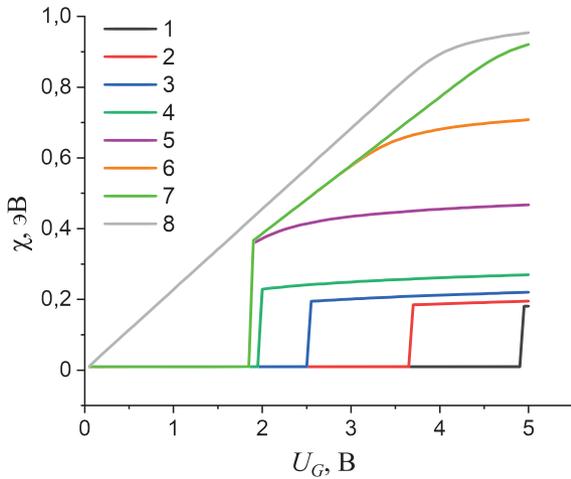


Рис. 1. Зависимость электрохимического потенциала от потенциала полевого электрода при различной ширине запрещенной зоны E_g/kT : 8,45 (кривая 1); 9,0 (2); 10,0 (3); 12,0 (4); 20,0 (5); 30,0 (6); 40,0 (7); 40,0, $C_{it} = 0,003 \text{ Ф/м}^2$ (8)

Fig. 1. Electrochemical potential on the field electrode potential dependence at different band gaps E_g/kT : 8.45 (curve 1); 9.0 (2); 10.0 (3); 12.0 (4); 20.0 (5); 30.0 (6); 40.0 (7); 40.0, $C_{it} = 0.003 \text{ F/m}^2$ (8)

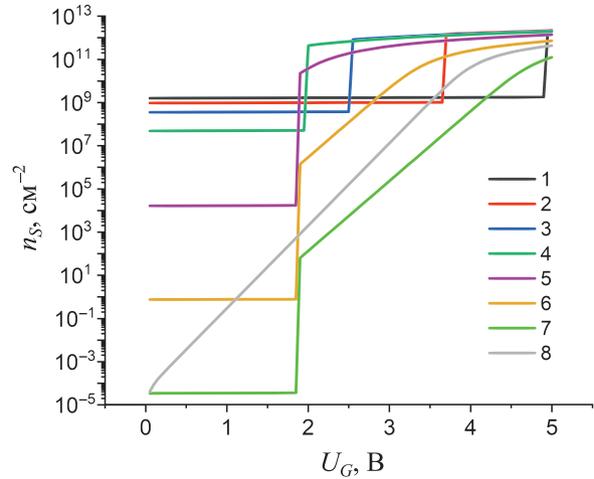


Рис. 2. Зависимость концентрации электронов от потенциала полевого электрода при различной ширине запрещенной зоны E_g/kT : 8,45 (кривая 1); 9,0 (2); 10,0 (3); 12,0 (4); 20,0 (5); 30,0 (6); 40,0 (7); 40,0, $C_{it} = 0,003 \text{ Ф/м}^2$ (8)

Fig. 2. Electron concentration on field electrode potential dependence at different band gaps E_g/kT : 8.45 (curve 1); 9.0 (2); 10.0 (3); 12.0 (4); 20.0 (5); 30.0 (6); 40.0 (7); 40.0, $C_{it} = 0.003 \text{ F/m}^2$ (8)

Полученные графики $\chi(U_G)$ были использованы для расчета квантовой емкости в зависимости от потенциала затвора U_G и заряда канала Q : $C_Q(U_G)$ и $C_Q(Q)$. Графики $C_Q(U_G)$ аналогичны $\chi(U_G)$, а $C_Q(Q)$ (рис. 3) характеризуются наличием изломов при определенных значениях заряда канала Q . Точки изломов отражают начало более резкого подъема значений квантовой емкости. Изломы коррелируют со скачками зависимостей $\chi(U_G)$. При этом в области $E_g/kT = 8,45\text{--}12,00$ наблюдаются изломы на $C_Q(Q)$, а при $E_g/kT \geq 20$ зависимости $C_Q(Q)$ вырождаются в плавные кривые, которые стягиваются в одну линию при варьировании E_g/kT (рис. 3). Величина заряда канала Q в точках изломов уменьшается с ростом E_g/kT .

Исходя из полученных зависимостей $C_Q(Q)$, также было установлено взаимовлияние квантовой емкости, емкостей канала и затвора. На рис. 4 приведены зависимости емкости затвора от квантовой емкости в условиях неустойчивости.

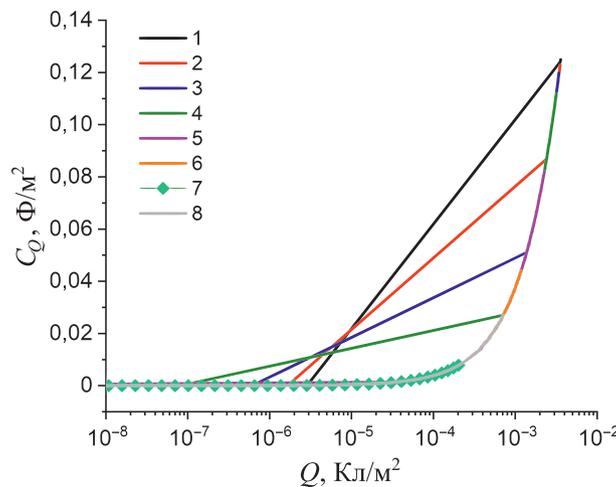


Рис. 3. Зависимость квантовой емкости от заряда канала при различной ширине запрещенной зоны E_g/kT : 8,45 (кривая 1); 9,0 (2); 10,0 (3); 12,0 (4); 20,0 (5); 30,0 (6); 40,0 (7); 40,0, $C_{it} = 0,003 \text{ Ф/м}^2$ (8)

Fig. 3. Quantum capacitance on channel charge dependence at different band gaps E_g/kT : 8.45 (curve 1); 9.0 (2); 10.0 (3); 12.0 (4); 20.0 (5); 30.0 (6); 40.0 (7); 40.0, $C_{it} = 0.003 \text{ F/m}^2$ (8)

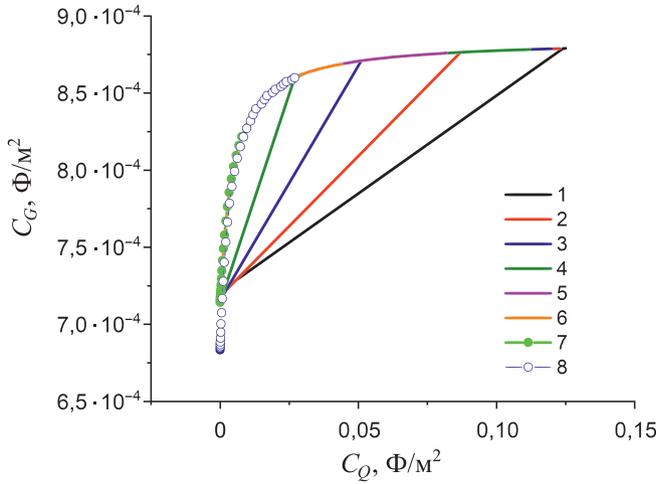


Рис. 4. Зависимость емкости затвора от квантовой емкости при различной ширине запрещенной зоны E_g/kT : 8,45 (кривая 1); 9,0 (2); 10,0 (3); 12,0 (4); 20,0 (5); 30,0 (6); 40,0 (7); 40,0, $C_{it} = 0,003 \text{ Ф/м}^2$ (8)
Fig. 4. Gate capacitance on quantum capacitance dependence at different band gaps E_g/kT : 8.45 (curve 1); 9.0 (2); 10.0 (3); 12.0 (4); 20.0 (5); 30.0 (6); 40.0 (7); 40.0, $C_{it} = 0.003 \text{ F/m}^2$ (8)

Как можно видеть, наблюдается излом при выходе на насыщение емкости C_G . Точка излома, соответствующая определенной величине C_Q , перемещается с ростом ширины запрещенной зоны, снижаясь с $0,125 \text{ Ф/м}^2$ до $0,025 \text{ Ф/м}^2$ с ростом E_g/kT с 8,45 до 12,0. При $E_g/kT \geq 20$ изломы исчезают, и зависимости $C_G(C_Q)$ вырождаются в одну кривую для всех значений E_g/kT . При $C_Q \rightarrow 0$ значение емкости C_G снижается только до значений не менее $(6,7-7,1) \cdot 10^{-4} \text{ Ф/м}^2$. Аналогичные зависимости получены для емкости канала $C_{CH}(C_Q)$ (рис. 5). Отличие состоит в том, что при $C_Q \rightarrow 0$ емкость канала снижается до нуля. Это говорит о наличии взаимовлияния между указанными емкостями и при наличии зарядовой неустойчивости транзисторной структуры.

Также были получены результаты расчетов зависимостей емкостей затвора $C_G(Q)$ и канала $C_{CH}(Q)$ (рис. 6) от заряда канала Q при варьировании E_g/kT в области значений 10–30. Как можно видеть из рис. 6, неустойчивости проявляются за счет наличия изломов на кривых, причем только в области $E_g/kT = 10-20$, а при $E_g/kT = 30$ наблюдается более плавный ход зависимостей $C_G(Q)$ и $C_{CH}(Q)$.

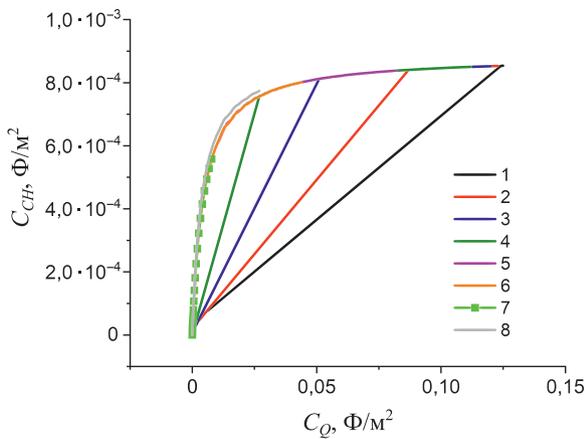


Рис. 5. Зависимость емкости канала от квантовой емкости при различной ширине запрещенной зоны E_g/kT : 8,45 (кривая 1); 9,0 (2); 10,0 (3); 12,0 (4); 20,0 (5); 30,0 (6); 40,0 (7); 40,0, $C_{it} = 0,003 \text{ Ф/м}^2$ (8)
Fig. 5. Channel capacitance on quantum capacitance dependence at different band gaps E_g/kT : 8.45 (curve 1); 9.0 (2); 10.0 (3); 12.0 (4); 20.0 (5); 30.0 (6); 40.0 (7); 40.0, $C_{it} = 0.003 \text{ F/m}^2$ (8)

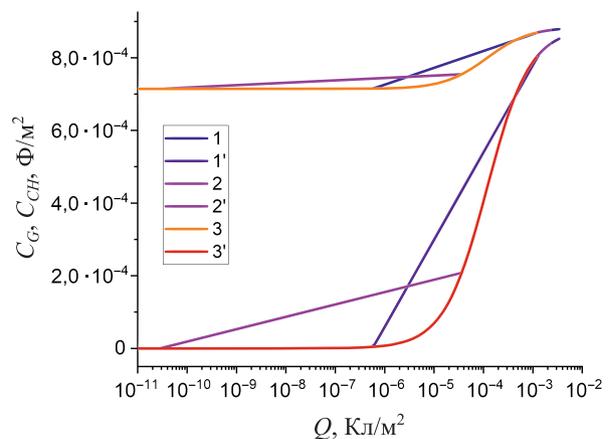


Рис. 6. Зависимость емкостей затвора C_G (кривые 1, 2, 3) и канала C_{CH} (кривые 1', 2', 3') от заряда канала при ширине запрещенной зоны E_g/kT : 10 – кривые 1, 1'; 20 – кривые 2, 2'; 30 – кривые 3, 3'
Fig. 6. Dependence of gate capacitances C_G (curves 1, 2, 3) and channel C_{CH} (curves 1', 2', 3') on the channel charge at band gap E_g/kT : 10 – curves 1, 1'; 20 – curves 2, 2'; 30 – curves 3, 3'

Из полученных результатов следует, что скачкообразное изменение электрохимического потенциала и концентрации электронов происходит при определенной критической величине потенциала полевого электрода U_{Gt} . При $U_G < U_{Gt}$ и $U_G > U_{Gt}$ зависимости $\chi(U_G)$ и $n_s(U_G)$ носят монотонный характер без наличия особенностей. Таким образом, рост потенциала полевого элект-

рода при $U_G > U_{Gt}$ способствует преодолению неустойчивости, и наблюдается монотонный рост параметров $\chi(U_G)$ и $n_S(U_G)$, но уже при существенно иных значениях. Преодоление неустойчивости означает переход в другую область соотношений параметров, обеспечивающих самосогласование при $U_G > U_{Gt}$. Возникновение неустойчивости может быть связано с тем, что существенное увеличение соотношения емкостей C_{it}/C_{ox} приводит к появлению сингулярности в решении уравнений (1) и (3) в некоторой критической точке, определяемой величиной потенциала полевого электрода U_{Gt} . Физически это связано с тем, что рост емкости интерфейса ведет к рассогласованию условия электронейтральности и статистики Ферми – Дирака при определенном значении потенциала U_G по причине ограниченной плотности состояний $D(E)$, из-за чего и возникает зарядовый дисбаланс. Этот эффект можно отнести к классу явлений, соответствующих переходам металл-полупроводник.

В данном случае существенно меняется концентрация носителей заряда (электронов), а также их электрохимический потенциал. Такие переходы относятся к критическим явлениям – фазовым переходам первого рода. Проявление неустойчивости может означать то, что взаимосвязи и взаимовлияние электрофизических параметров транзисторной структуры характеризуются наличием бистабильных состояний. Переходы между этими состояниями происходят при критических величинах некоторых параметров транзисторной структуры с двумерным каналом. Другими словами, можно предполагать о существовании критических точек, в которых нарушается зарядовый баланс, и взаимосвязи электрофизических параметров претерпевают качественные изменения. Полученные результаты можно соотнести с имеющимися экспериментальными данными, показывающими наличие неустойчивости и гистерезисных явлений в двумерных MoS_2 -транзисторах. Эти явления связываются в основном с ловушечными состояниями в самом слое MoS_2 и интерфейсными состояниями на границах раздела [13–15]. Однако причины неустойчивости в MoS_2 -транзисторах в настоящее время считаются еще плохо изученными [16]. В рассматриваемом случае неустойчивость обуславливается только интерфейсными состояниями, емкость которых растет с увеличением их плотности. Последнее обусловлено увеличением концентрации ловушечных состояний на интерфейсах.

Заключение

1. Проведено моделирование взаимовлияния электрофизических параметров транзисторной структуры с двумерным каналом в условиях неустойчивости. Установлено, что зависимости электрохимического потенциала, концентрации электронов и квантовой емкости от потенциала полевого электрода в условиях неустойчивости носят скачкообразный характер, порог которого зависит от ширины запрещенной зоны, емкости интерфейсных состояний и толщины подзатворного диэлектрика. Зависимости квантовой емкости, емкостей затвора и канала от заряда канала характеризуются наличием изломов, положение которых определяется шириной запрещенной зоны материала канала.

2. Установленное взаимовлияние в условиях неустойчивости объясняется тем, что рост емкости интерфейса ведет к рассогласованию условия электронейтральности и статистики Ферми – Дирака при определенном значении потенциала затвора. Причиной является ограниченный характер плотности состояний двумерного канала, обуславливающий возникновение зарядового дисбаланса. Полученный эффект относится к критическим явлениям, аналогичным переходам металл-полупроводник, а исследованная транзисторная структура в условиях неустойчивости характеризуется наличием бистабильности.

3. Полученные результаты создают основу для моделирования режимов функционирования транзисторов с двумерными каналами, в которых, помимо учета наличия взаимовлияния электрофизических параметров, также необходимо обращать внимание на возникновение неустойчивостей, вызванных нарушением зарядового баланса, что ведет к перестройке связей между этими параметрами. Использование результатов при моделировании электрических характеристик транзисторных структур с каналами из двумерных полупроводников позволяет выявить особенности токопереноса в них и повысить эффективность функционирования таких приборов, способствует созданию моделей, пригодных для использования в системах автоматизированного проектирования.

Список литературы / References

1. Liu Y., Duan X., Shin H.-J., Park S., Huang Yu, Duan X. (2021) Promises and Prospects of Two-Dimensional Transistor. *Nature*. 591, 43–53.
2. Knobloch T., Selberherr S., Grasser T. (2022) Challenges for Nanoscale CMOS Logic Based on Two-Dimensional Materials. *Nanomaterials*. 12 (20).
3. Chhowalla M., Jena D., Zhang H. (2016) Two-Dimensional Semiconductors for Transistors. *Nat. Rev. Mater.* 1.
4. Luryi S. (1988) Quantum Capacitance Devices. *Applied Physics Letters*. 52, 501–503.
5. Ferry D. K. (2017) Electron Transport in Some Transition Metal Di-Chalcogenides: MoS₂ and WS₂. *Semicond. Sci. Technol.* 32.
6. Das S., Sebastian A., Pop E. (2021) Transistors Based on Two-Dimensional Materials for Future Integrated Circuits. *Nat Electron.* 4, 786–799.
7. Patel K. A., Grady R. W., Smithe K. K. H., Pop E., Sordan R. (2020) Ultra-Scaled MoS₂ Transistors and Circuits Fabricated Without Nanolithography. *2D Mater.* 7.
8. Manzeli S., Ovchinnikov D., Pasquier D., Yazyev O., Kis A. (2017) 2D Transition Metal Dichalcogenides. *Nat. Rev. Mater.* 2.
9. Iannaccone G., Bonaccorso F., Colombo L., Fiori G. (2018) Quantum Engineering of Transistors Based on 2D Materials Heterostructures. *Nat. Nanotechnol.* 13, 183–191.
10. Makovskaya T. I., Danilyuka A. L., Krivosheeva A. V., Shaposhnikova V. L., Borisenko V. E. (2020) Charge Properties of the MOS Transistor Structure with the Channel Made from a Two-Dimensional Crystal. *Russian Microelectronics*. 49 (7), 507–515.
11. Zebrev G. I. (2011) Graphene Field Effect Transistors: Diffusion–Drift Theory. *Physics and Applications of Graphene-Theory. InTech*. 476–498. DOI: 10.5772/14211.
12. Jiménez D. (2012) Drift-Diffusion Model for Single Layer Transition Metal Dichalcogenide Field-Effect Transistors. *Applied Physics Letters*. 101 (24).
13. Kaushik N., Mackenzie D. M. A., Thakar K., Goyal N., Mukherjee B., Boggild P., et al. (2017) Reversible Hysteresis Inversion in MoS₂ Field Effect Transistors. *Npj 2D Mater. Appl.* 1.
14. Lin Y.-C., Dumcenco D. O., Huang Y. S., Suenaga K. (2014) Atomic Mechanism Of The Semiconducting-to-Metallic Phase Transition in Single-Layered MoS₂. *Nat. Nanotechnol.* 9, 391–396.
15. Late D. J., Bin Liu, Matte H. S. S. R., Dravid V. P., Rao C. N. R. (2012) Hysteresis in Single-Layer MoS₂ Field Effect Transistors. *ACS Nano*. 6, 5635–5641.
16. Jiawei Shu, Gongtao Wu, Yao Guo, Bo Liu, Xianlong Wei, Qing Chen (2016) The Intrinsic Origin of Hysteresis in MoS₂ Field Effect Transistors. *Nanoscale*. 8, 3049–3056.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Зайцев В. А., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Подрябинкин Д. А., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Центра нанoeлектроники и новых материалов, БГУИР

Мельникова В. В., асп. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Данилюк А. Л., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-22-24
E-mail: t-rex-1995@mail.ru
Зайцев Владимир Александрович

Information about the authors

Zaitsau U. A., Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Podryabinkin D. A., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Center for Nanoelectronics and New Materials, BSUIR

Melnikova V. V., Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Danilyuk A. L., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-22-24
E-mail: t-rex-1995@mail.ru
Zaitsau Uladzimir Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-30-37>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.371:550.837.6

ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ СПОСОБА РЕГИСТРАЦИИ ГРАНИЦ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ

В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ¹, Д. В. ДРАЧЁВ², В. М. ГРОМЫКО²

¹Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
(г. Новополоцк, Республика Беларусь)

²ООО «ПУВА» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 24.06.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Проведены теоретический анализ взаимодействия двухчастотных и модулированных электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами и компьютерное моделирование. Установлен частотный диапазон изменения электродинамических параметров среды над залежью с проявлением аномалий напряженности электрического поля. Даны рекомендации по применению модулированных сигналов для повышения точности определения границ углеводородов на основе измерения фазовых характеристик поверхностного импеданса среды над углеводородами. Разработан аппаратно-программный комплекс для регистрации напряженности электрического поля в режимах приема зондирующих сигналов и собственного излучения залежей углеводородов. Выполнены экспериментальные исследования на газовых месторождениях Сирии. Показаны способы повышения информативности разработанного способа и аппаратуры при проведении поисковых работ на объектах углеводородов. Результаты исследований могут быть использованы в устройствах выделения залежей нефти и газа в геофизике.

Ключевые слова: углеводородная залежь, электромагнитная волна, полевые исследования, двухчастотный сигнал, геологический профиль, модулированный сигнал, частота, скважина, граница залежи, аномалия электрического поля.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Янушкевич, В. Ф. Практическая апробация способа регистрации границ углеводородов на основе измерения собственного излучения залежей / В. Ф. Янушкевич, Д. В. Драчёв, В. М. Громько // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 30–37. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-30-37>.

PRACTICAL TESTING OF A METHOD FOR RECORDING HYDROCARBON BOUNDARIES BASED ON MEASURING THE DEPOSITS' OWN RADIATION

VIKTOR F. YANUSHKEVICH¹, DMITRY V. DRACHEV², VALENTIN M. GROMYKO²

¹Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (Novopolotsk, Republic of Belarus)

²LLC "PUVA" (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24.06.2024

Abstract. The article provides a theoretical analysis of the interaction of dual-frequency and modulated electromagnetic waves with anisotropic media above hydrocarbon deposits and computer modeling. The frequency

range of changes in the electrodynamic parameters of the environment above the deposit with the manifestation of anomalies in the electric field strength has been established. Recommendations are given for the use of modulated signals to improve the accuracy of determining the boundaries of hydrocarbons based on measuring the phase characteristics of the surface impedance of the medium above the hydrocarbons. A hardware and software complex has been developed for recording the electric field strength in the modes of receiving probing signals and the natural radiation of hydrocarbon deposits. Experimental studies were carried out in gas fields of Syria. Methods are shown to increase the information content of the developed method and equipment when carrying out prospecting work at hydrocarbon sites. The research results can be used in devices for identifying oil and gas deposits in geophysics.

Keywords: hydrocarbon reservoir, electromagnetic wave, field research, dual-frequency signal, geological profile, modulated signal, frequency, well, reservoir boundary, electric field anomaly.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Yanushkevich V. F., Drachev D. V., Gromyko V. M. (2024) Practical Testing of a Method for Recording Hydrocarbon Boundaries Based on Measuring the Deposits' Own Radiation. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 30–37. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-30-37> (in Russian).

Введение

Актуальность рассматриваемых в статье задач заключается в отработке методики полевых исследований углеводородных залежей (УВЗ). Современная геоэлектроразведка основывается на большом опыте проведения поисковых работ, например, на оценке подъема (пучения) поверхности из-за парового гравитационного дренажа на месторождении нефтеносных песков Hangingstone в Альберте (Канада) путем суммирования интерферограмм радара с дифференциальной синтезированной апертурой (SAR) [1]. Звучастотный магнитотеллурический метод с управляемым источником отличается экономической эффективностью и широким применением в геофизическом мониторинге [2]. За последнее десятилетие электромагнитная разведка значительно изменилась, улучшились разрешающая способность и надежность, став, таким образом, незаменимыми при разведке нетрадиционных углеводородов [3]. На основе карт скорости деформаций грунтов района исследований составляются тематические карты зон активного проседания грунтов, способствующие развитию технологий обнаружения полезных ископаемых [4].

Реализация методологии [5] продемонстрирована на примере подземного хранения газа. Сеть тектонических трещин, картированная с помощью данных дистанционного зондирования, может быть использована для объяснения и прогнозирования продуктивности скважин на нефтяных месторождениях [6]. Для дифференциации исследуемых сред при проведении поисковых работ применяются современные методы и алгоритмы обработки космической, геолого-геофизической и геохимической информации [7]. Геоэлектроразведка ориентируется на расширение возможностей электромагнитных методов для поиска нефти и газа [8, 9].

Интерпретация результатов поисковых работ [10] при решении задач геофизики и геоморфологии проводится с помощью модифицированного метода S -аппроксимаций. Методы решения трехмерных задач применяются для реализации различных способов при поиске нефти и газа с построением электродинамических моделей сред над залежами углеводородов [11, 12].

В статье представлены быстрые и строгие 2.5D-алгоритмы прямого и инверсного измерений для глубинных электромагнитных приложений, которые включают измерения в межскважинных пространствах и с контролируемым источником [13]. Внедрение электромагнитных методов для поиска углеводородов позволяет осуществлять обнаружение УВЗ по аномальным характеристикам электромагнитных волн (ЭМВ) на основе применения частотно-модулированных и двухчастотных сигналов [14, 15].

Методология исследований

Для проведения экспериментальных исследований на месторождениях углеводородов проводились теоретический анализ взаимодействия двухчастотных и модулированных ЭМВ с анизотропными средами над УВЗ и компьютерное моделирование. Воздействие гармонических ЭМВ на анизотропную среду над месторождениями нефти и газа рассмотрено в [8].

Исследование характеристик среды при воздействии двухчастотных ЭМВ на исследуемый геологический профиль является актуальным с теоретической и практической точек зрения, по-

сколькo связано с разработкой новых технологий для модернизации действующих электромагнитных методов поиска залежей. Этот подход оправдан, так как залежь углеводородов может быть представлена излучающей резонансной системой, генерирующей тональное колебание. На основе исследований [8] данный сигнал представляется гармоническим, воздействующим на пространственные ЭМВ, распространяющиеся вдоль поверхности раздела сред «воздух–анизотропная среда». Суперпозиция таких волн дает двухчастотные ЭМВ, взаимодействующие с анизотропной средой. Примером подобного взаимодействия является эффект непреднамеренного или умышленного воздействия гармонического сигнала на характеристики исследуемого электромагнитного поля, создаваемого пространственными ЭМВ.

Представляют интерес как отражательные характеристики анизотропной среды над УВЗ при двухчастотном воздействии, так и аномальные изменения напряженности электрического поля двухчастотных ЭМВ на альтернативных частотах, результаты моделирования распространения ЭМВ над анизотропной средой, анализ характеристик режимов двухчастотных сигналов. Исходя из этого, проведем анализ процесса взаимодействия ЭМВ с анизотропной средой над УВЗ с двухчастотным сигналом вида

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t, \quad (1)$$

где $E_1, E_2, \omega_1, \omega_2$ – амплитуда и частота двух ЭМВ соответственно.

Введем коэффициенты отношения амплитуд двух волн и их частот:

$$\begin{cases} k_E = \frac{E_2}{E_1}; \\ k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим взаимодействие сложного сигнала (1) с различными соотношениями параметров формируемых ЭМВ с анизотропным наполнителем. Информативность методов поиска УВЗ при воздействии двухчастотных ЭМВ на исследуемый геологический профиль существенно возрастает за счет вариации коэффициентов отношения амплитуд и частот двух волн (2). Координатное распределение напряженности электрического поля ЭМВ позволяет записать компоненты тензора диэлектрической проницаемости $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$ для двухчастичного потока в виде [9]:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{\omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \right. \\ \left. - j \left[\frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{pi}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2 + \omega_{ri}^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} \right] \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \omega_{ri}}{\omega_2} \frac{\omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2} - \frac{2j \tilde{\omega}_1 v_i \omega_{pi}^2 \omega_{ri}}{[(v_i^2 + \omega_{ri}^2 - \tilde{\omega}_1^2)^2 + 4\tilde{\omega}_1^2 v_i^2] \omega_2} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 = \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \tilde{\omega}_1}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_1^2} - j \left[\frac{-\epsilon_r k_E (1 - k_\omega) \sin \alpha t}{1 + k_E \cos \alpha t} + \frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{pi}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_1^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{cases} \quad (3)$$

где ω_{pi}, ω_{ri} – частота плазменных колебаний и гиротропная частота соответственно; v_i – частота столкновения частиц; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость профиля; σ_r – проводимость профиля; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; $\tilde{\omega}_1 = \omega_2 [k_\omega + k_E^2 + k_E(1 - k_\omega) \cos \alpha t]$; $\alpha = \omega_2 - \omega_1 = \omega_2(1 - k_\omega)$ – разность частот двух ЭМВ.

Выражения (3) содержат информацию об отклике исследуемой среды. Установлены частоты и амплитуды, при которых наблюдаются изменения электродинамических параметров среды над залежью. Проведенный теоретический анализ показал, что аномалии напряженности электрического поля проявляются в диапазоне частот 1–30 МГц. Если одна из ЭМВ (1) представляет собой модулированный сигнал, то на основе измерения фазовых характеристик поверхностного импеданса среды над УВЗ на несущих частотах 0,1–2,0 ГГц при использовании частоты модуля-

ции $F = 1-100$ МГц с коэффициентами амплитудной модуляции в диапазоне 0,1–1,0 при индексах частотной модуляции в интервале 1–95 повышается точность определения границ углеводородов.

Результаты исследований и их обсуждение

Представим разработанный аппаратно-программный комплекс, позволяющий осуществлять регистрацию напряженности электрического поля в режимах приема зондирующих сигналов и собственного излучения залежей углеводородов. Аппаратно-программный комплекс состоит из радиопередающего и радиоприемного устройств, перемещаемых вдоль исследуемого профиля с сохранением фиксированного расстояния 5–12 м, и программного обеспечения. Основные функции специального программного компонента: регистрация напряженности электрического поля; запись сигналов по трем измерительным каналам; адаптивная цифровая обработка; привязка измерительных сигналов к координатам измеряемого профиля с помощью приемника GPS; обработка измерительных сигналов; выделение аномалий напряженности электрического поля; отображение координат границ углеводородов. Использовалась вертикальная поляризация ЭМВ, принимался суммарный сигнал вспомогательного передатчика подсвета и собственного излучения залежи, измерялась величина напряженности электрического поля в точках измерения исследуемого профиля, по аномальным значениям напряженности электрического поля определялась граница залежи углеводородов. Экспериментальные исследования проводились на месторождениях углеводородов в Сирии на объектах Charefa, Deratia, Zumlat al Maharr.

На объекте Charefa (рис. 1) полевые наблюдения выполнялись в 2021 г. в два этапа: 16 и 20 июня с целью тестирования и калибровки оборудования и со 2 по 16 июля – для поиска и регистрации аномалий электромагнитного поля, соответствующих залежам углеводородов. Были отработаны шесть маршрутов R1–R6 общей протяженностью 17,89 км, из них пять – в направлении юг-север и один – запад-восток. На карте рис. 1 обозначены эксплуатируемые скважины CH2, CH5, CH6 и CH104. Отработанные маршруты с цветокодировкой напряженности электрического поля и скважины CH2, CH5, CH6 нанесены на карту, привязанную по предоставленным координатам устья скважины CH104.

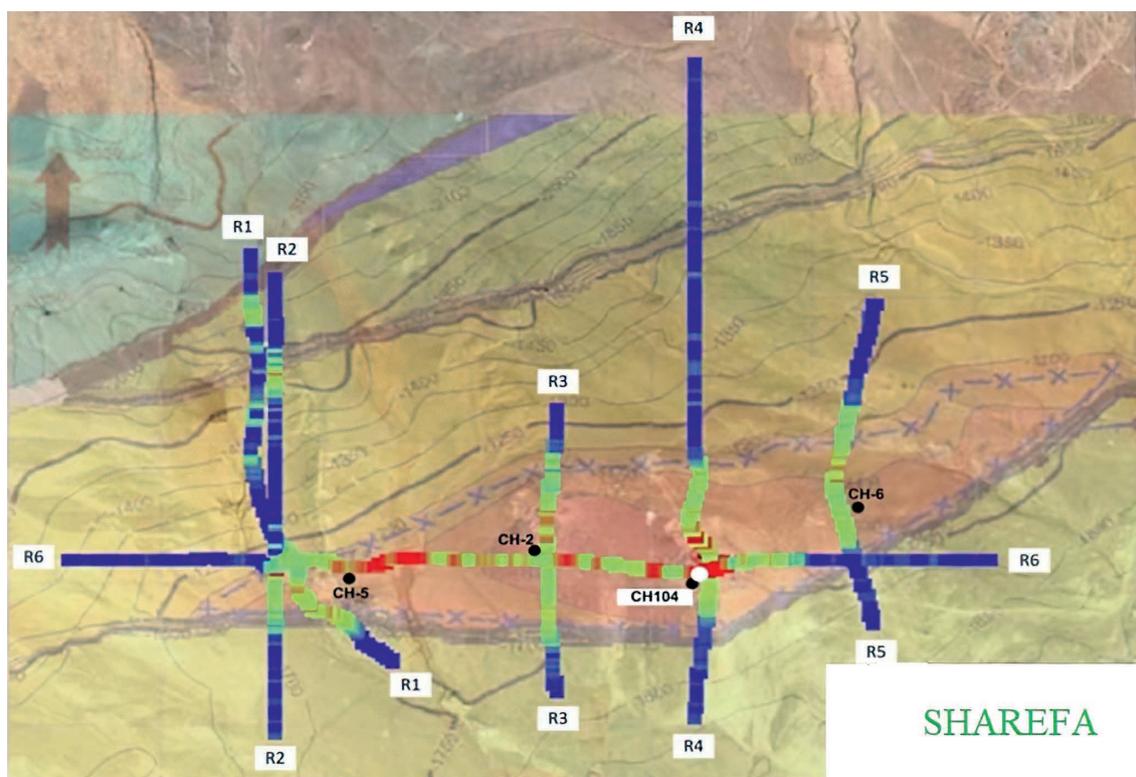


Рис. 1. Экспериментальные исследования на месторождении углеводородов на объекте Charefa
Fig. 1. Experimental studies on hydrocarbon deposits at the Charefa site

Регистрация напряженности электрического поля на объекте Charefa на маршруте R3 вдоль геологического профиля на участках отсутствия углеводородов (в данном случае газа) показана на рис. 2.

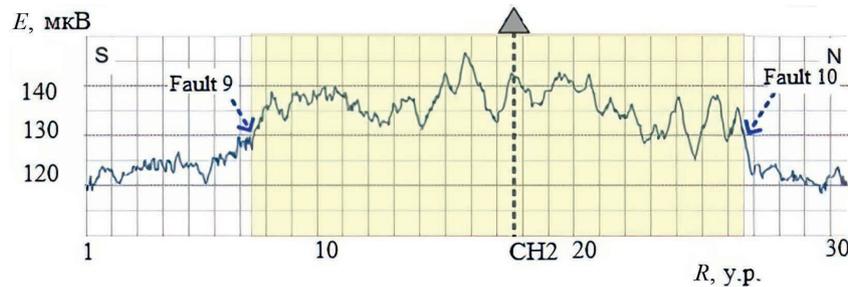


Рис. 2. Регистрация напряженности электрического поля на месторождении углеводородов на объекте Charefa на маршруте R3
Fig. 2. Recording electric field strength at a hydrocarbon field at the Charefa site on route R3

Точки измерения с расстоянием R (у.р. – условное расстояние) между участками определялись согласно масштабу карты. Так, границы залежи (реперные точки) соответствовали координатам: Fault 9 – $34^{\circ}30'56.90''$ с. ш., $37^{\circ}28'05.30''$ в. д.; Fault 10 – $34^{\circ}31'33.56''$ с. ш., $37^{\circ}28'05.98''$ в. д. В точках аномалий электромагнитного поля, соответствующих залежам углеводородов, напряженность электрического поля изменялась от 130 (на границах залежи) до 145 мкВ (максимальное значение). В пределах изучаемого участка на всех маршрутах уверенно выделялись границы месторождения. При сопоставлении их с геологической картой по целевому горизонту отмечалось хорошее совпадение выделенных реперных точек с границами залежи. Все добывающие на данной залежи скважины находятся в пределах установленных аномалий напряженности электрического поля.

На объекте Deratia полевые наблюдения были выполнены 14–15 июля 2021 г. в объеме 15,1 км. Четыре маршрута имели направление юг-север, а два отрабатывались в направлениях юго-запад – северо-восток. На рассматриваемой залежи к настоящему времени пробурено пять скважин (DA1, DA2, DA3, DA4, DA5), четыре из которых эксплуатируются (DA1, DA2, DA4, DA5), а в одной (DA3), по имеющимся данным, притока газа не было. Еще одна скважина на этом объекте – проектная (DA6). На данном месторождении на маршрутах надежно выделяются разрывные нарушения, которые ограничивают эту газовую залежь с юга, запада и севера. Максимальные значения параметра отмечаются в центральной части объекта в районе скважины DA2, в которой самый высокий на сегодняшний день текущий дебит – 153 тыс. м³. Отмечается тенденция уменьшения в пределах участка значений аномалии обобщенного параметра в северном и восточном направлениях в районе расположения скважин DA4 и DA5, что соответствует текущим дебитам скважин (34 и 40 тыс. м³ соответственно). Полученные данные позволяют предположить наличие газа в проектной скважине DA6 и в районе вскрытия целевого горизонта субгоризонтальным стволом скважины DA3.

Регистрация напряженности электрического поля на объекте Deratia на маршруте R6 вдоль геологического профиля на участках отсутствия газа показана на рис. 3.

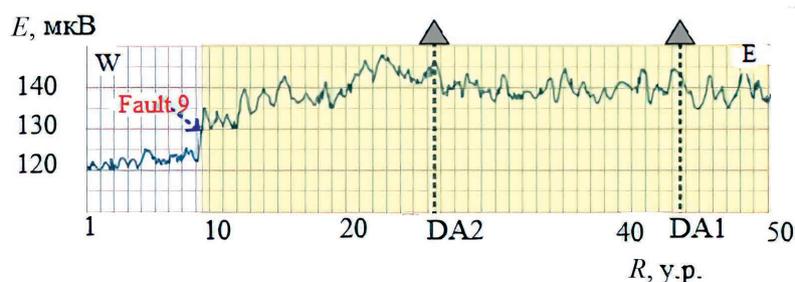


Рис. 3. Регистрация напряженности электрического поля на месторождении углеводородов на объекте Deratia на маршруте R6
Fig. 3. Recording electric field strength at a hydrocarbon field at the Deratia site on route R6

Аномалии напряженности электрического поля над углеводородами лежат в пределах от 130 (на границах залежи) до 148 мкВ (максимальное значение). На данном маршруте границам залежи соответствовали координаты реперной точки Fault 9 – $34^{\circ}05'28.89''$ с. ш., $36^{\circ}40'57.62''$ в. д.

Полевые работы на объекте Zumlat al Maharr проводились в период с 13 июня по 4 июля 2021 г. Всего было отработано 20 профилей общей протяженностью 63,6 км. Съёмки проводились в пешем и автомобильном вариантах. Шесть маршрутов имели направление запад-восток, восемь – с юга на север. Еще шесть дополнительных маршрутов проходили по диагонали демонстрационного участка – три с юго-востока на северо-запад, а три – с юго-запада на северо-восток.

Регистрация напряженности электрического поля на объекте Zumlat al Maharr на маршруте R2 вдоль геологического профиля на участках отсутствия газа показана на рис. 4. Аномалии напряженности электрического поля над углеводородами лежат в пределах от 140 (на границах залежи) до 160 мкВ (максимальное значение). На данном маршруте границам залежи соответствовали координаты реперных точек: R2-1: $34^{\circ}45'50.93''$ с. ш., $37^{\circ}36'26.52''$ в. д.; R2-2: $34^{\circ}45'50.33''$ с. ш., $37^{\circ}36'45.25''$ в. д.; R2-3: $34^{\circ}45'50.35''$ с. ш., $37^{\circ}36'59.03''$ в. д.; R2-4: $34^{\circ}45'50.36''$ с. ш., $37^{\circ}37'48.58''$ в. д.

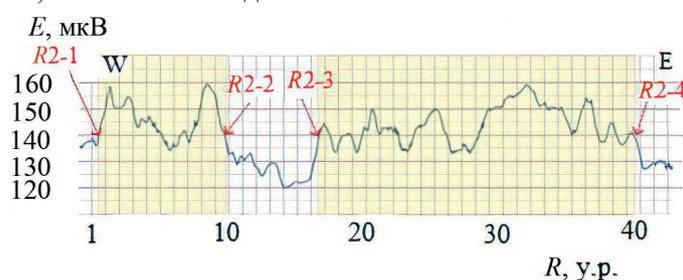


Рис. 4. Регистрация напряженности электрического поля на месторождении углеводородов на объекте Zumlat al Maharr на маршруте R2

Fig. 4. Recording electric field strength at a hydrocarbon field at the Zumlat al Maharr site on route R2

Результаты проведенных на объекте Zumlat al Maharr работ позволили выявить в центральной части участка аномальную зону повышенных значений напряженности электрического поля, перспективную с точки зрения наличия углеводородов. В результате бурения газ в этой скважине был получен.

Заключение

Теоретический анализ взаимодействия двухчастотных и модулированных электромагнитных волн с анизотропными средами над углеводородными залежами и экспериментальные исследования на месторождениях углеводородов в Сирии показали, что:

- существует частотный диапазон 1–30 МГц изменения электродинамических параметров среды над залежью, в котором проявляются аномалии напряженности электрического поля;
- применение модулированных сигналов повышает точность определения границ углеводородов при измерении фазовых характеристик поверхностного импеданса среды над углеводородными залежами на несущих частотах 0,1–2,0 ГГц с частотой модуляции $F = 1–100$ МГц при коэффициентах амплитудной модуляции в диапазоне 0,1–1,0 и индексах частотной модуляции в интервале 1–95;
- результаты экспериментальных исследований подтвердили 100-процентное наличие углеводородов;
- над залежью наблюдается рост собственного излучения, которое может быть зафиксировано за счет применения вспомогательного передатчика подсвета в диапазоне 1–30 МГц;
- применение нескольких частот подсвета может повысить информативность методов поиска и точность определения границ углеводородов.

Список литературы

1. Khakim, M. Y. N. Detection of Localized Surface Uplift by Differential SAR Interferometry at the Hangingstone Oil Sand Field, Alberta, Canada / M. Y. N. Khakim, T. Takeshi, M. Toshifumi // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013. Vol. PP, Is. 99. P. 1–11.

2. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method / Q. Sun [et al.] // *Appl. Sci.* 2024. No 14. <https://doi.org/10.3390/app14041560>.
3. Yan, L. Advancements in Controlled Source Electromagnetic Methods for Prospecting Unconventional Hydrocarbon Resources in China / L. Yan // *Surv Geophys.* 2024. No 45. P. 239–276. <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09808-6>.
4. Analysis of Active Ground Subsidence Zones in Guangzhou City Using ASAR Persistent Scatterer Interferometry / Qing Zhao [et al.] // *Urban Remote Sensing Event.* 2009. P. 1–5.
5. Karger, M. The Early Detection of Semi-Permeable Filtration Barriers by Using SAR Interferometry / M. Karger // *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).* 2014. P. 250–253.
6. Shuvaeva, M. Structural Model of Oil Field Limestone Reservoir in Denisov Depression Based on Alos Palsar Images and Seismic Exploration Data / M. Shuvaeva, D. Trofimov, A. Zakharov // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* 2012. P. 2726–2728.
7. Трофимов, Д. М. Современные методы и алгоритмы обработки космической, геолого-геофизической и геохимической информации / Д. М. Трофимов, В. Н. Евдокимова, М. К. Шуваева. М.: Физматлит, 2012.
8. Гололобов, Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей / Д. В. Гололобов. Минск: Бестпринт, 2009.
9. Янушкевич, В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей / В. Ф. Янушкевич. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2017.
10. Степанова, И. Э. Об интерпретации больших объемов данных гравимагниторазведки с помощью модифицированного метода S -аппроксимаций / И. Э. Степанова, Д. Н. Раевский, А. В. Щепетиллов // *Физика Земли.* 2017. № 1. С. 123–137.
11. Решение трехмерных нестационарных задач импульсной электроразведки / М. И. Иванов [и др.] // *Автоматрия.* 2007. Т. 43, № 2. С. 33–44.
12. Сравнение методов решения трехмерных задач становления поля с использованием аппроксимаций в частотной и временной областях / М. Г. Персова [и др.] // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации.* 2013. № 2. С. 127–138.
13. 2.5D Forward and Inverse Modelling for Interpreting Low-Frequency Electromagnetic Measurement / A. Abubakar [et al.] // *Geophysics.* 2008. Vol. 73, No 4. P. 1JA–Z66.
14. Взаимодействие ЧМ-сигналов с анизотропной средой / Д. В. Гололобов [и др.] // *Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: сб. матер. 2-й Междунар. науч.-техн. конф., 15–17 мая 2002 г. Новополоцк, 2002. С. 300–303.*
15. Interaction of Two-Frequency Electromagnetic Waves with Anisotropic Media Over Hydrocarbon Accumulation / V. F. Yanushkevich [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series.* 2022.

References

1. Khakim M. Y. N., Takeshi T., Toshifumi M. (2013) Detection of Localized Surface Uplift by Differential SAR Interferometry at the Hangingstone Oil Sand Field, Alberta, Canada. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* PP (99), 1–11.
2. Sun Q., Tan H., Wan W., Hu Q. (2024) Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method. *Appl. Sci.* (14). <https://doi.org/10.3390/app14041560>.
3. Yan L. (2024) Advancements in Controlled Source Electromagnetic Methods for Prospecting Unconventional Hydrocarbon Resources in China. *Surv Geophys.* (45), 239–276. <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09808-6>.
4. Qing Zhao, Hui Lin, Yuanzhi Zhang, Liming Jiang, Fulong Chen, Shilai Cheng (2009) Analysis of Active Ground Subsidence Zones in Guangzhou City Using ASAR Persistent Scatterer Interferometry. *In Urban Remote Sensing Event.* 1–5.
5. Karger M. (2014) The Early Detection of Semi-Permeable Filtration Barriers by Using SAR Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).* 250–253.
6. Shuvaeva M., Trofimov D., Zakharov A. (2012) Structural Model of Oil Field Limestone Reservoir in Denisov Depression Based on Alos Palsar Images and Seismic Exploration Data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* 2726–2728.
7. Trofimov D. M., Evdokimova V. N., Shuvaeva M. K. (2012) *Modern Methods and Algorithms for Processing Space, Geological, Geophysical and Geochemical Information.* Moscow, Fizmatlit Publ. (in Russian).
8. Gololobov D. V. (2009) *Interaction of Electromagnetic Waves and Hydrocarbon Deposits.* Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
9. Janushkevich V. F. (2017) *Electromagnetic Methods for Searching and Identifying Hydrocarbon Deposits.* Novopolock, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (in Russian).

10. Stepanova I. E., Raevsky D. N., Shchepetilov A. V. (2017) On the Interpretation of Large Volumes of Gravitational Magnetic Survey Data Using the Modified *S*-Approximation Method. *Physics of the Earth*. (1), 123–137 (in Russian).
11. Ivanov M. I., Kateshov V. A., Kremer I. A., Urev M. V. (2007) Solution of Three-Dimensional Non-Stationary Problems of Pulsed Electrical Prospecting. *Autometry*. 43 (2), P. 33–44 (in Russian).
12. Persova M. G., Soloveychik Yu. G., Aleksanova E. D., Blinova M. E., Guseinov R. G., Pugin A. V., et al. (2013) Comparison of Methods for Solving Three-Dimensional Problems of Field Formation Using Approximations in the Frequency and Time Domains. *Reports of the Academy of Sciences of Higher School of the Russian Federation*. (2), 127–138 (in Russian).
13. Abubakar A., Habashy T. M., Druskin V. L., Knizhnerman L., Alumbaugh D. (2008) 2.5D Forward and Inverse Modelling for Interpreting Low-Frequency Electromagnetic Measurement. *Geophysics*. 73 (4), 1JA–Z66.
14. Gololobov D. V., Tsyvis N. V., Kalintsev S. V., Khadyko D. L., Yanushkevich V. F. (2002) Interaction of FM Signals with an Anisotropic Medium. *Problems of Design and Production of Radio-Electronic Equipment. Collection of Mats 2 Int. Scientific-Technical Conferences, May 15–17, Novopolotsk*. 300–303 (in Russian).
15. Yanushkevich V. F., Dauhiala D. A., Adamovich A. L., Abramenska S. N., Kalintsau S. V. (2022) Interaction of Two-Frequency Electromagnetic Waves with Anisotropic Media Over Hydrocarbon Accumulation. *Journal of Physics: Conference Series*.

Вклад авторов

Янушкевич В. Ф. выполнил теоретическое обоснование, разработал методику проведения испытаний, интерпретировал полученные результаты, подготовил материалы статьи.

Драчёв Д. В. осуществил подготовку оборудования и экспериментальные исследования.

Громько В. М. отвечал за интерпретацию полученных результатов испытаний.

Authors' contribution

Yanushkevich V. F. performed the theoretical substantiation, developed the test methodology and interpretation of the results obtained, and prepared the materials for the article.

Drachev D. V. carried out equipment preparation and experimental research.

Gromyko V. M. was responsible for the interpretation of the test results.

Сведения об авторах

Янушкевич В. Ф., канд. техн. наук, доц. каф. энергетики и электроники, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой

Драчёв Д. В., дир. ООО «ПУВА»

Громько В. М., вед. геолог ООО «ПУВА»

Адрес для корреспонденции

211501, Республика Беларусь,
г. Новополоцк, ул. Молодежная, 189, к. 81
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
Тел.: +375 29 514-20-30
E-mail: v.yanushkevich@psu.by
Янушкевич Виктор Францевич

Information about the authors

Yanushkevich V. F., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Power Engineering and Electronics, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

Drachev D. V., Director of LLC “PUVA”

Gromyko V. M., Leading Geologist of LLC “PUVA”

Address for correspondence

211501, Republic of Belarus,
Novopolotsk, Molodezhnaya St., 189, room 81
Euphrosyne Polotskaya
State University of Polotsk
Tel.: +375 29 514-20-30
E-mail: v.yanushkevich@psu.by
Yanushkevich Viktor Frantsevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-38-45>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.666

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ

Т. М. МАРЧУК, А. А. ДЕНИС, А. В. ГРИНКЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 23.10.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. При работе радиолокационных станций на вход приемника поступают радиоимпульсы различной интенсивности в зависимости от типа цели, дальности до цели и других факторов. Регулировка усиления приемника необходима для настройки его чувствительности таким образом, чтобы обеспечить наилучший прием сигналов с амплитудами, изменяющимися в широких пределах. В статье рассмотрена логарифмическая система автоматической регулировки усиления, проведен анализ ее преимуществ и недостатков по сравнению с классической системой автоматической регулировки усиления, выполнено ее моделирование в графической среде программирования Matlab/Simulink.

Ключевые слова: амплитудный детектор, система автоматической регулировки усиления, Matlab/Simulink.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Марчук, Т. М. Исследование логарифмической системы автоматической регулировки усиления / Т. М. Марчук, А. А. Денис, А. В. Гринкевич // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 38–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-38-45>.

STUDY OF LOGARITHMIC SYSTEM OF AUTOMATIC GAIN CONTROL

TIMUR M. MARCHUK, ANASTASIA A. DENIS, ANTON V. GRINKEVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 23.10.2023

Abstract. When radar stations operate, radio pulses of varying intensity are received at the receiver input depending on the type of target, range to the target and other factors. Adjusting the receiver gain is necessary to adjust its sensitivity in such a way as to provide the best reception of signals with amplitudes that vary widely. The article discusses a logarithmic automatic gain control system, analyzes its advantages and disadvantages compared to classical automatic gain control system, and performs its simulation in the graphical programming environment Matlab/Simulink.

Keywords: amplitude detector, automatic gain control system, Matlab/Simulink.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Marchuk T. M., Denis A. A., Grinkevich A. V. (2024) Study of Logarithmic System of Automatic Gain Control. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 38–45. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-38-45> (in Russian).

Введение

В большинстве радиолокационных приемников для обеспечения линейной обработки сигналов (без ограничения амплитуды) принимаются меры по расширению динамического диапазона усилителя промежуточной частоты с помощью схем автоматической регулировки усиления (АРУ) [1]. Как правило, современные радиолокационные станции содержат несколько каскадов автоматической регулировки уровня усиления сигнала. Часть из них выполняется в аналоговом виде и обеспечивает постоянный уровень сигнала на входе аналого-цифрового преобразователя для наиболее эффективной работы блоков цифровой обработки сигналов. Цифровая часть приемной системы также нередко содержит несколько систем регулировки усиления. От уровня входного сигнала зависят параметры работы петли синхронизации, построенной на основе петли фазовой автоподстройки частоты [2]. Системы АРУ нашли широкое применение в аналоговых и цифровых системах связи [3].

Цель исследований – обзор существующих схем АРУ, моделирование модифицированной логарифмической системы АРУ в Matlab/Simulink.

Анализ схем классической и логарифмической цифровых систем автоматической регулировки усиления и варианты их совершенствования

Общая структурная схема АРУ показана на рис. 1. Как видно из рисунка, АРУ является замкнутой системой с обратной связью. Амплитудный детектор предназначен для выделения амплитуды высокочастотного радиосигнала. Амплитуда принятого сигнала сравнивается с опорным уровнем (желаемым уровнем, уставкой), формируя ошибку усиления. Далее ошибка усиления поступает на фильтр обратной связи, обеспечивающий требуемые динамические свойства системы АРУ: система АРУ должна реагировать на медленные (паразитные) изменения уровня входного сигнала и не реагировать на быстрые (обусловленные полезным сигналом) [4]. С выхода фильтра обратной связи ошибка усиления поступает на перемножитель, где умножается с входным сигналом для достижения нужного усиления.

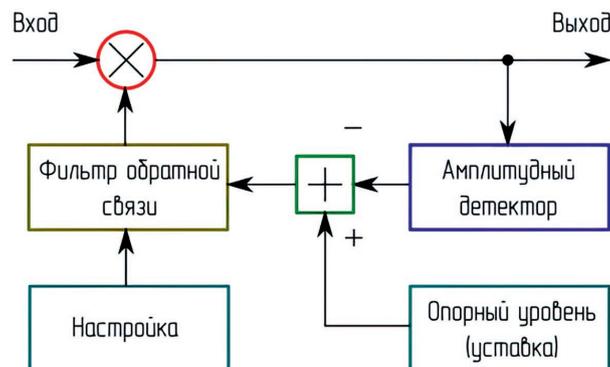


Рис. 1. Общая структурная схема автоматической регулировки усиления
Fig. 1. General block diagram of the automatic gain control

Представленная на рис. 1 схема показывает общий принцип работы АРУ (как аналоговой, так и цифровой). В отличие от аналоговых, цифровые системы АРУ имеют большую точность регулирования, высокую надежность и стабильность. Так, в [5, 6] рассмотрены цифровые системы АРУ с регулируемым элементом в виде усилителя с переменным коэффициентом передачи, в [7] показана цифровая система АРУ с аттенуатором, а в [8] – цифровая система АРУ без фильтра. Поэтому далее подробно рассмотрим именно виды цифровой системы АРУ.

Цифровая система АРУ в зависимости от способа формирования ошибки усиления может быть классической или логарифмической. Структурная схема классической цифровой петли автоматического регулирования уровня комплексного сигнала показана на рис. 2. Анализ источников по данной теме [1–8] показал, что главный недостаток классической цифровой системы АРУ – зависимость параметров работы системы регулирования от уровня входного сигнала. Длительность переходного процесса классической цифровой петли обратно пропорциональна произведению уровня входного сигнала и корректирующего коэффициента. При этом одним из вариантов, позволяющим компенсировать данный недостаток, является использование логарифмической цифровой системы АРУ [2].

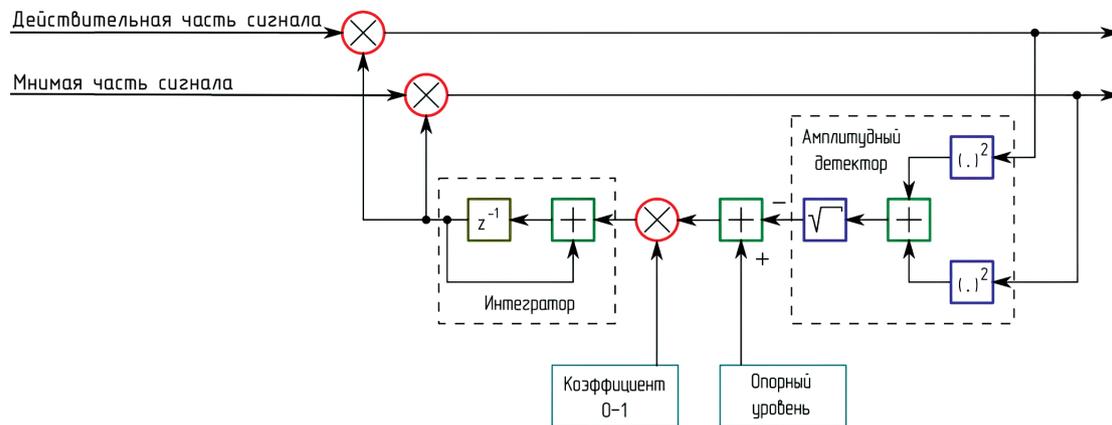


Рис. 2. Структурная схема классической цифровой петли автоматического регулирования уровня комплексного сигнала

Fig. 2. Block diagram of a classic digital loop for automatic control of the complex signal level

Структурная схема логарифмической цифровой петли автоматического регулирования уровня комплексного сигнала показана на рис. 3. При этом схема логарифмической петли АРУ комплексного сигнала, в отличие от классической схемы, оперирует логарифмом амплитуды входного сигнала и опорного уровня, а выходной сигнал фильтра обратной связи (интегратора) является показателем степени, в которую возводится экспонента перед поступлением на перемножитель сигналов. При этом длительность переходного процесса логарифмической цифровой петли АРУ обратно пропорциональна значению коэффициента и не зависит от уровня входного сигнала [2].

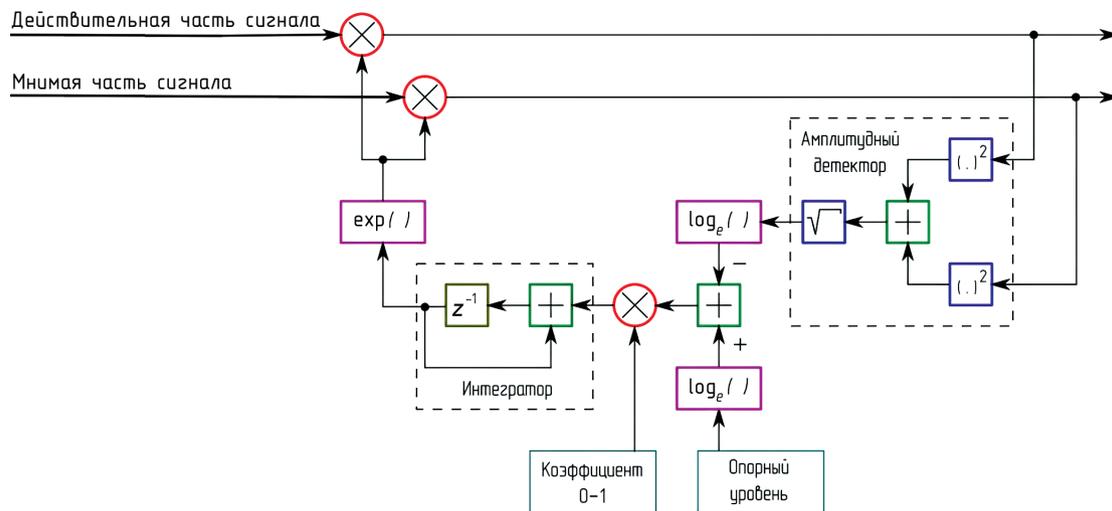


Рис. 3. Структурная схема логарифмической цифровой петли автоматического регулирования уровня комплексного сигнала

Fig. 3. Block diagram of a logarithmic digital loop for automatic control of the complex signal level

Таким образом, приведенные на рис. 2, 3 структурные схемы классической и логарифмической цифровых петель АРУ оценивают амплитуду (мощность) входного сигнала по одному отсчету, что, как показывает практика применения таких схем в реальных системах (например, в телеметрических системах), не обеспечивает эффективность работы системы регулирования. В данном случае теряется плавность работы системы: любые шумы или резкие изменения уровня входного сигнала приведут к резким скачкообразным изменениям выходного сигнала (система очень чувствительна к шумам). Это может вызвать неправильную работу следующих за АРУ функциональных узлов системы. Поэтому целесообразно исследовать возможность применения амплитудного детектора, анализирующего амплитуду (мощность) N входных отсчетов сигнала. Исходя из преимуществ логарифмической системы АРУ по сравнению с классической, исследуем возможность применения модифицированного детектора в логарифмической системе АРУ.

Реализация логарифмической цифровой системы автоматической регулировки усиления в Matlab/Simulink

На рис. 4 представлена реализация логарифмической цифровой системы АРУ с модифицированным детектором в Matlab/Simulink, на рис. 5 изображен модифицированный детектор системы АРУ.

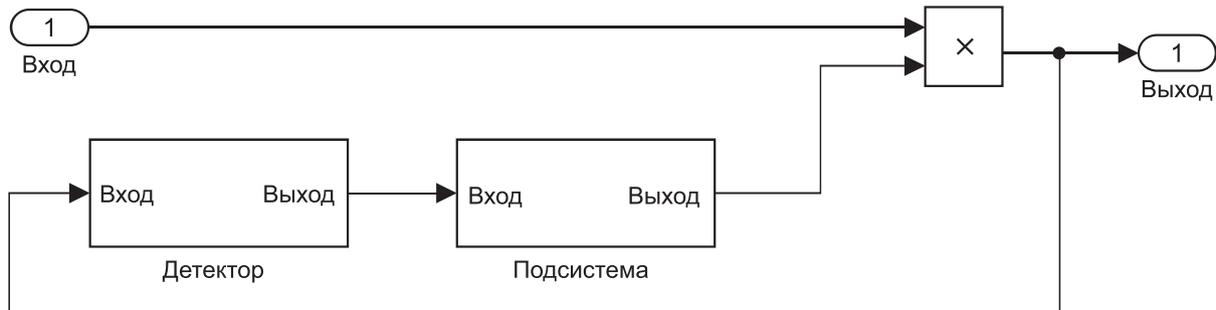


Рис. 4. Реализация логарифмической цифровой системы автоматического регулирования уровня в Matlab/Simulink

Fig. 4. Implementation of a logarithmic digital automatic level control system in Matlab/Simulink

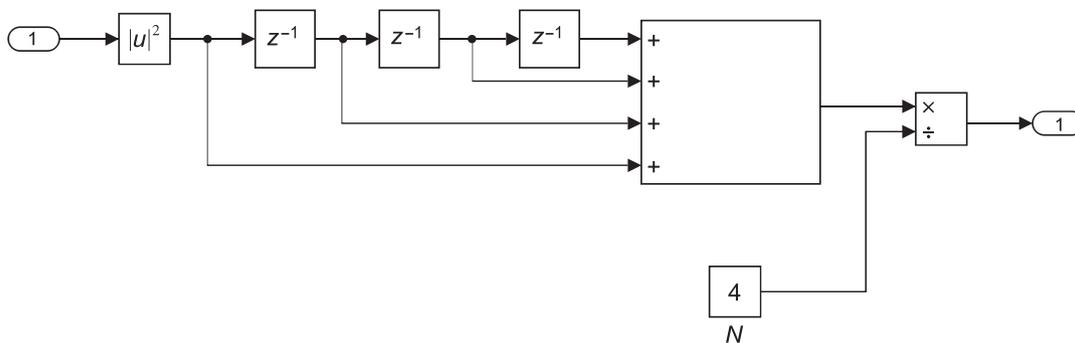


Рис. 5. Детектор системы автоматического регулирования уровня

Fig. 5. Automatic level control detector

Детектор состоит из $N-1$ ($N = 4$) линий задержек и сумматора. Он вычисляет среднее значение амплитуды (мощности) N отсчетов входного сигнала, где N – период обновления (длина окна усреднения в выборках).

Подсистема в АРУ (рис. 6) включает в себя:

А – опорный (желаемый) уровень выходной мощности в ваттах (desired output power);

К – размер шага (step size). При его увеличении АРУ быстрее реагирует на изменение уровня входного сигнала. Размер шага влияет на скорость сходимости мощности к заданному значению (с увеличением шага быстрее сходится). Большой размер шага приводит к менее точной коррекции усиления. К изменяется в диапазоне от 0 до 1;

MaxGain – максимальный коэффициент усиления мощности (maximum power gain), в раз. Если мощность входного сигнала АРУ очень мала, то усиление АРУ будет очень большим. Это может вызвать проблемы, когда мощность входного сигнала внезапно увеличивается. MaxGain используют, чтобы избежать этого, ограничивая усиление, которое АРУ применяет ко входному сигналу.

Расчет нужного коэффициента усиления происходит в подсистеме, представленной на рис. 6.

Входным сигналом для АРУ будет сигнал с двоичной фазовой манипуляцией (BPSK модулированный сигнал). На рис. 7 изображена схема с применением логарифмической системы АРУ для BPSK модулированного сигнала, реализованная в Matlab/Simulink. Блок AGC1 представляет собой логарифмическую систему АРУ, в которой детектор анализирует амплитуду (мощность) одного входного отсчета ($N = 1$). Блок AGC4 представляет собой логарифмическую систему АРУ с модифицированным детектором, в которой детектор анализирует амплитуду (мощность) четырех входных отсчетов ($N = 4$).

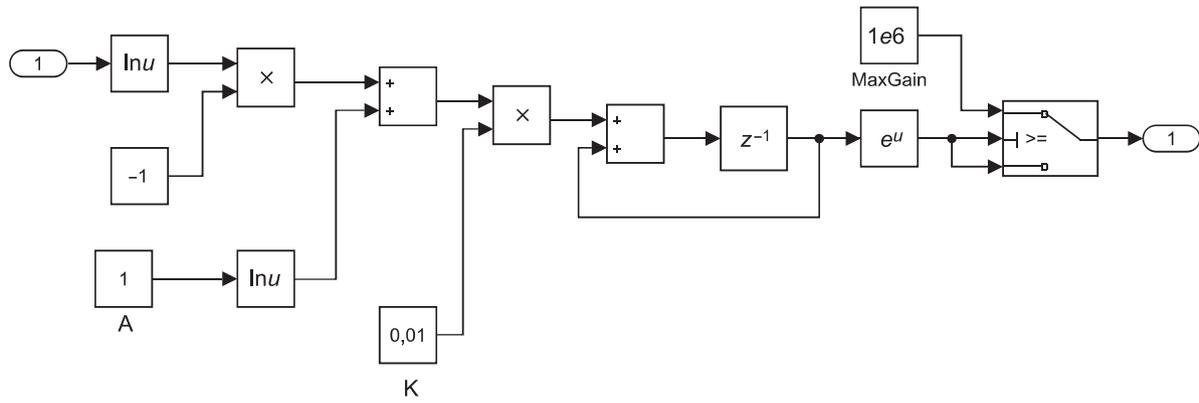


Рис. 6. Подсистема в системе автоматического регулирования уровня
Fig. 6. Subsystem in an automatic level control system

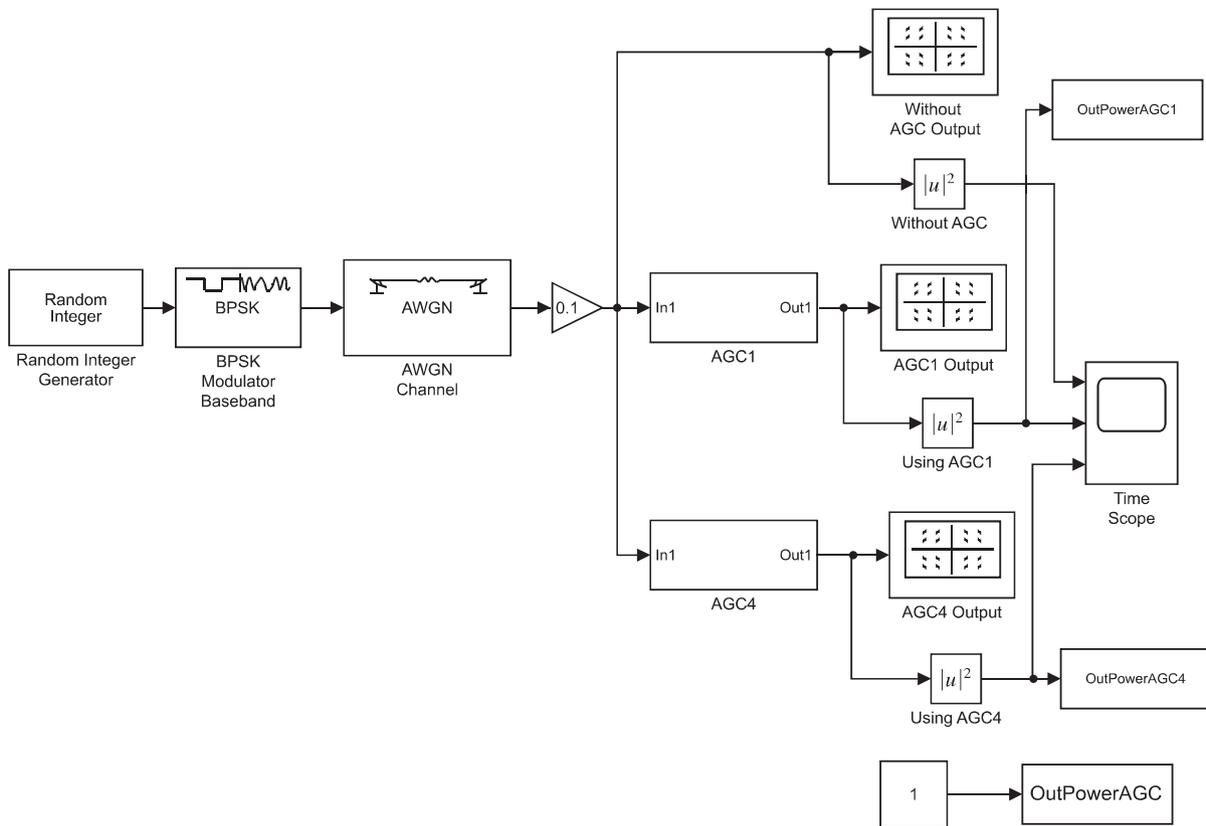


Рис. 7. Схема с применением логарифмической системы автоматического регулирования уровня для BPSK модулированного сигнала
Fig. 7. Circuit using logarithmic automatic level control system for BPSK modulated signal

Результаты моделирования (при отношении сигнал/шум в канале, равном 10 дБ) показаны на рис. 8. Желаемый уровень выходной мощности на выходе АРУ равен 1 Вт. На рис. 9, 10 показаны результаты моделирования этой же схемы при отношениях сигнал/шум в канале, равных 4 и 0 дБ соответственно.

Из рис. 8–10 следует, что применение модифицированного детектора (увеличение длины усреднения до четырех отсчетов) уменьшает дисперсию мощности выходного сигнала относительно установившегося значения. Применение модифицированного детектора в логарифмической системе АРУ будет более оправдано в системах с низким отношением сигнал/шум.

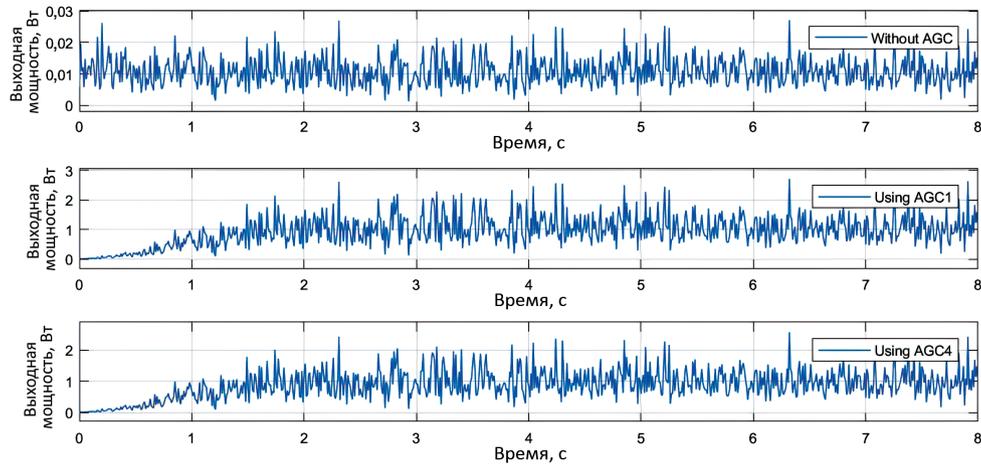


Рис. 8. Результаты моделирования для отношения сигнал/шум в канале 10 дБ
Fig. 8. Simulation results for signal-to-noise ratio in a 10 dB channel

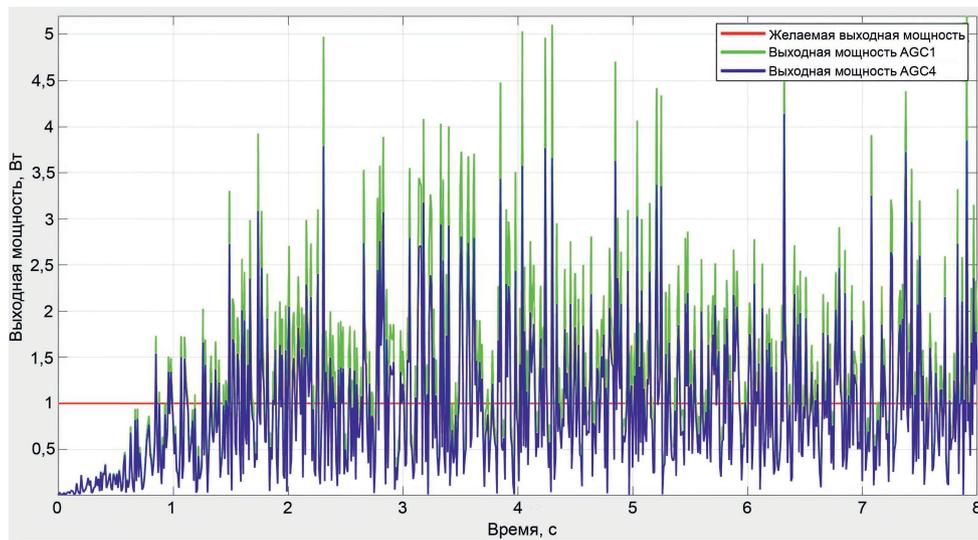


Рис. 9. Результаты моделирования для отношения сигнал/шум в канале 4 дБ
Fig. 9. Simulation results for signal-to-noise ratio in a 4 dB channel

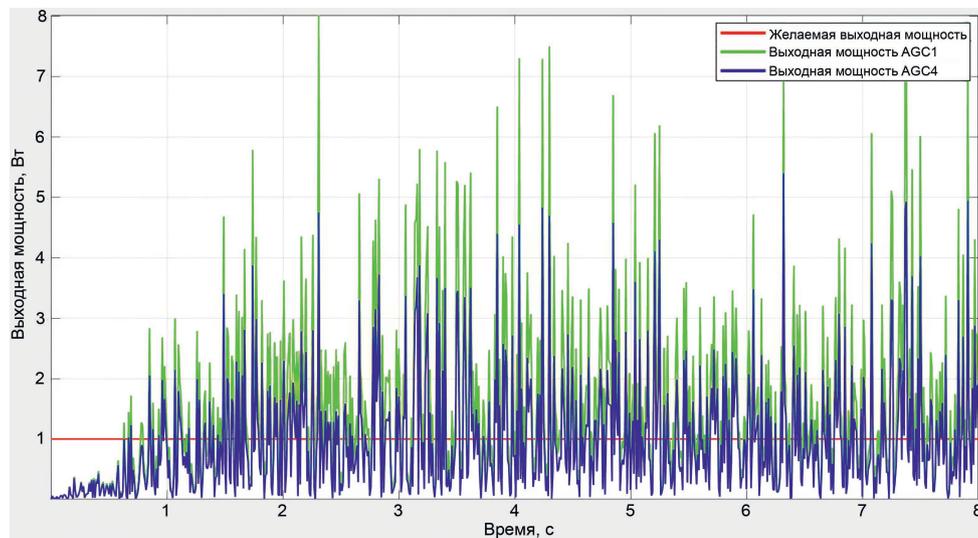


Рис. 10. Результаты моделирования для отношения сигнал/шум в канале 0 дБ
Fig. 10. Simulation results for signal-to-noise ratio in a 0 dB channel

Заключение

1. Рассмотрена логарифмическая система автоматического регулирования уровня, проведен анализ ее преимуществ и недостатков по сравнению с классической системой, выполнено ее моделирование в графической среде программирования Matlab/Simulink. Предложен вариант усовершенствования логарифмической системы автоматического регулирования уровня.

2. Преимуществом логарифмической системы является то, что длительность переходного процесса обратно пропорциональна значению размера шага и не зависит от уровня входного сигнала. Ее недостаток – сложность реализации вычисления логарифма и операции возведения в степень. Но данные недостатки легко устранимы с помощью современной элементной базы путем использования высокопроизводительных устройств обработки сигналов.

3. Результаты моделирования показали, что, применяя логарифмическую систему автоматического регулирования уровня с модифицированным детектором и изменяя количество анализируемых отсчетов (N), можно обеспечить требуемые динамические свойства для системы регулирования усиления в любой обстановке. Также нужно учитывать, что слишком большое увеличение длины усреднения снижает скорость сходимости мощности к заданному значению и увеличивает вычислительные затраты.

Список литературы

1. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск / В. Н. Тяпкин [и др.]. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011.
2. Боев, Н. Системы связи. Подвижные системы связи. Лекции / Н. Боев. Красноярск: Электрон, 2013.
3. Pérez, J. P. A. Automatic Gain Control / J. P. A. Pérez, S. C. Pueyo, B. C. López // Springer Fachmedien. 2011.
4. Плаксиенко, В. С. Устройства приема и обработки сигналов. Ч. 3 / В. С. Плаксиенко, Н. Е. Плаксиенко. Таганрог: Изд-во Таганр. гос. радиотех. ун-та, 2001.
5. Vucic, M. All-Digital High-Dynamic Automatic Gain Control / M. Vucic, M. Butorac // 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2009. P. 1032–1035.
6. Zhang, H. Analysis and Implementation of Digital Automatic Gain Control for DAB Baseband Decoder / H. Zhang, G. Wang, M. Lu // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2011. Vol. 57, No 2. P. 327–334.
7. Design and Implementation of Synchronization and AGC for OFDM-Based WLAN Receivers / V. P. G. Jimenez [et al.] // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2004. Vol. 50, No 4. P. 1016–1025.
8. Vavra, J. On the Modeling of Automatic Gain Control in SPICE / J. Vavra, J. Bajer // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2017. Vol. 9, No 2–7. P. 187–190.

References

1. Тяпкин В. Н., Фомин А. Н., Гарин Е. Н., Фатеев Ю. Л., Бердышев В. П., Наговитсын А. А., et al. (2011) *Fundamentals of Building Radar Stations of Radio Engineering Troops*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University (in Russian).
2. Boev N. (2013) *Communication Systems. Mobile Communication Systems. Lectures*. Krasnoyarsk, Electron Pybl. (in Russian).
3. Pérez J. P. A., Pueyo S. C., López B. C. (2011) Automatic Gain Control. *Springer Fachmedien*.
4. Plaksienko V. S., Plaksienko N. E. (2001) *Devices for Receiving and Processing Signals. Part 3*. Taganrog, Publishing House of Taganrog State Radio Engineering University (in Russian).
5. Vucic M., Butorac M. (2009) All-Digital High-Dynamic Automatic Gain Control. *2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 1032–1035.
6. Zhang H., Wang G., Lu M. (2011) Analysis and Implementation of Digital Automatic Gain Control for DAB Baseband Decoder. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 57 (2), 327–334.
7. Jimenez V. P. G., Garcia M. J. F.-G., Serrano F. J. G., Armada A. G. (2004) Design and Implementation of Synchronization and AGC for OFDM-Based WLAN Receivers. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 50 (4), 1016–1025.
8. Vavra J., Bajer J. (2017) On the Modeling of Automatic Gain Control in SPICE. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. 9 (2–7), 187–190.

Вклад авторов

Марчук Т. М. реализовал логарифмическую цифровую систему автоматического регулирования уровня в Matlab/Simulink, выполнил ее моделирование, оформил результаты моделирования.

Денис А. А. провела анализ существующих схем автоматического регулирования уровня, участвовала в подготовке рукописи статьи.

Гринкевич А. В. осуществил постановку задачи для проведения исследования, руководил процессом написания статьи.

Authors' contribution

Marchuk T. M. implemented a logarithmic digital automatic level control system in Matlab/Simulink, performed its simulation and compiled the simulation results.

Denis A. A. carried out an analysis of existing automatic level control schemes, participated in the preparation of the manuscript of the article.

Grinkevich A. V. carried out the formulation of the task for the research, supervised the process of writing the article.

Сведения об авторах

Марчук Т. М., асп., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Денис А. А., асп., БГУИР

Гринкевич А. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. информационных радиотехнологий, БГУИР

Information about the authors

Marchuk T. M., Postgraduate, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Denis A. A., Postgraduate, BSUIR

Grinkevich A. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Radiotechnologies, BSUIR

Адрес для корреспонденции

220025, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Космонавтов, 38, к. 2
Тел.: +375 29 221-23-31
E-mail: Timur23Martschuk@yandex.ru
Марчук Тимур Михайлович

Address for correspondence

220025, Republic of Belarus,
Minsk, Cosmonauts St., 38, H. 2
Tel.: +375 29 221-23-31
E-mail: Timur23Martschuk@yandex.ru
Marchuk Timur Mikhailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-46-54>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.8

ФОРМИРОВАНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ ТОКОВ ПОСРЕДСТВОМ СОСТАВНЫХ УНИПОЛЯРНЫХ И БИПОЛЯРНО-УНИПОЛЯРНЫХ СТРУКТУР ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМОТЕХНИКИ

В. Л. СВИРИД

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 15.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Исследуются трансформаторы (отражатели) токов на униполярных (полевых) транзисторах на предмет их эффективного применения в интегральной схемотехнике. Однако их широкое использование ограничено из-за ряда особенностей, на преодоление которых направлены данные исследования. Эти особенности связаны не только с геометрическим и электрическим факторами, но и с температурным. Обращено внимание на составные униполярные структуры, которые оказались эффективными для формирования термостабильных токов. Даны рекомендации схемного характера и произведена оптимизация питающего напряжения на предмет его минимизации при практической реализации данного режима. Для трансформации термостабильных токов предложены и проанализированы оригинальные схемные решения, пригодные для интегрального исполнения, на основе составных биполярно-униполярных структур, позволившие изменять эти токи как в большую, так и в меньшую сторону без заметного ухудшения их основных параметров.

Ключевые слова: интегральная схемотехника, формирование, трансформация, термостабильные токи, униполярные и биполярно-униполярные структуры.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Свирид, В. Л. Формирование и трансформация термостабильных токов посредством составных униполярных и биполярно-униполярных структур интегральной схемотехники / В. Л. Свирид // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 46–54. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-46-54>.

FORMATION AND TRANSFORMATION OF THERMOSTABLE CURRENTS BY MEANS OF COMPOSITE UNIPOLAR AND BIPOLAR-UNIPOLAR STRUCTURES OF INTEGRATED CIRCUIT

VLADIMIR L. SVIRID

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15.01.2024

Abstract. Current transformers (reflectors) based on unipolar (field-effect) transistors are being studied for their effective use in integrated circuit technology. However, their widespread use is limited due to a number of features that these studies are aimed at overcoming. These features are associated not only with geometric and electrical factors, but also with temperature. Attention is drawn to composite unipolar structures, which turned out to be effective for the formation of thermostable currents. Recommendations of a circuit nature are given and the supply voltage is optimized to minimize it for the practical implementation of this mode. For the transformation of ther-

mostable currents, original circuit solutions suitable for integral execution, based on composite bipolar-unipolar structures, were proposed and analyzed, which made it possible to change these currents both up and down without noticeable deterioration of their basic parameters.

Keywords: integrated circuit engineering, formation, transformation, thermostable currents, unipolar and bipolar-unipolar structures.

Conflict of interest. The author declares that there is no conflict of interest.

For citation. Svirid V. L. (2024) Formation and Transformation of Thermostable Currents by Means of Composite Unipolar and Bipolar-Unipolar Structures of Integrated Circuit. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 46–54. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-46-54> (in Russian).

Введение

Трансформаторы (отражатели) тока на униполярных (полевых) транзисторах (ПТ) находят применение в интегральной схемотехнике [1] точно так же, как и диодно-транзисторные структуры (ДТС) на биполярных транзисторах (БТ). Однако их широкое использование ограничено из-за ряда недостаточно исследованных особенностей [2–4], методы преодоления которых представлены в данной статье. Эти особенности связаны не только с геометрическим и электрическим факторами, но и с температурным. Следует отметить, что температурный фактор в ДТС на БТ не используется из-за чрезвычайной сложности его контроля в технологическом процессе производства интегральных микросхем (ИС), а также из-за ничтожно малого градиента температуры в ответственных элементах ИС, достигаемого в этом процессе.

Рассмотрим ДТС на основе геометрического фактора, определяющего различие в формировании основных параметров ПТ: напряжения отсечки $U_{зи.отс}$ и максимального тока стока $I_{с.макс}$. Остановимся на использовании электрического и температурного факторов для формирования и трансформации термостабильных токов на базе составных униполярных и биполярно-униполярных структур, актуальных для интегральной схемотехники, поскольку позволяют трансформировать данные токи как в большую, так и в меньшую сторону без заметного ухудшения их основных параметров.

Трансформация токов на основе униполярных диодно-транзисторных структур

Согласно [1], квадратическая аппроксимация сток-затворной характеристики ПТ имеет вид

$$I_c(U_{зи}) = I_{с.макс} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи.отс}} \right)^2. \quad (1)$$

На основании (1) представим в общем виде напряжение затвор-исток и рабочие токи, протекающие в ДТС (рис. 1, а) соответственно:

$$U_{зи} = U_{зи.отс} \left(1 - \sqrt{I_c(U_{зи}) / I_{с.макс}} \right); \quad (2)$$

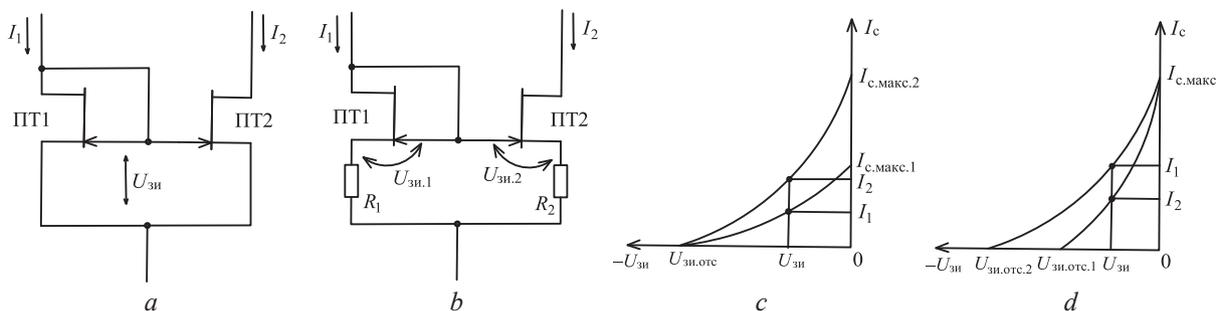


Рис. 1. Диодно-транзисторные структуры на полевых транзисторах на основе геометрического (а) и электрического (б) факторов и их сток-затворные характеристики

с идентичными напряжениями отсечки $U_{зи.отс}$ (с) и максимальными токами стока $I_{с.макс}$ (д)

Fig. 1. Diode-transistor structures based on field-effect transistors based on geometric (a)

and electrical (b) factors and their drain-gate characteristics

with identical cut-off voltages $U_{zi.ots}$ (c) and maximum drain currents $I_{c,max}$ (d)

$$I_1 = I_{с.макс1} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи.отс1}} \right)^2; \quad I_2 = I_{с.макс2} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зи.отс2}} \right)^2, \quad (3)$$

где $U_{зи}$ – напряжение затвор-исток; $U_{зи.отс}$ – напряжение отсечки; $I_{с.макс}$ – максимальный ток стока; I_1, I_2 – входной и выходной токи соответственно; $I_{с.макс1}, I_{с.макс2}$ – максимальный ток стока первого и второго ПТ соответственно.

На основании (3) с учетом (2) запишем отношение токов, протекающих в ДТС (рис. 1, а):

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_{с.макс2}}{I_{с.макс1}} \frac{\left[1 - \frac{U_{зи.отс1}}{U_{зи.отс2}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_1}{I_{с.макс1}}} \right) \right]^2}{\left[1 - \frac{U_{зи.отс1}}{U_{зи.отс1}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_1}{I_{с.макс1}}} \right) \right]^2} = \frac{I_{с.макс2}}{I_1} \left[1 - \frac{U_{зи.отс1}}{U_{зи.отс2}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_1}{I_{с.макс1}}} \right) \right]^2, \quad (4)$$

где $U_{зи.отс1}, U_{зи.отс2}$ – напряжение отсечки первого и второго ПТ соответственно.

При использовании в ДТС полевых транзисторов с одинаковыми напряжениями отсечки ($U_{зи.отс1} = U_{зи.отс2} = U_{зи.отс}$) (рис. 1, с) отношение токов (4) приобретает вид

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_{с.макс2}}{I_{с.макс1}}. \quad (5)$$

При идентичных максимальных токах стока ($I_{с.макс1} = I_{с.макс2} = I_{с.макс}$) отношение токов (5) составит $I_2/I_1 = 1$. Такая ДТС является «отражателем тока» точно так же, как и ДТС на БТ при аналогичных условиях [1]. При равенстве только максимальных токов ПТ (рис. 1, d) отношение I_2/I_1 вычисляется по (4). Сопротивление для тока I_1 определяется в соответствии с законом Ома и учетом (2), а для I_2 оценивается обратной величиной выходной проводимости g_{22} применяемого ПТ:

$$R_{I_1} = \frac{U_{зи}}{I_1} = \frac{U_{зи.отс1}}{I_1} \left(1 - \sqrt{I_1 / I_{с.макс1}} \right); \quad (6)$$

$$R_{I_2} = 1 / g_{22(ПТ2)} = U_B / I_2, \quad (7)$$

где U_B – параметр, соответствующий обратной величине коэффициента модуляции длины канала, имеющий размерность вольт [В] и по своим свойствам адекватный напряжению Эрли БТ [1].

Если принять $I_1 = I_2 = 1$ мА, $U_{зи.отс} = -3$ В, $I_{с.макс} = 9$ мА, $U_B = 100$ В, то в соответствии с (6) и (7) получаем $R_{I_1} = 2$ кОм, что заметно больше, чем в аналогичных условиях в ДТС на БТ, а $R_{I_2} = 100$ кОм, что соизмеримо в той же ДТС [1]. Как видно, данная ДТС (рис. 1, а) действительно является трансформатором сопротивлений, так же, как и ДТС на БТ [1].

Диапазон изменения входных токов I_1 ограничен максимальным током стока первого ПТ ($I_1 \leq I_{с.макс1}$), выходных токов I_2 – максимальным током стока второго ПТ ($I_2 \leq I_{с.макс2}$), а диапазон трансформации токов I_2/I_1 – соотношением (5), причем как в большую, так и в меньшую сторону. Произведем анализ аналогичной ДТС, работающей на основе электрического фактора (рис. 1, б), для которой запишем $I_2 R_2 + U_{зи2} = I_1 R_1 + U_{зи1}$ или

$$I_2 R_2 = I_1 R_1 \left(1 - \frac{\Delta U_{зи}}{I_1 R_1} \right), \quad (8)$$

где

$$\Delta U_{зи} = U_{зи2} - U_{зи1}. \quad (9)$$

На основании (8) запишем формулу

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_2} \left(1 - \frac{\Delta U_{зи}}{I_1 R_1} \right). \quad (10)$$

При выполнении условия $I_1 R_1 \gg \Delta U_{зи}$ получаем

$$\frac{I_2}{I_1} \Big|_{I_1 R_1 \gg \Delta U_{зи}} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (11)$$

Погрешность аппроксимации отношения токов I_2/I_1 определим на основании сравнения соотношений (11) и (10)

$$\delta \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_2/I_1|_{I_1 R_1 \gg \Delta U_{зи}}}{I_2/I_1} - 1 = \frac{1}{\frac{I_1 R_1}{\Delta U_{зи}} - 1}. \quad (12)$$

Поскольку одновременно использовать геометрической фактор нецелесообразно, при идентичных параметрах применяемых ПТ представим необходимую разность напряжений затвористок (9) на основании (2):

$$\Delta U_{зи} = \frac{-U_{зи.отс}}{\sqrt{I_{с.макс}}/I_1} \left(\sqrt{\frac{I_2}{I_1}} - 1 \right). \quad (13)$$

Подставляя (13) в (12), получим погрешность трансформации токов в удобном виде

$$\delta \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{\frac{R_1 \sqrt{I_1 I_{с.макс}}}{-U_{зи.отс} \left(\sqrt{I_2/I_1} - 1 \right)} - 1}. \quad (14)$$

При использовании прежних параметров ПТ ($I_{с.макс} = 9$ мА, $U_{зи.отс} = -3$ В) и ДТС ($I_1 = 1$ мА, $R_1 = 1$ кОм, $I_2 = 9$ мА, $R_2 = R_1 I_1 / I_2 = 111,1$ Ом (11)) погрешность (14) составит $\delta \frac{I_2}{I_1} = -200$ %, а при обратном соотношении токов $I_1 = 9$ мА, $I_2 = 1$ мА, при которых $R_1 = 111,1$ Ом, $R_2 = 1$ кОм, $\delta \frac{I_2}{I_1} \approx -66,7$ %. Как видно из цифровых данных, погрешность (14) слишком велика. В связи с этим трансформация токов за счет электрического фактора не является актуальной, поскольку связь токов с номиналами резисторов в ДТС нелинейна. Однако это не говорит о том, что электрический фактор следует игнорировать. Используя точные формулы (10) и (13), можно трансформировать токи (11) в необходимых пределах, а если применять одинаковые номиналы резисторов $R_1 = R_2$ без трансформации токов $I_1 = I_2$, то погрешность (14) не образуется, так как $\Delta U_{зи} = 0$ (13), а показатели ДТС на ПТ улучшаются. Сопротивление для тока I_1 (6) увеличивается за счет последовательного включения номинала резистора R_1 , а для I_2 (7) – за счет последовательной по току отрицательной обратной связи (ООС) (Z-связь), образуемой резистором R_2 :

$$g_{22(ПТ2)}^* = \frac{I_2}{U_B (1 + S_{(ПТ2)} R_2)}, \quad (15)$$

где $S_{(ПТ2)}$ – крутизна ПТ2, определяемая по формуле [1]

$$S_{(ПТ2)} = \frac{2\sqrt{I_2 I_{с.макс}}}{-U_{зи.отс}}. \quad (16)$$

Формирование термостабильных токов на основе составных униполярных структур

Генераторы стабильного тока (ГСТ) с термостабильным током получают на основе температурного фактора путем включения в цепь истока ПТ резистора R_0 (рис. 2, а), номинал которого согласуют с координатами термостабильной точки (ТСТ) на сток-затворных характеристиках применяемых ПТ.

Координаты ТСТ для сток-затворных характеристик ПТ с каналом n -типа, представляемых в виде квадратической параболы (1), запишем на основании [1]:

$$U_{зи.0} = U_{зи.отс} - \frac{2\beta}{\alpha} = -(U_{зи.отс} + 0,66[\text{В}]); \quad (17)$$

$$I_{с.0} = I_c(U_{зи})|_{U_{зи} = U_{зи.0}} = \left[\frac{2\beta}{\alpha} \right]^2 \frac{I_{с.макс}}{U_{зи.отс}^2} \approx 0,44 \frac{I_{с.макс}}{U_{зи.отс}^2} [\text{В}^{-2}], \quad (18)$$

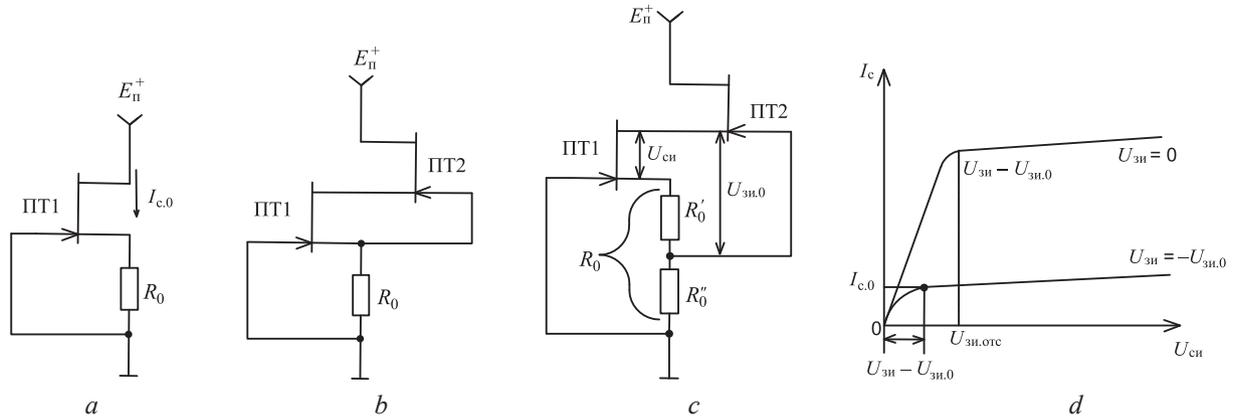


Рис. 2. Полевые транзисторы в режиме термостабильного тока как двухполюсник (а) и составные структуры (b, c) и соответствующие данному режиму выходные характеристики (d)
Fig. 2. Field-effect transistors in the thermostable current mode as a two-terminal network (a) and composite structures (b, c) and output characteristics corresponding to this mode (d)

где β , α – температурные коэффициенты, обусловленные соответственно контактной разностью потенциалов между затвором и каналом и относительной подвижностью носителей заряда в канале с усредненными значениями, $\beta = -2,2$ мВ/°С и $\alpha = \frac{2}{3}$ %/°С [1].

Номинал резистора R_0 (рис. 2, а) определим с применением (17) и (18):

$$R_0 = \frac{-U_{зи.0}}{I_{c.0}} = \frac{-U_{зи.отс}}{I_{c.0}} \left(1 - \sqrt{\frac{I_{c.0}}{I_{c.макс}}} \right). \quad (19)$$

При использовании ПТ с прежними параметрами ($I_{c.макс} = 9$ мА, $U_{зи.отс} = -3$ В) в соответствии с (17)–(19) получаем: $U_{зи.0} = -2,34$ В, $I_{c.0} = 0,44$ мА, $R_0 = 5,32$ кОм. Свойства данного ГСТ, как источника термостабильного тока, целесообразно оценивать по величине реализуемого внутреннего сопротивления, которое определяется по модифицированной для данного случая формуле (15):

$$R_{i.ГСТ}^* = \frac{1}{g_{22}^*} = \frac{U_B}{I_{c.0}} F_0 = \frac{U_B}{I_{c.0}} (1 + S_0 R_0), \quad (20)$$

где F_0 , S_0 – глубина ООС Z-типа, действующей в данной структуре, и крутизна сток-затворной характеристики ПТ в ТСТ соответственно.

Принимая во внимание (17) и (18), на основании (16) получаем:

$$S_0 = S(U_{зи.0}) = \frac{2\sqrt{I_{c.0}I_{c.макс}}}{-U_{зи.отс}} = \frac{I_{c.0}}{-\beta/\alpha} = \frac{I_{c.0}}{0,33[\text{В}]} \approx \frac{3I_{c.0}}{[\text{В}]}. \quad (21)$$

С учетом приведенных выше цифровых данных и напряжения $U_B = 100$ В на основании (20) и (21) получаем $S_0 = 1,33$ мА/В, $F_0 = 8$ и расчетное внутреннее сопротивление термостабильного ГСТ $R_{i.ГСТ} = 1,82$ МОм. Минимальное напряжение питания $E_{п}^+$ относительно общей (заземляющей) шины для данной схемы (рис. 2, а), как видно из характеристик, представленных на рис. 2, d, должно превышать или быть равным $-U_{зи.отс}$:

$$E_{п}^+ = U_{си.мин} + I_{c.0}R_0 = (U_{зи.0} - U_{зи.отс}) - U_{зи.0} \geq -U_{зи.отс}, \quad (22)$$

где $U_{си.мин}$ – минимальное напряжение, действующее между стоком и истоком ПТ:

$$U_{си.мин} \geq U_{зи.0} - U_{зи.отс}. \quad (23)$$

С учетом приведенных цифровых данных напряжения (22) и (23) составляют $E_{п}^+ \geq 3$ В, $U_{си.мин} \geq 0,66$ В. Для улучшения основного параметра ГСТ следует использовать составную

структуру (рис. 2, *b*), в которой в цепи истока ПТ2 вместо резистора R_0 , как в исходной схеме на рис. 2, *a*, будет действовать динамическое внутреннее сопротивление $R_{i,ГСТ}^*$ (20), реализуемое ГСТ на ПТ1 с тем же номиналом резистора R_0 . Расчетное внутреннее сопротивление полученного таким образом ГСТ (рис 2, *b*) может быть определено по модифицированной для данного случая формуле [1]:

$$R_{i,ГСТ2}^* = \frac{1 + \left(\frac{I_{c,0}}{U_B} + \frac{S_0}{1 + R_{i,ГСТ}^* / R_{зи}} \right) R_{i,ГСТ}^*}{I_{c,0} / U_B}. \quad (24)$$

Учитывая ранее полученные цифровые данные параметров, входящие в (24), а также сопротивление затвор-исток применяемых ПТ $R_{зи} = 10$ МОм, искомое расчетное внутреннее сопротивление ГСТ (рис. 2, *b*) $R_{i,ГСТ2}^* = 465,66$ МОм, что примерно в 256 раз больше и лучше, чем в (20) в схеме на рис. 2, *a*. Минимальное напряжение питания схемы ГСТ (рис. 2, *b*) должно быть больше прежнего напряжения питания (22) на напряжение, действующее на резисторе R_0 , т. е. на $I_{c,0}R_0 = -U_{зи,0}$:

$$E_{п.2}^+ = -(U_{зи,0} + U_{зи,отс}). \quad (25)$$

Для прежних цифровых данных напряжение (25) составляет $E_{п.2}^+ \geq 5,34$ В. При таких условиях напряжение, действующее между стоком и истоком ПТ1, составит $U_{си(ПТ1)} = -U_{зи,0(ПТ2)} = 2,34$ В, что больше допустимого напряжения (23) ПТ1 ($U_{си,мин} \geq 0,66$ В), и это является более выгодным режимом работы последнего. Отмеченное позволяет при необходимости снизить общее питающее напряжение (25), если отсоединить затвор ПТ2 от истока ПТ1 и подключить его к части сопротивления R_0 , как показано на рис. 2, *c*. При этом следует подобрать номинал верхней части R_0' резистора R_0 так, чтобы напряжение на этой части резистора $U_{R_0'} = I_{c,0}R_0'$ в сумме с минимально допустимым напряжением сток-исток ПТ1 (23) составляло требуемое напряжение $U_{зи,0}$ для ПТ2:

$$I_{c,0}R_0' + U_{си,мин} = -U_{зи,0}. \quad (26)$$

На основании (26) с учетом (23) определяем номинал верхней части резистора R_0

$$R_0' = \frac{-(U_{зи,0} + U_{си,мин})}{I_{c,0}} = \frac{-(2U_{зи,0} - U_{зи,отс})}{I_{c,0}}. \quad (27)$$

С использованием прежних цифровых данных параметров, входящих в (27), получаем $R_0' = 3,818$ кОм с округлением в меньшую сторону до $R_0' = 3,8$ кОм, что желательно для выполнения условия (23). Номинал нижней части резистора R_0 при этом составит $R_0'' = R_0 - R_0' = 1,52$ кОм. Образованное напряжение на нижней части резистора $R_0U_{R_0''} = (-U_{зи,0} - I_{c,0}R_0')$, которое с учетом (26) становится равным $U_{R_0''} = U_{си,мин}$ (23), совместно с напряжением питания верхней части схемы на ПТ2, соответствующим (22), составит напряжение питания всей схемы (рис. 2, *c*):

$$E_{п.3}^+ = U_{си,мин} - U_{зи,отс}. \quad (28)$$

Минимальное напряжение (28), составляющее для прежних цифровых данных $E_{п.3}^+ \geq 3,66$ В, заметно меньше прежнего напряжения питания (25) $E_{п.2}^+ \geq 5,34$ В, что является весьма важным результатом. Что касается расчетного внутреннего сопротивления для данной схемы ГСТ, то оно практически не отличается от (24), так как $R_{i,ГСТ}^+$ (20) существенно превышает сопротивление нижней части R_0'' образцового резистора R_0 и, следовательно, глубина ООС остается прежней. При реализации рассматриваемого ГСТ (рис. 2, *c*) и других (рис. 2, *a*, *b*) как в дискретном, так и в интегральном виде следует особое внимание обращать на точное выполнение общего номинала резистора R_0 , так как от точности его исполнения существенно зависит точность установки формируемого тока $I_{c,0}$ (18). При интегральном исполнении не исключена лазерная подгонка данного номинала, а при дискретном следует в состав резистора R_0 включать многооборотный переменный резистор с той же целью.

Итак, рассмотренные ГСТ (рис. 2, *a–c*), формирующие термостабильные токи $I_{c,0}$, являются весьма эффективными. Но трансформация этих токов как в большую, так и меньшую сторону на основе ДТС на ПТ сопряжена с оговоренными выше трудностями. В связи с этим рассмотрим выполнение данной операции на основе составных биполярно-униполярных структур.

Трансформация термостабильных токов на основе составных биполярно-униполярных структур

Для трансформации термостабильных токов предлагается использовать составные биполярно-униполярные структуры, представленные на рис. 3, состоящие из ГСТ на ПТ1 (рис. 3, *a*) или ПТ1 и ПТ2 (рис. 3, *b*) с резисторами R_0 , формирующие токи $I_{c,0}$, и ДТС на БТ Т1, Т2 с резисторами R_1 и R_2 , трансформирующие исходные токи $I_{c,0}$ в рабочие токи I_2 в нужном соотношении. Введенный ПТ3 (рис. 3, *b*), в истоковой цепи которого находится БТ Т2 с резистором R_2 , реализует термостабильный ток I_2 с исключительно высоким внутренним сопротивлением. В данных структурах термостабильный ток $I_{c,0}$ обеспечивается номиналом резистора R_0 (19) с внутренним сопротивлением (20) $R_{i,ГСТ}^*$ (рис. 3, *a*) или $R_{i,ГСТ2}^*$ (24) (рис. 3, *b*), а его трансформация осуществляется посредством ДТС на БТ в соответствии с [1]:

$$\frac{I_2}{I_{c,0}} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (29)$$

Сопротивления левой ветви структур состоят в основном из динамических сопротивлений $R_{i,ГСТ}^*$ (20) и $R_{i,ГСТ2}^*$ (24) соответственно для схем, представленных на рис. 3, *a, b*, с добавлением номинала резисторов R_1 , которые, как правило, намного меньше указанных динамических сопротивлений ($R_1 \ll R_{i,ГСТ}^* \ll R_{i,ГСТ2}^*$).

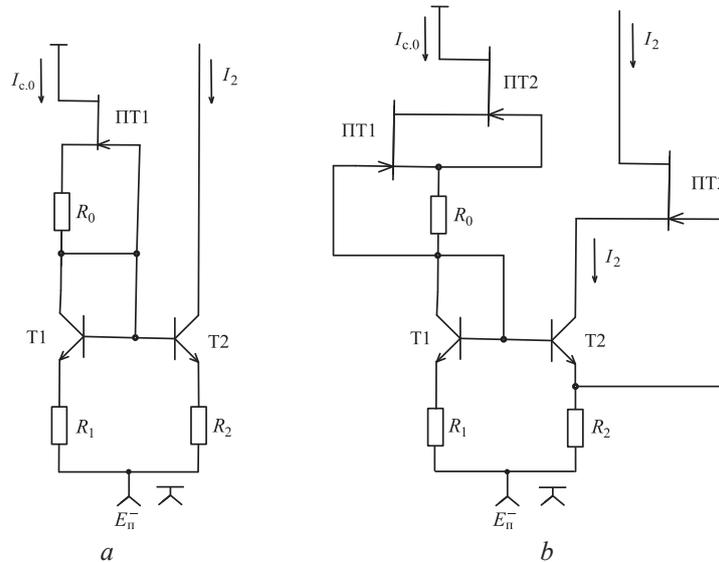


Рис. 3. Биполярно-униполярные структуры с термостабильными токами
Fig. 3. Bipolar-unipolar structures with thermostable currents

Расчетная выходная проводимость транзистора Т2 $h_{22(T2)}^*$ для тока I_2 (рис. 3, *a*) определяется по известной формуле [1], а расчетное внутренне сопротивление генератора тока I_2 на ПТ3 – по модифицированной для данного случая формуле [1]:

$$R_{i,ГСТ(ПТ3)}^* = \frac{1 + \left(\frac{I_2}{U_B} + \frac{S_{(ПТ3)}}{1 + \frac{1}{h_{22(T2)}^* / R_{зи}}} \right) \frac{1}{h_{22(T2)}^*}}{I_2 / U_B}, \quad (30)$$

где $S_{(ПТ3)}$ – крутизна сток-затворной характеристики ПТ3, в точности соответствующая (16).

Минимальное напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ.мин}$ БТ Т2 в схеме (рис. 3, *b*), в точности соответствующее напряжению $U_{зи}$ ПТЗ в рабочей точке, должно составлять, как и для других БТ (рис. 3, *a*), $U_{кэ.мин} \geq 1$ В. И это условие накладывает ограничение на выбор основных параметров ПТЗ, прежде всего на напряжения $U_{зи.отс}$ (рис. 1, *d*). Действительно, если основные параметры ПТЗ взять прежними ($I_{с.макс} = 9$ мА, $U_{зи.отс} = -3$ В) и выбрать ток I_2 , равным десятикратному значению термостабильного тока ($I_2 = 10I_{с0} = 4,4$ мА), то в соответствии с (2) напряжение затвор-исток составит всего $U_{зи} = -0,9$ В, и, следовательно, $U_{кэ.мин} = 0,9$ В, что оказывается недостаточным для эффективной работы БТ Т2 в активном режиме, и это требует изменения основных параметров ПТЗ: $U_{зи.отс}$ или $I_{с.макс}$ (рис. 1, *c, d*). Если выбрать для ПТЗ $U_{зи.отс} = -5$ В при прежнем токе $I_{с.макс} = 9$ мА, то в соответствии с (2) напряжение затвор-исток составит $U_{зи} = -1,5$ В, и БТ Т2 при значении $U_{кэ.мин} = -U_{зи} = 1,5$ В будет чувствовать себя комфортно.

Восполнить недостающее минимальное напряжение $U_{кэ.мин}$ БТ Т2 при прежних параметрах ПТЗ ($U_{зи.отс} = -3$ В, $I_{с.макс} = 9$ мА) возможно, если затвор ПТЗ переместить с эмиттерной цепи БТ Т2 в его базовую цепь. При этом напряжение между коллектором и базой БТ Т2 будет соответствовать требуемому напряжению затвор-исток ПТЗ ($U_{кб(Т2)} = U_{зи} = 0,9$ В), которое совместно с напряжением $U_{бэ} = 0,6$ В составит то же минимальное напряжение $U_{кэ.мин} = U_{кб(Т2)} + U_{бэ} = 0,9 + 0,6 = 1,5$ В. Как видим, такая операция не требует изменения напряжения $U_{зи.отс}$ ПТЗ. Однако при этом несколько изменится в меньшую сторону расчетное внутреннее сопротивление $R_{гст(ПТЗ)}^*$ (30). Но это изменение не будет существенным, поскольку сопротивление прямо смещенного эмиттерного перехода БТ Т2 совместно с номиналом резистора R_2 намного меньше сопротивления коллекторного перехода данного транзистора [1]: $(h_{11(Т2)} + R_2) \ll 1/h_{22(Т2)}$. Для принятого тока $I_2 = 4,4$ мА и $R_2 = 1$ кОм в соответствии с [1] получаем $h_{11(Т2)} = 596,8$ Ом и $1/h_{22(Т2)} = 45,45$ кОм, что является весьма приемлемым.

Принимая во внимание отмеченный режим работы ПТЗ, основные и ранее рассчитанные параметры БТ и ПТ, а также $R_1 = 10$ кОм, определим основные параметры рассматриваемых трансформаторов тока (рис. 3). В соответствии с (29) получаем сопротивление $R_2 = I_{с0}R_1/I_2 = 1$ кОм, расчетную выходную проводимость БТ Т2 [1] $h_{22(Т2)}^* = 2,266 \cdot 10^{-6}$ См, крутизну ПТЗ (16) $S_{(ПТЗ)} = 4,2$ мА/В и внутреннее сопротивление генератора тока I_2 (29) $R_{гст(ПТЗ)}^* = 81,616$ МОм, что примерно в 5,7 раза меньше, чем в составной структуре на ПТ (рис. 2, *b*). При трансформации токов в обратную сторону данное различие приближается к единичному значению.

Рассмотренные отражатели тока (рис. 3) являются исключительно эффективными и могут быть широко использованы при проектировании микроэлектронной аппаратуры. Минимальные питающие напряжения отрицательной полярности, показанные на рис. 3, *a, b*, отличаются от установленных ранее (22) и (25) для схем на рис. 2, *a, b* на сумму напряжений $U_{бэ}$ применяемых БТ и падений напряжений на резисторах R_1 и R_2 при протекании через них соответствующих токов I_1 и I_2 .

Заключение

1. Проанализированы трансформаторы (отражатели) токов на полевых транзисторах с учетом не только геометрического и электрического факторов, но и температурного, весьма эффективного для формирования термостабильных токов на основе составных униполярных структур, позволивших существенно (в 256 раз) улучшить основной параметр (внутреннее сопротивление) получаемых таким образом источников тока.

2. Произведена оптимизация схемного решения генератора стабильного тока на предмет минимизации питающего напряжения, что является исключительно важным достижением для интегральной схемотехники.

3. Для трансформации термостабильных токов предложены и проанализированы оригинальные схемные решения, пригодные для интегрального исполнения, на основе составных биполярно-униполярных структур, позволившие изменить эти токи как в большую, так и в меньшую сторону без заметного ухудшения их основных параметров. Выработаны рекомендации схемного характера при практической реализации данного режима.

Список литературы

1. Свирид, В. Л. Проектирование аналоговых микроэлектронных устройств / В. Л. Свирид. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2010.
2. Наундорф, У. Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование / У. Наундорф. М.: Техносфера, 2008.
3. Шарапов, А. В. Аналоговая схемотехника / А. В. Шарапов. Томск: Томск. гос. ун-т систем управ. и радиоэлек., 2006.
4. Дуркин, В. В. Схемотехника аналоговых устройств / В. В. Дуркин, С. В. Тырыкин, Р. Ю. Белоруцкий // Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2019.

References

1. Svirid V. L. (2010) *Design of Analog Microelectronic Devices*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
2. Naundorf U. (2008) *Analog Electronics. Fundamentals, Calculation, Modeling*. Moscow, Technosphere Publ. (in Russian).
3. Sharapov A. V. (2006) *Analog Circuitry*. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (in Russian).
4. Durkin V. V., Tyrykin S. V., Beloruckij R. Yu. (2019) *Circuitry of Analog Devices*. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University (in Russian).

Сведения об авторе

Свирид В. Л., канд. техн. наук, доц., доц. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 666-28-36
E-mail: kafrtu@bsuir.by
Свирид Владимир Лукич

Information about the author

Svirid V. L., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Radioengineering, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 666-28-36
E-mail: kafrtu@bsuir.by
Svirid Vladimir Lukich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-55-62>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 528.8.04

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ДИСТАНЦИОННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Г. И. ЛИНЕЦ, А. В. БАЖЕНОВ, Н. В. ГРИВЕННАЯ, В. Д. ГОНЧАРОВ

Северо-Кавказский федеральный университет (г. Ставрополь, Российская Федерация)

Поступила в редакцию 26.03.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Дистанционная оценка диэлектрических характеристик земной поверхности востребована для решения различных промышленных задач. В статье рассмотрены теоретические и практические аспекты измерения диэлектрической проницаемости земной поверхности при ее облучении радиосигналом в двухпозиционной системе из беспилотных летательных аппаратов. Требуемая глубина проникновения зондирующего радиосигнала под поверхность достигается использованием UHF-диапазона и наклонным облучением в условиях полного (псевдополного) преломления электромагнитной волны на границе «воздух-поверхность». Новизна предлагаемого подхода заключается в наклонном облучении земной поверхности горизонтально и вертикально поляризованным радиолокационным сигналом с последующей регистрацией амплитуд и фазовых сдвигов осцилляций интерференционных волн и в нахождении угла Брюстера по параметрам интерференционной волны. Практическим применением такого подхода являются измерение влажности сельскохозяйственных почв и определение прочностных характеристик морского льда.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земной поверхности, диэлектрическая проницаемость, угол Брюстера, интерференционная волна.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Коллектив авторов благодарит Агрохолдинг «Степь» (Российская Федерация) за предоставленные для исследования опытные поля.

Для цитирования. Теория и практика дистанционного радиолокационного зондирования земной поверхности / Г. И. Линец [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 55–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-55-62>.

THEORY AND PRACTICE OF REMOTE RADAR PROBING THE EARTH'S SURFACE

GENNADY I. LINETS, ANATOLIY V. BAZHENOV, NATALIA V. GRIVENNAYA,
VLADISLAV D. GONCHAROV

North Caucasus Federal University (Stavropol, Russian Federation)

Submitted 26.03.2024

Abstract. Remote assessment of the dielectric characteristics of the earth's surface is in demand for solving various industrial tasks. The article discusses the theoretical and practical aspects of measuring the dielectric constant of the Earth's surface when it is irradiated with a radio signal in a two-position system from unmanned aerial vehicles. The required depth of penetration of the probing radio signal under the surface is achieved using the UHF band and oblique irradiation under conditions of complete (pseudo-complete) refraction of the electromagnetic wave at the air-surface boundary. The novelty of the proposed approach lies in the oblique irradiation of the Earth's surface with a horizontally and vertically polarized radar signal, followed by registration of amplitudes and phase

shifts of interference wave oscillations, and finding the Brewster angle by the parameters of the interference wave. The practical application of this approach is to measure the moisture content of agricultural soils and determine the strength characteristics of sea ice.

Keywords: remote sensing of the earth's surface, dielectric permittivity, Brewster's angle, interferential wave.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The team of authors thanks Agroholding "Steppe" (Russian Federation) for the experimental fields provided for the study.

For citation. Linets G. I., Bazhenov A. V., Grivennaya N. V., Goncharov V. D. (2024) Theory and Practice of Remote Radar Probing the Earth's Surface. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 55–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-55-62> (in Russian).

Введение

Дистанционная оценка диэлектрических характеристик земной поверхности востребована для решения различных индустриальных задач. Примерами таких задач, рассмотренных в статье, являются измерение влажности сельскохозяйственных почв и определение прочностных характеристик морского льда. При кажущемся отсутствии общности решаемых задач они могут быть сведены к единой теоретической модели дифракции электромагнитных волн на плоскостойких диэлектриках с потерями. Радиолокационное зондирование верхних слоев почвы используется для организации агротехнических работ, определения состава и структурных характеристик геологических разломов, выявления загрязнения почвы солями тяжелых металлов и т. д. [1–6] и основано на извлечении из отраженного сигнала информации, заключенной в изменении амплитуды и фазы, связанном со структурой и диэлектрическими свойствами обследуемой поверхности. Использование бистатической (на двух беспилотных летательных аппаратах (БПЛА)) радарной системы, содержащей передатчик и приемник, которые разделены расстоянием, сравнимым с расстоянием до исследуемой поверхности, обеспечивает требуемую глубину зондирования и увеличение площади обследуемой территории. При этом решается задача оперативного определения комплексной диэлектрической проницаемости (и, следовательно, влажности) почвы не только на поверхности и близком к поверхности слое, но и на глубину расположения корневой системы растений. Высота полета и расстояние между БПЛА определяются необходимостью создания условий для эффекта полного (псевдополного) преломления, или эффекта Брюстера. В этом случае при вертикальной поляризации зондирующего сигнала отражение от границы «воздух-поверхность» будет минимальным, а принятый радиолокационный сигнал будет в большей степени зависеть от диэлектрической проницаемости внутренних (подповерхностных) структур почвы [7].

Материалы и методы исследований

При радиолокационном зондировании диэлектрика, имеющего многослойную структуру, отраженный сигнал представляется в виде суммы нескольких составляющих: попадающей на приемную антенну напрямую, сформированной при отражении от границы раздела «воздух-поверхность», и отражающейся от внутренних слоев диэлектрика. На рис. 1 показано формирование интерференционных волн в плоскостойких средах, представленных областью идеального диэлектрика (воздух, удельная проводимость $\sigma_1 = 0$), областью диэлектрика с электрическими потерями (почва с разной степенью влажности или морской лед, $\sigma_2 \neq 0$) и областью, по своим свойствам близкой к проводящей (область грунтовых вод или морская вода, находящаяся ниже уровня морского льда, удельная проводимость $\sigma_3 \gg \sigma_2$).

На каждой из двух границ происходит отражение и преломление электромагнитных волн, при этом коэффициенты отражения и преломления определяются формулами Френеля [8] в зависимости от углов падения и характеристических сопротивлений граничащих сред

$$\dot{Z}_{ci} = \sqrt{\frac{\mu_{ri}\mu_0}{\epsilon_0\epsilon_{ri} - j(\sigma_i/2\pi f)}}, \quad (1)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ_{ri} – относительная диэлектрическая проницаемость i -й среды; μ_{ri} – относительная магнитная проницаемость i -й среды; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; σ_i – удельная проводимость i -й среды; f – частота радиосигнала.

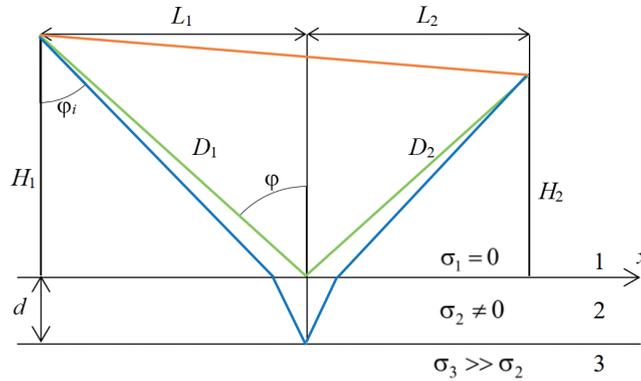


Рис. 1. Формирование интерференционной волны при наклонном облучении земной поверхности
Fig. 1. Generation of interference wave at inclined irradiation of ground surface

На рис. 2 показаны зависимости модуля коэффициентов отражения для вертикально (R_v) и горизонтально (R_h) поляризованных электромагнитных волн для различных свойств граничащих сред.

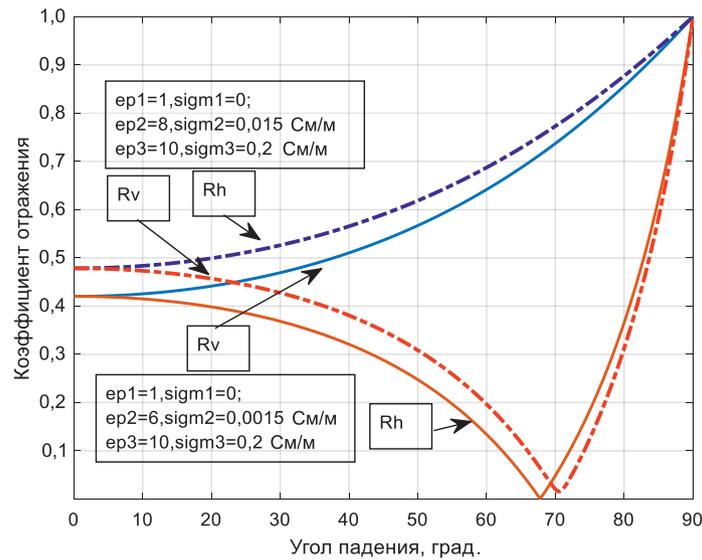


Рис. 2. Зависимости модуля коэффициентов отражения для вертикально (R_v) и горизонтально (R_h) поляризованных электромагнитных волн для различных свойств граничащих сред
Fig. 2. Dependences of the modulus of reflection coefficients for vertically (R_v) and horizontally (R_h) polarized electromagnetic waves for various properties of the adjacent media

Как показано на рис. 2, при вертикальной поляризации зондирующего сигнала существует некоторое значение угла падения (угол Брюстера φ_B), при котором коэффициент отражения равен или близок к нулю. Поскольку значение угла Брюстера определяется диэлектрическими свойствами среды, его измерение позволяет произвести оценку диэлектрической проницаемости второй среды (ϵ_{r2}), например, по формуле [9]:

$$\epsilon_{r2} = (\operatorname{tg}\varphi_B)^2. \quad (2)$$

Новизна предлагаемого подхода заключается в наклонном облучении земной поверхности и в нахождении угла Брюстера по параметрам интерференционной волны, для чего передающее и приемное оборудование радиолокатора размещается на двух различных БПЛА. При этом принимаемая интерференционная волна образуется за счет сложения прямой волны, распространяющейся между передатчиком и приемником в воздухе, волны, отраженной от границы «воздух-поверхность», и суммы парциальных волн, прошедших через границу «воздух-поверхность» и отразившихся от грунтовых вод или морской воды. На рис. 3 показаны графики амплитуд интерференционных волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией в зависимости от угла

падения электромагнитной волны, полученные методом математического моделирования и экспериментально.

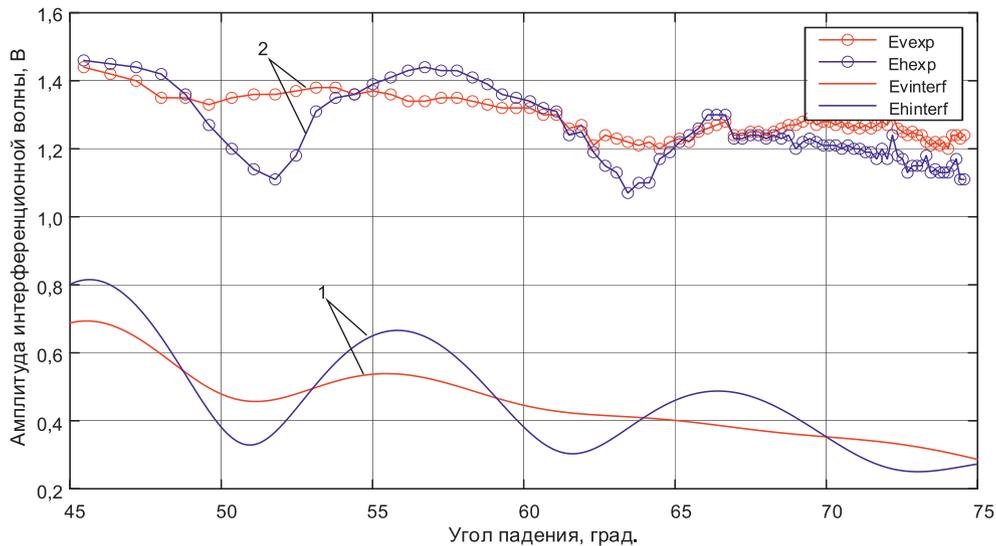


Рис. 3. Теоретические (1) и экспериментальные (2) зависимости амплитуд интерференционных волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией от угла падения электромагнитной волны
Fig. 3. Theoretical (1) and experimental (2) dependences of the amplitudes of interference waves with vertical and horizontal polarization on the angle of incidence of the electromagnetic wave

Теоретические графики на рис. 3 получены с помощью математического моделирования процесса формирования интерференционных волн при условии, что верхний слой почвы является диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r2} = 3,5$ и удельной проводимостью $\sigma_i = 0,015$ См/м (влажная сулинистая почва). При таких условиях угол, при котором вся энергия падающей электромагнитной волны переходит из воздуха в почву (угол Брюстера), составляет $62,2^\circ$. Согласно рис. 3, эффекту полного преломления соответствует уменьшение амплитуды интерференционной волны с вертикальной поляризацией (красная линия), в то же время точное определение угла по графику затруднительно.

На рис. 4 показаны результаты вычисления разности фаз интерференционных волн. Значению фазового сдвига $1,57$ рад. ($\pi/2$), характеризующего эффект Брюстера, соответствует угол $62,9^\circ$, при этом абсолютная ошибка измерения составляет $0,7^\circ$.

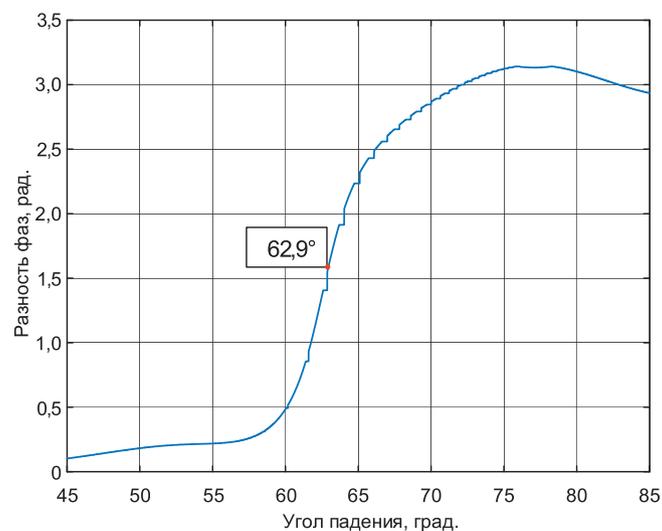


Рис. 4. Разность фаз интерференционных волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией
Fig. 4. Phase difference of interference waves with vertical and horizontal polarization

Результаты исследований и их обсуждение

Практическое применение фазового метода определения диэлектрических характеристик земной поверхности реализовано для осуществления зонирования сельскохозяйственного поля по электропроводности. Зонирование (картирование) выполнено с применением двух сельскохозяйственных БПЛА DJI Agras T16. На рис. 5 показано размещение передатчика бистатической системы на БПЛА, частота зондирующего сигнала 469 МГц. Антенны передатчика и приемника аналогичны, выполнены методом печатного монтажа и позволяют одновременно излучать (принимать) электромагнитные волны вертикальной и горизонтальной поляризации.



Рис. 5. Размещение передатчика вместе с антенной на корпусе беспилотного летательного аппарата
Fig. 5. Placing the transmitter along with the antenna on the body of an unmanned aerial vehicle

На рис. 6 показан полет двух БПЛА во время выполнения измерений. Полет осуществлялся в автоматическом режиме со скоростью 7 м/с на высоте полета обоих БПЛА 3 м с огибанием рельефа на расстоянии 10 м между ними. Измерения проводились один раз в 2 с.



Рис. 6. Полет беспилотного летательного аппарата во время проведения дистанционного зондирования поверхности почвы
Fig. 6. Flight of an unmanned aerial vehicle during remote sensing of the soil surface

Экспериментальные исследования проводились на опытно-производственном поле Агрохолдинга «Степь», расположенном на территории Грачевского района Ставропольского края Российской Федерации, в соответствии с договором о сотрудничестве от 01.08.2023 № Д2023-83/С. Выбор поля обусловлен широким диапазоном свойств неоднородности рельефа, почвенного покрова, засоленности и гранулометрического состава. Поле использовалось в сельскохозяйственном сезоне 2022–2023 гг. для выращивания озимой пшеницы. Общие размеры поля – 74 га, координаты юго-западного участка поля – 45.0448273 (45°2'41,38") СШ; 42.293533 (42°18'17,10") ВД.

Число измерений за один пролет по длине поля равнялось 121. Для сравнения результатов зонирования бистатической системой использовались данные, полученные с помощью аппаратуры электромагнитного профилирования АЭМП-14. При этом осуществлялось усреднение

измеренных значений по трем точкам с учетом координат, полученных с использованием GPS. Общее время выполнения зонирования поля составило 3 ч с учетом замены аккумуляторных батарей БПЛА через каждые 40 мин полета.

На рис. 7 представлены результаты оценки электропроводности почвы фазовым методом (по величине фазового сдвига между интерференционными волнами с вертикальной и горизонтальной поляризацией) по одному из линейных участков на поле, а на рис. 8 – результаты оценки электропроводности почвы аппаратурой электромагнитного профилирования АЭМП-14, выполненной на этом же участке поля с использованием 14 рабочих частот.



Рис. 7. Результаты оценки электропроводности почвы фазовым методом
Fig. 7. Results of evaluation of soil electrical conductivity by phase method

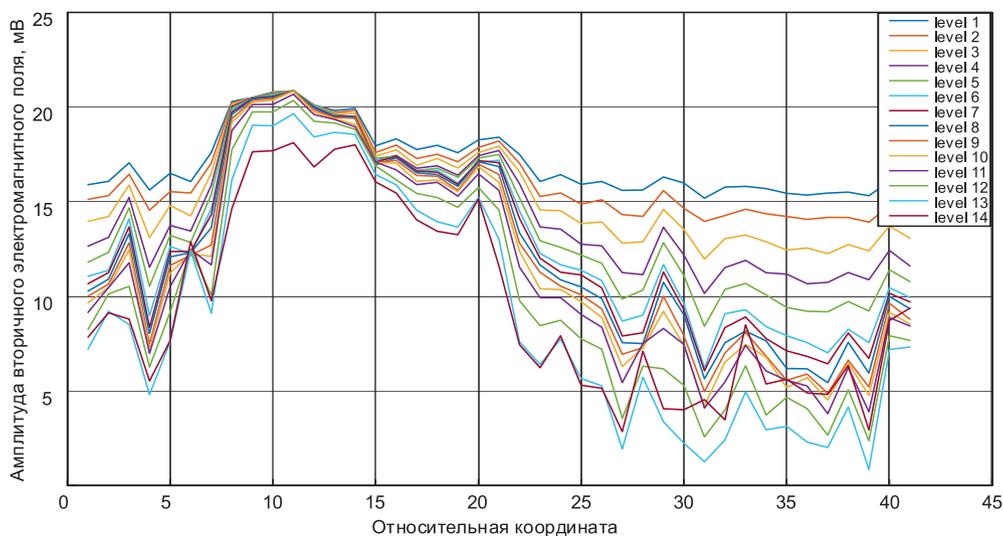


Рис. 8. Результаты оценки электропроводности почвы аппаратурой электромагнитного профилирования АЭМП-14
Fig. 8. Results of soil electrical conductivity assessment using AEMP-14 electromagnetic profiling equipment

На рис. 9 показан график изменения коэффициента корреляции результатов зонирования почвы бистатистической системой для каждой из рабочих частот АЭМП-14.

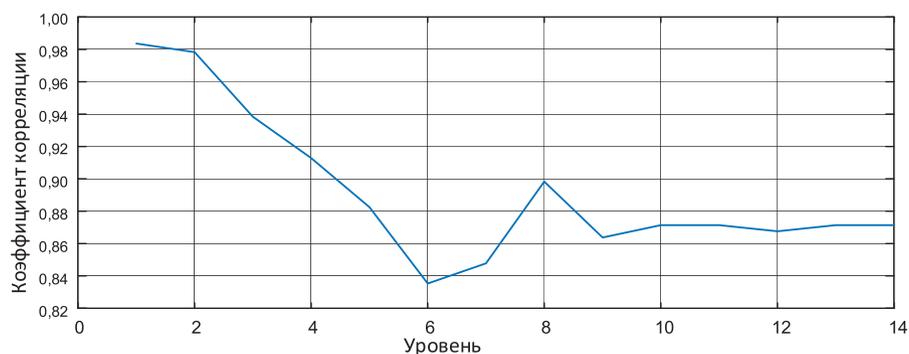


Рис. 9. Коэффициенты корреляции результатов измерений
Fig. 9. Correlation coefficients of measurement results

Заключение

1. Предложенная технология дистанционного зондирования, основанная на использовании наклонного облучения земной поверхности под углом, близким к углу Брюстера, достаточно чувствительна как к поверхностным изменениям удельной проводимости, так и к изменениям, происходящим на глубине до 2 м.

2. Новизна разработанной технологии заключается в использовании фазового сдвига интерференционных волн с вертикальной и горизонтальной поляризацией для измерения угла Брюстера.

3. Коэффициент корреляции результатов зондирования поля с помощью бистатической радиолокационной системы и с помощью АЭМП-14 максимален у поверхности почвы и превышает значение 0,82 до глубины 2,00 м.

4. Дальнейшие исследования предполагается направить на оценку с помощью предложенного подхода толщины и солености морского льда для оптимизации прокладки маршрутов по северному морскому пути.

Список литературы

1. How-Wei, C. Finite-Difference Time-Domain Simulation of GPR Data / C. How-Wei, H. Tai-Min // *Journal of Applied Geophysics*. 1998. Vol. 40, No 13. P. 139–163. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00019-6).
2. Dielectric Constant Determination Using Ground-Penetrating Radar Reflection Coefficients / P. M. Reppert, F. D. Morgan, M. N. Toksöz // *Journal of Applied Geophysics*. 2000. Vol. 43, No 2–4. P. 189–197. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00058-0).
3. Liu, Y. Review of Electromagnetic Waves-Based Distance Measurement Technologies for Remote Monitoring of Civil Engineering Structures / Y. Liu, Y. Bao // *Measurement*. 2021. Vol. 176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109193>.
4. Khmelinin, A. P. Simulation of Electromagnetic High-Frequency Wave Propagation Processes in Multilayer Geo-Structures / A. P. Khmelinin, A. I. Konurin, E. V. Denisova // *Geohazard Mechanics*. 2023. Vol. 1, No 13. P. 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2023.04.001>.
5. Electromagnetic Energy Focusing Technology with GPR Array Transmitting Antenna for High Resolution Detection / W. Jia [et al.] // *Measurement*. 2022. Vol. 203. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112000>.
6. Probabilistic Estimation of Level Ice Resistance on Ships Based on Sea Ice Properties Measured Along Summer Arctic Cruise Paths / Q. Wang [et al.] // *Cold Regions Science and Technology*. 2021. Vol. 189. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103336>.
7. Радиолокационное измерение комплексной относительной диэлектрической проницаемости и объемной влажности почвы / Г. И. Линец [и др.] // Радиолокационные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий: матер. Всерос. конф., посвящ. Дню радио, 2023. С. 79–83.
8. Баскаков, С. И. Электродинамика и распространение радиоволн / С. И. Баскаков. М.: Ленанд, 2023.
9. Bistatic System for Radar Sensing of Soil Moisture / A. Bazhenov [et al.] // *Materials of 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. 2021. Vol. 20. P. 919–925. <http://doi.org/10.22616/22616/ERDev/2021/20/TF207.10>.

References

1. How-Wei C., Tai-Min H. (1998) Finite-Difference Time-Domain Simulation of GPR Data. *Journal of Applied Geophysics*. 40 (13), 139–163. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(98\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(98)00019-6).
2. Reppert P. M., Morgan F. D., Toksöz M. N. (2000) Dielectric Constant Determination Using Ground-Penetrating Radar Reflection Coefficients. *Journal of Applied Geophysics*. 43 (2–4), 189–197. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00058-0](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00058-0).
3. Liu Y., Bao Y. (2021) Review of Electromagnetic Waves-Based Distance Measurement Technologies for Remote Monitoring of Civil Engineering Structures. *Measurement*. 176. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109193>.
4. Khmelinin A. P., Konurin A. I., Denisova E. V. (2023) Simulation of Electromagnetic High-Frequency Wave Propagation Processes in Multilayer Geo-Structures. *Geohazard Mechanics*. 1 (13), 203–207. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2023.04.001>.
5. Jia W., Wang S., Min S., Zhang Y. (2022) Electromagnetic Energy Focusing Technology with GPR Array Transmitting Antenna for High Resolution Detection. *Measurement*. 203. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112000>.

6. Wang Q., Zong Z., Lu P., Zhang G., Li Z. (2021) Probabilistic Estimation of Level Ice Resistance on Ships Based on Sea Ice Properties Measured Along Summer Arctic Cruise Paths. *Cold Regions Science and Technology*. 189. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103336>.
7. Linets G. I., Bazhenov A. V., Grivennaya N. V., Goncharov V. D. (2023) Radar Measurement of Complex Relative Permittivity and Volumetric Soil Moisture. *Radioelectronic Devices and Systems for Infocommunication Technologies, Materials of All-Russian Conference Dedicated to Radio Day*. 79–83 (in Russian).
8. Baskakov S. I. (2023) *Electrodynamics and Radio Wave Propagation*. Moscow, Lenand Publ. (in Russian).
9. Bazhenov A., Sagdeev K., Goncharov D., Grivennaya N. (2021) Bistatic System for Radar Sensing of Soil Moisture. *Materials of 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. 20, 1919–1925. <http://doi.org/10.22616/22616/ERDev/2021/20/TF207.10>.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Линец Г. И., д-р техн. наук, проф., зав. каф. инфокоммуникаций Института цифрового развития Северо-Кавказского федерального университета (ИЦР СКФУ)

Баженов А. В., канд. техн. наук, проф., проф. каф. инфокоммуникаций, ИЦР СКФУ

Гривенная Н. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. инфокоммуникаций, ИЦР СКФУ

Гончаров В. Д., мл. науч. сотр. каф. инфокоммуникаций, ИЦР СКФУ

Адрес для корреспонденции

355017, Российская Федерация,
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
Северо-Кавказский федеральный университет
Тел.: +7 8652 95-69-97
E-mail: ngrivennaia@ncfu.ru
Гривенная Наталья Владимировна

Information about the authors

Linets G. I., Dr of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Infocommunications of the Institute of Digital Development of the North Caucasus Federal University (IDD NCFU)

Bazhenov A. V., Cand. of Sci., Professor, Professor at the Department of Infocommunications, IDD NCFU

Grivennaya N. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Infocommunications, IDD NCFU

Goncharov V. D., Junior Researcher at the Department of Infocommunications, IDD NCFU

Address for correspondence

355017, Russian Federation,
Stavropol, Pushkin St., 1
North Caucasus Federal University
Tel.: +7 8652 95-69-97
E-mail: ngrivennaia@ncfu.ru
Grivennaya Natalia Vladimirovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-63-67>

Оригинальная статья
Original paper

UDC 537.811

EVALUATION OF 5G SYSTEMS MICROSTRIP ANTENNAS PERFORMANCE AND APPROACHES FOR SAR REDUCTION OF HUMAN HEAD AT THE FREQUENCY 38 GHz

HISHAM AYAD, REHAB ALHTAB, MAWADA ALZAWI

Al Zawiya University (Az-Zawiya, Libya)

Submitted 11.03.2024

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024

Abstract. 5G systems have many interesting advantages, that's why their popularity around the world is growing rapidly. However, it is necessary to evaluate the potential negative impact of electromagnetic radiation from devices of these systems on human tissue in order to ensure the safety of the health of the human body. The present study was aimed at assessing the degree of exposure of the human head to electromagnetic radiation from a microstrip antenna at millimeter wave frequencies and improving the performance of this antenna to ensure human health safety. During the study, using the CST Studio Suite 2021 software package, the following was done: a microstrip antenna emitting at the frequency of 38 GHz was simulated; the efficiency and performance of the simulated antenna for 5G system devices was assessed; the layers of the human head were designed and simulated to analyze the impact of the simulated antenna radiation on it; the absorption specific rate of radiation energy from the simulated antenna by each layer of the human head was estimated. Based on the results of the study, approaches to reducing the SAR value of the human head were proposed and theoretically justified. These approaches consist of adding various materials to the microstrip antenna as protective barriers.

Keywords: microstrip antenna, electromagnetic waves, specific absorption rate, human head.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Ayad H., Alhtab R., Alzawi M. (2024) Evaluation of 5G Systems Microstrip Antennas Performance and Approaches for SAR Reduction of Human Head at the Frequency 38 GHz. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 63–67. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-63-67>.

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕНН СИСТЕМ 5G И ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА УДЕЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ГОЛОВОЙ ЧЕЛОВЕКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧАСТОТЕ 38 ГГц

Х. АЙАД, Р. АЛЬХТАБ, М. АЛЬЗАВИ

Университет Аль-Завия (г. Эз-Завия, Ливия)

Поступила в редакцию 11.03.2024

Аннотация. Системы 5G обладают множеством преимуществ, поэтому их популярность в мире стремительно растет. Однако необходимо оценить потенциальное негативное воздействие электромагнитного излучения устройств этих систем на ткани человека, чтобы обеспечить безопасность здоровья человеческого организма. Представленное исследование было направлено на оценку степени воздействия электромагнитного излучения микрополосковой антенны на голову человека на частотах миллиметровых волн и улучшение характеристик этой антенны для обеспечения безопасности здоровья человека. В ходе проведения исследования с помощью программного комплекса CST Studio Suite 2021 выполнено следующее: смоделирована микрополосковая антенна, излучающая на частоте 38 ГГц; оценена эффективность и производительность смоделированной антенны для устройств систем 5G; спроектированы и смоделированы слои человеческого головы для анализа воздействия радиации смоделированной антенны на нее; оценены коэффициенты поглощения энергии радиации смоделированной антенны каждым слоем человеческого головы. На основе результатов исследования предложены и теоретически обоснованы подходы к снижению значения SAR человеческого головы. Эти подходы состоят из добавления различных материалов к микрополосковой антенне в качестве защитных барьеров.

лирована микрополосковая антенна, излучающая на частоте 38 ГГц; оценены эффективность и производительность смоделированной антенны для устройств систем 5G; спроектированы и смоделированы слои головы человека для анализа воздействия на нее излучения смоделированной антенны; оценена удельная скорость поглощения энергии излучения антенны каждым слоем головы человека. По результатам исследования предложены и теоретически обоснованы подходы к снижению значения удельной скорости поглощения электромагнитного излучения верхними слоями головы человека. Эти подходы состоят в добавлении в микрополосковую антенну различных материалов в качестве защитных барьеров.

Ключевые слова: микрополосковая антенна, электромагнитные волны, удельный коэффициент поглощения, голова человека.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Айад, Х. Оценка производительности микрополосковых антенн систем 5G и подходы к снижению коэффициента удельного поглощения головой человека электромагнитного излучения на частоте 38 ГГц / Х. Айад, Р. Альхтаб, М. Альзави // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 63–67. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-63-67>.

Introduction

An antenna is defined as a metal device used as a means of radiating and receiving electromagnetic waves, that is, the antenna is the crossing interface between free space and communication devices. The antenna has many applications and types, the most important of which is the Microstrip antenna used in mobile phones [1, 2]. It is a piece of conductive material on an insulating surface, and the insulating surface is installed at ground level so that it supports the entire structure [3]. Microstrip antennas are characterized by their small size, ease of fabrication and analysis, and cheap price [1, 2]. In addition to their radiation properties, they provide greater directivity, higher gain, and greater transmission range with less interference [3]. The electromagnetic waves sent by the antenna are a form of energy that is produced when the electrical charges that make up an atom vibrate. This radiation consists of electrical and magnetic waves that travel at the speed of light. Electromagnetic waves are divided into two types: ionizing waves and non-ionizing waves. The radiated waves emanating from a mobile phone are known as non-ionizing waves (radio), and these radiations show side effects depending on the energy and frequency of these waves [4]. Among these effects is its negative impact on the human body if it is exposed to a high percentage of it, as it penetrates the body's tissues. These harmful effects are classified into short-term and long-term effects [5]. The rate at which radiation is absorbed by body tissues is measured by the specific absorption rate (SAR), which is the time derivative of the energy dissipated per unit mass within the body generated by electromagnetic fields. They are averaged over a sample size as small as 1 or 10 grams of tissue [2, 6, 7].

Experiment method

The project includes several stages, including designing an antenna operating at a frequency of 38 GHz [8–11], evaluating its performance and enhancing it to ensure optimal performance of 5G networks. To design a small rectangular strip antenna, determine the antenna dimensions: antenna width W and antenna length L . In this design, an operating frequency of 38 GHz is used, and the substrate material used is RT/Duriod 5870, which has a dielectrical permittivity (ϵ_r) of 2.33 and a thickness (h) of 0.127 mm. It also has a loss tangent ($\tan\delta$) of 0.0005. The configuration and dimensions of the designed antenna are presented in Fig. 1. The parameters of the designed antenna are shown in Tab. 1.

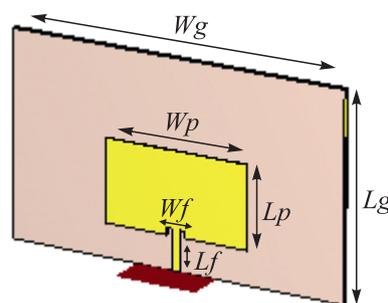


Fig. 1. The configuration and dimensions of the designed antenna

Table 1. The parameters of the designed antenna

Parameter		Value, mm
Ground	Lg	3.2866
	Wg	3.8211
Patch	Lp	2.5246
	Wp	3.0591
Feed line	Lf	1.4093
	Wf	0.3772
Thickness of substrate	h	0.1270
Thickness of copper	t	0.0350

Antenna characteristics [12, 13] were measured to ensure its working quality at a frequency of 38 GHz (Tab. 2).

Table 2. The characteristics of the designed antenna

Frequency, GHz	S-parameter	Voltage standing wave ratio	Directivity, dB	Realized gain, dB	Total efficiency, dB	Radiation efficiency, dB
37.996	-46.042	1.01	8.18	7.268	-0.9148	-0.8806

In addition, the four layers of the human head have been designed [14] and the SAR has been calculated based on the position and dimensions of the head relative to the antenna layers (Fig. 2) and according to the characteristics listed in Tab. 3.

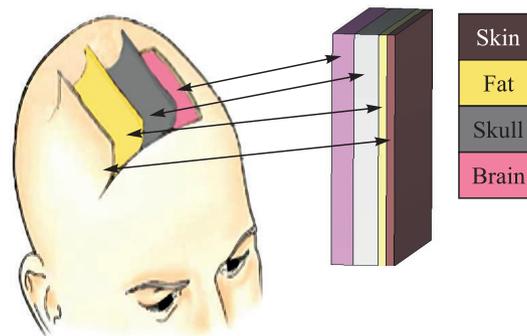


Fig. 2. The designed layers of the human head

Table 3. Characteristics of the designed layers of the human head

Layer	ϵ_r	σ , S/m	$w / m / k$	$w / m^2 / k$	ρ , kg/m ²	Thickness, mm
Skin	12.3	31.0	0.42	9100	1109	1.5
Fat	5.33	6.36	0.25	520	911	1.5
Skull	4.52	5.86	0.40	1000	1908	4.5
Brain	15.10	33.5	0.54	3500	1046	4.0

The antenna has been placed in two ways:

- 1) the antenna patch to be directly in front of the human head;
- 2) the ground layer for antenna to be directly in front of the head.

Then the SAR is calculated in the two locations and at different dimensions, which is 0, 5.0, 15.0, 25.0 mm to know which of the two locations is the least harmful to human health. The final step involves studying the methods for reducing the SAR of the human head. These methods have been based on incorporating different types of absorbing materials as a shield for the high-frequency antenna design (Tab. 4). The SAR was measured to study the extent to which human head absorbs the electromagnetic waves generated by the antenna (per 1 and 10 g of human head tissue). Antenna parameters were measured at each stage to ensure that the antenna was working as required.

Table 4. Properties of the used absorbent materials

Absorbent material	Conductivity, S/m	Relative permittivity	Mass density, kg/m ³
Glass	0	5.5	2500
Air	0	1.0006	1.1614
Aluminium	38 000 000	1.0	2689

Results and its discussion

Results of the SAR calculation for a human head model are presented in Fig. 3, 4.

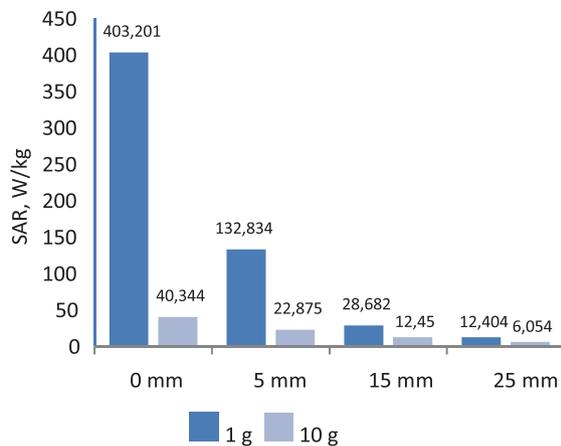


Fig. 3. The SAR percents with antenna patch in front of human head

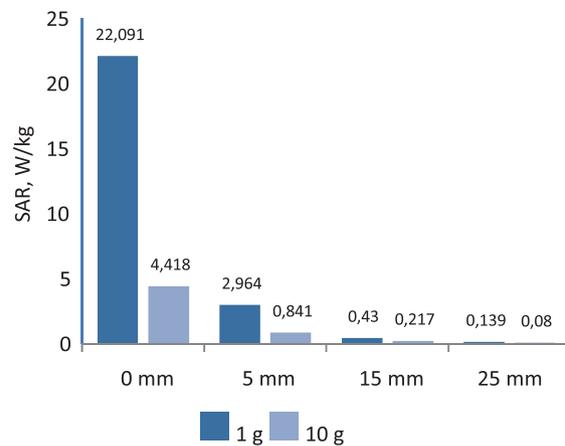


Fig. 4. The SAR percents with antenna ground in front of human head

Therefore, the layer of absorbent material will be added to the ground layer to reduce the rate of absorption of electromagnetic waves by the human head. Accordingly, three absorbent materials (air, glass, aluminium) were chosen and compared between themselves, and then choose the material largest absorption rate of electromagnetic waves. The rate at which the human head absorbs electromagnetic waves decreases. The Tab. 3 shows the properties of the added absorbent materials. The results of the SAR calculation for a human head model after adding the absorbent material to the antenna are presented in Fig. 5, 6.

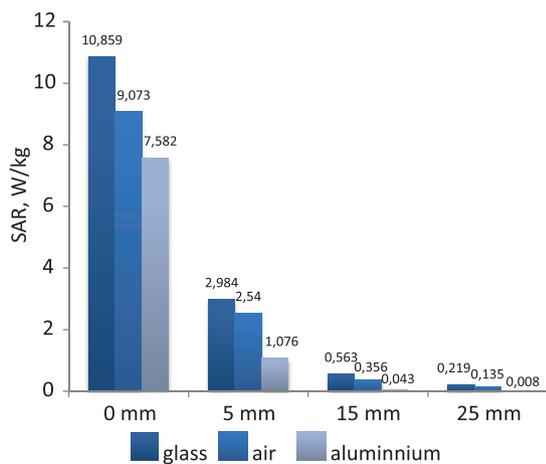


Fig. 5. The SAR percents with absorbent material for 1 g

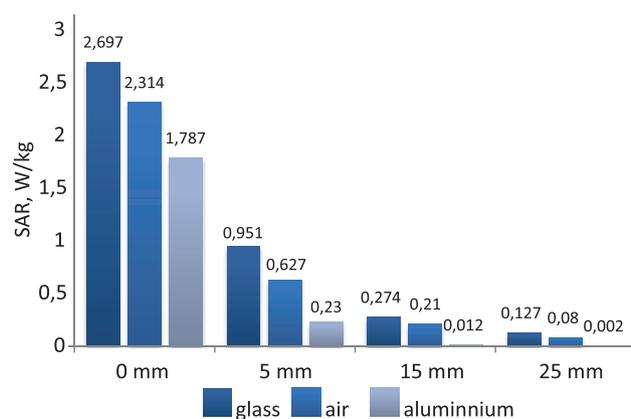


Fig. 6. The SAR percents with absorbent material for 10 g

Conclusion

1. The microstrip antenna is designed to work perfectly at the frequency 38 GHz. As for the SAR values for a mass of 1 and 10 g they depend on the location and dimensions of the human head in relation to the antenna. When the patch is directly front of the human head, the SAR value is higher compared to when the antenna's ground layer is directly front of the human head.

2. Furthermore, when the antenna's ground layer is directly in front of the human head, the SAR values decrease as the distance between the antenna and the human head increases.

3. The SAR values per 1 g of human head decrease by 86.58, 85.49 and 67.67 % when the distance increases from 0 to 5 mm, from 5 to 15 mm, and from 15 to 25 mm, respectively.

4. The SAR values per 10 g of human head decrease by 80.96, 74.19 and 63.13 % when the distance increases from 0 to 5 mm, from 5 to 15 mm, and from 15 to 25 mm, respectively.

5. When adding absorbent materials (air, glass or aluminum) as shields to the front of ground layer of antenna, the SAR values per 1 and 10 g of human head decrease. The simulation results have showed that aluminum has the best reduction in SAR values compared to air and glass. The SAR values decreased at a very significant rate. The SAR rate per 1 g of human head decreased after adding aluminum by 65.67 % at a distance of 0 mm, by 63.69 % at a distance of 5.0 mm, by 90 % at a distance of 15.0 mm, and by 94.2 % at a distance of 25.0 mm.

6. The SAR rate per 10 g of human head decreased after adding aluminum by 59.55 % at a distance of 0 mm, by 72.65 % at a distance of 5.0 mm, by 94.47 % at a distance of 15.0 mm, and by 97.5 % at a distance of 25.0 mm.

References

1. Yazbek K., Hassan A. (2018) *Antennas and Wave Propagation*. Damask, Syrian Virtual University.
2. Yadava R. L. (2022) *Antennas and Wave Propagation*. Delhi, PHI Learning Private Limited.
3. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.* (2018) *Microstrip Patch Antennas* (2nd ed.).
4. Patil V. L. (2021) *Electromagnetic Waves in Communication. Chronological Developments of Wireless Radio Systems before World War II*. Singapore, Springer. 19–32.
5. Zhang M., Alden A. (2011) Calculation of Whole-Body SAR from a 100 MHz Dipole Antenna. *Progress in Electromagnetics Research*. 119, 133–153.
6. Abdul-Al M., Amar A. S., Elfergani I., Littlehales R., Parchin N., Al-Yasir Y., et al. (2022) Wireless Electromagnetic Radiation Assessment Based on the Specific Absorption Rate (SAR): A Review Case Study. *Electronics*. 11 (4).
7. Soh P. J., Vandenbosch G., Wee F. H., van den Bosch A., Martinez-Vazquez M., Schreurs D. (2015) Specific Absorption Rate (SAR) Evaluation of Textile Antennas. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 57 (2), 229–240.
8. Darsono M., Wijaya A. R. (2020) Design and Simulation of a Rectangular Patch Microstrip Antenna for the Frequency of 28 GHz in 5G Technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 1469.
9. Ahmed A. M. (2018) Specific Absorption Rate (SAR) Simulated for Square Patch Antenna of Head Tissues. *Engineering and Technology Journal*. 36 (5), 509–513.
10. Elechi P., John P. (2022) Improved Multiband Rectangular Microstrip Patch Antenna for 5G Application. *Journal of Telecommunication. Electronic and Computer Engineering*. 14 (2), 7–14.
11. Garg R. (2001) *Microstrip Antenna Design Handbook*. Boston MA, Artech House.
12. Volakis J. L. (2007) *Fundamentals of Antennas, Arrays, and Mobile Communications. In Antenna Engineering Handbook*. New York, McGraw-Hill. 13–14.
13. Balanis C. (2005) *Antenna Theory*. Hoboken, New Jersey, Wiley.
14. Dutta P. K., Jayasree P. V. Y., Baba V. S. S. N. S. N. (2016) SAR Reduction in the Modeled Human Head for the Mobile Phone Using Different Material Shields. *Human-Centric Computing and Information Sciences*. 6 (3).

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Information about the authors

Ayad H., PhD, Lecturer of the Electrical Engineering and Electronics Department, Al Zawia University

Alhatab R., Student, Al Zawia University

Alzawi M., Student, Al Zawia University

Address for correspondence

16418, Libya,

Az Zawiyah

Al Zawia University

Tel.: +218 92 740-54-17

E-mail: hishamayadayad@gmail.com

Ayad Hisham



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-68-75>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 618.3-06:004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПЕДАНСОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АМНИОТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

К. Е. МЕШКОВА¹, М. В. ДАВЫДОВ¹, С. В. ПАЦЕЕВ², А. Р. САВЕЙКО¹,
В. В. ПАШКИЛЕВИЧ¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²ООО «Клиника «Мерси» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 26.12.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Представлено моделирование работы аппаратно-программного комплекса для исследования импедансометрической характеристики биологической жидкости. Импедансометрический параметр подсчитан на заранее промоделированной измерительной ячейке с исследуемыми объектами в программе COMSOL Multiphysics. Микрокувета спроектирована согласно стандарту кюветы Литопласт-Мед Тип А 2,5 мл, используемой в дальнейшем для апробации полученных данных моделирования. Результаты исследования могут применяться для дополнительного предупреждения угроз нормального течения беременности и исходов родов. Полученные параметры моделирования использовались для сравнения с результатами экспериментальной апробации.

Ключевые слова: моделирование, амниотическая жидкость, беременность, патология, относительная диэлектрическая проницаемость, емкость измерительной ячейки, биологическая жидкость, микрокувета.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Моделирование и экспериментальная апробация аппаратно-программного комплекса для определения импедансометрических параметров амниотической жидкости / К. Е. Мешкова [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 68–75. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-68-75>.

MODELING AND EXPERIMENTAL APPROBATION OF A HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR DETERMINING THE IMPEDANCE PARAMETERS OF AN AMNIOTIC FLUID

KARINA E. MESHKOVA¹, MAKSIM V. DAVYDOV¹, SERGEY V. PATSEEV²,
ANNA R. SAVEYKO¹, VALERIA V. PASHKILEVICH¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)
²LLC “Mercy “Clinic” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 26.12.2023

Abstract. Simulation of the operation of a hardware-software complex for studying the impedance-metric characteristics of a biological fluid is presented. The impedance-metric parameter was calculated on a previously simulated measuring cell with the objects under study in the COMSOL Multiphysics program. The microcuvette

is designed according to the standard of the Litoplast-Med Type A 2.5 ml cuvette, which is subsequently used to test the modeling results. The results of the study can be used to further prevent threats to the normal course of pregnancy and birth outcomes. The obtained modeling parameters were used for comparison with the results of experimental testing.

Keywords: modeling, amniotic fluid, pregnancy, pathology, relative permittivity, measuring cell capacity, biological fluid, micro-cuvette.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Meshkova K. E., Davydov M. V., Patseev S. V., Saveyko A. R., Paskilevich V. V. (2024) Modeling and Experimental Approbation of a Hardware and Software Complex for Determining the Impedance Parameters of an Amniotic Fluid. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 68–75. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-68-75> (in Russian).

Введение

Околоплодные воды (амниотическая жидкость) – уникальная биологическая среда, отражающая функционирование фетоплацентарного комплекса. По своему составу амниотическая жидкость состоит из обычной воды, протеина, аминокислот, минералов, гормонов, мочи ребенка и др. В околоплодных водах в растворенном виде содержатся кислород и углекислый газ, в них имеются все электролиты, которые присутствуют в крови матери и плода. С химической точки зрения околоплодные воды представляют собой коллоидный раствор сложного химического состава [1].

Анализ амниотической жидкости применяется в медицине для установления концентрации биохимических, гормональных, иммунологических, цитологических и генетических показателей. Известны исследования диэлектрических свойств околоплодных вод человека в зависимости от температуры в диапазоне частот 200 МГц–10 ГГц [2]. Операция по забору вод имеет термин «амниоцентез», который в зависимости от места пункции может быть трансабдоминальным или трансвагинальным.

Исследования импедансных свойств биологических тканей и жидкостей проводились для измерения в основном пассивных электрических свойств тканей на низких частотах, таких как удельная электропроводность и относительная диэлектрическая проницаемость [3]. Определялись параметры активной и емкостной составляющих импеданса биологических тканей. Согласно [4], использовали устройство для измерения активной и реактивной составляющих импеданса. Недостатки схемы – большое количество электродов, что повышало затраты на проведение исследований, и погрешности при измерениях в широком диапазоне частот. Была разработана новая схема измерения с двумя электродами и возможностью отдельного измерения составляющих импеданса [5]. Это позволило измерять активную и реактивную составляющие импеданса в широком диапазоне частот и получать значения с высокой степенью точности за счет использования цифрового фильтра. Работу функциональной схемы протестировали на тканях печени крысы. Также были разработаны способы определения импеданса на границе металлический электрод–биологическая жидкость [6]. Однако сферой применения таких способов является медицинская техника для выбора металла и электродных устройств для медицинских исследований.

В статье представлены результаты исследований емкости измерительной ячейки – микроюветы с электродами в воздушной изолированной среде, заполненной биологической жидкостью. Данная емкость рассматривалась как емкость конденсатора плоского вида. Исследуемая биологическая жидкость выступала в роли диэлектрика. Для выполнения экспериментов применялся подход программного моделирования, что позволило получить общее знание о роли состава биологической жидкости на результаты исследований измерительной ячейки. Показатели экспериментальной апробации сравнивали с результатами моделирования и устанавливали зависимость способа родов от значений емкости измерительной ячейки.

Моделирование измерительной ячейки

В преимущественном составе околоплодные воды являются жидким материалом с взвесью твердых биологических объектов. Для проведения экспериментальной апробации околоплодные воды помещали в специальные резервуары для измерения. Ранее, согласно [7], использовалось

сразу два резервуара – микрокуветы из одинакового материала, но разной конструкции. По результатам измерений выбирали наиболее удобную модель микрокуветы с внутренними полостями для размещения электродов.

Для моделирования и создания методики исследования амниотической жидкости требовалось построить микрокуветы, а также модель биологического объекта (амниотической жидкости) в среде разработки. Так как амниотическая жидкость является уникальной биологической средой, то она не присутствует в базе материалов используемых программ для моделирования. Поэтому в экспериментах использовались жидкости и объекты биологического характера, которые в том или ином количестве входят в околоплодные воды (дистиллированная вода, раствор хлорида натрия, кровь). Модель измерительной ячейки создавалась в программном обеспечении COMSOL Multiphysics®, которое позволяет моделировать и совершать экспресс-анализ во всех областях инженерных, производственных и научных исследований. Построение модели включало действия, которые можно разделить на шаги.

Шаг 1. Моделирование микрокуветы, содержащей структурные блоки. Электроды располагались вплотную к стенкам микрокуветы согласно их размерам, и все помещалось в воздушную изолированную среду. Создание микрокуветы происходило в результате прорисовки основных частей – эскизов – с дальнейшим их выдавливанием операцией Boss Extrude в программе SolidWorks. Для корректного построения эскизы определялись заданием размеров, необходимых для прорисовки. На рис. 1 показан образец микрокуветы, смоделированный в программе (размеры – в миллиметрах).

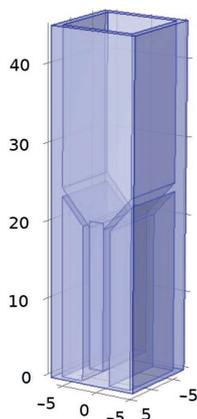


Рис. 1. Модель микрокуветы
Fig. 1. Cuvette models

Электроды моделировались вплотную к стенкам микрокуветы внешним типом расположения по отношению к внутренним стенкам: высота электродов составляла 20,0 мм, длина – 10,0 мм, ширина – 0,5 мм. Расположение электродов изображено на рис. 2.

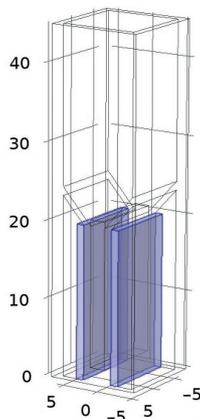


Рис. 2. Модель микрокуветы с электродами
Fig. 2. Cuvette models with electrodes

Модель исследуемых объектов задавалась в виде параллелепипеда высотой 19 мм, длиной 10 мм и шириной 2 мм. Воздушная изолированная среда строилась в виде цилиндра радиусом 20 мм, высотой 50 мм, типом заполнения Solid.

Шаг 2. Задание материала электрода, параметров его относительной диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости в соответствии с рабочей частотой 100 кГц, которая считается наилучшей по результатам ранее проведенных исследований. Это подтверждается наименьшим положительным разбросом значений тангенса угла, т. е. все значения больше нуля и лежат в близком друг для друга диапазоне. Материалом электрода был выбран стеклотекстолит с параметрами относительной диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости, указанными в табл. 1.

Таблица 1. Значения относительной диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости материалов для стеклотекстолита

Table 1. Values of relative dielectric constant and electrical conductivity of materials for fiberglass laminate

Параметр	Стеклотекстолит
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	4,7
Удельная электрическая проводимость σ , См/м	$5,889 \cdot 10^{-7}$

Исследовались следующие биологические объекты и жидкости: кровь, лёгкие, печень, хлорид натрия, вода. Значения удельной электрической проводимости и относительной диэлектрической проницаемости при частоте 100 кГц [8] для перечисленных объектов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения удельной электрической проводимости и относительной диэлектрической проницаемости для исследуемых объектов

Table 2. Values of specific electrical conductivity and relative dielectric constant for the objects under study

Параметр	Кровь	Лёгкие	Печень	Хлорид натрия	Вода
Удельная электрическая проводимость σ , См/м	0,703	0,107	0,0846	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	5120	2580	7500	5,9	84,6

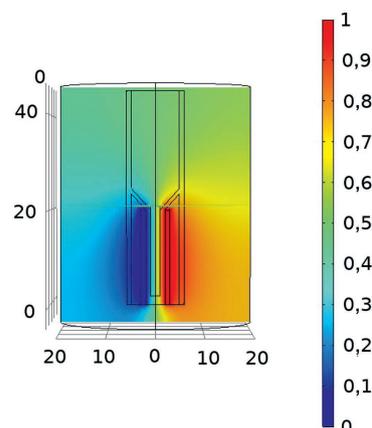
Шаг 3. Выполнялось частотное исследование, задавались параметры для проведения экспериментов. При исследовании значение напряжения источника питания составляло 1 В. Один из электродов служил источником электрического поля, второй – землей. Для экспериментов с частотой 100 кГц добавляли функцию частотной зависимости Frequency Domain.

Шаг 4. Вводили параметр энергии конденсатора как вспомогательный параметр в зависимости от частоты. В программном пакете есть возможность высчитать параметр энергии всей измерительной ячейки. Искомый параметр вычисляли по полученным результатам.

Результаты моделирования

После компиляции программы визуализировался результат распределения и протекания тока, а также напряжения в каждой области. На рис. 3 представлен результат моделирования измерительной ячейки с водой (размеры – в миллиметрах).

Рис. 3. Результат распределения потенциала измерительной ячейки с водой
Fig. 3. The result of the distribution of the potential of the measuring cell with water



После получения скомпилированной работы и вывода результатов энергии измерительной ячейки необходимо оценить емкость [9]. Для этого использовалась формула запаса энергии

$$A = \frac{CU^2}{2}, \quad (1)$$

где A – энергия измерительной ячейки; C – емкость измерительной ячейки с исследуемым объектом; U – разность потенциалов.

Из (1) определяем емкость [8]

$$C = \frac{2A}{U^2}. \quad (2)$$

Рассчитанные значения емкости измерительной ячейки с исследуемым объектом при частоте 100 кГц приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения емкости измерительной ячейки с исследуемым объектом
Table 3. Capacitance values of the measuring cell with the object under study

Частота, кГц	Емкость ячейки, пФ, с объектом				
	Кровь	Лёгкие	Печень	Хлорид натрия	Вода
100	2,328	2,328	2,328	1,103	1,550

Хлорид натрия и вода выступают контрольными жидкостями для сравнения результатов моделирования и апробации. При этом вода – основной компонент состава околоплодных вод. Кровь может присутствовать в амниотической жидкости как в патологии, так и в нормальном состоянии. Показатель емкости системы с кровью – 2,328 пФ, поэтому значения емкости системы с реальными околоплодными водами могут быть в диапазоне от 1,550 до 2,328 пФ. Согласно табл. 3, для трех измерительных ячеек с моделями крови, лёгких и печени значение емкости одинаковое.

Проведение исследований

Для проведения исследований были выполнены предварительная подготовка раствора с околоплодными водами, установка микроюветы с электродами и настройка прибора с целью измерения импедансометрических характеристик. Забор околоплодных вод осуществлялся преимущественно в день проведения исследования или за 12 ч до него. Далее собиралась информация о времени взятия вод, состоянии пациентки и ее диагнозе. Для измерения импедансометрических характеристик использовалась не просто амниотическая жидкость, а раствор околоплодных вод и деионизированной воды, что позволило брать биологический материал в значительно меньшем объеме. Для приготовления раствора использовались объемы деионизированной воды и околоплодных вод соответственно 1,00 и 0,25 мл, которые выбирались согласно необходимому количеству заполненной жидкости микроюветы для получения более точных значений. При смешивании двух жидкостей применялась пробирка Эппендорфа. Electrodes из стеклотекстолита с помощью пайки прикреплялись к монтажному проводу МГТФ (термостойкий монтажный провод с изоляцией из фторопласта) и при проведении исследования фиксировались в полости микроюветы.

Импедансометрические параметры вычислялись с помощью измерительного оборудования МНИПИ Е7-20, которое перед началом работы калибровалось по холостому ходу и короткому замыканию. Калибровка производилась согласно руководству по эксплуатации [10]. Исследования начинали после калибровки прибора. К щупам иммитансометра подключали два электрода, размещенных в полостях заполненной раствором микроюветы. При помощи кнопок на панели управления прибора выставляли частоту 100 кГц, максимальное сопротивление 10 МОм, напряжение смещения 0 В и напряжение измерительного сигнала 1 В. Для записи значений использовалась программа для данной серии иммитансометра с возможностью выполнять все функции стационарного иммитансометра с помощью экрана и кнопок управления. Соединение иммитансометра и персонального компьютера (ноутбука) настраивалось с помощью провода RS232. По разработанному ранее программному обеспечению по считыванию импедансометрических

характеристик производилась автоматическая запись результатов исследований [11]. Затем записанные данные анализировались и строились графики.

Апробация полученных результатов

В исследованиях проводились измерения емкости измерительной ячейки с деионизированной водой, хлоридом натрия и 31 экземпляром околоплодных вод. Первые две жидкости использовались для сравнения значений с результатами моделирования. В процессе экспериментов получены значения емкости измерительной ячейки с водой 1,770 пФ и хлоридом натрия 1,390 пФ. Результаты немного превышают показатели, полученные при моделировании. Данное различие можно объяснить проведением исследований в не идеальной воздушной среде и погрешностью прибора для измерения.

Околоплодные воды отличаются по внешнему виду, вязкости, времени взятия, способу родов (естественный/кесарево сечение). С целью наглядного представления результатов исследований на рис. 4 построен график емкости измерительной ячейки с околоплодными водами при естественном способе родов и кесаревом сечении. Для построения графика посчитано количество вод с необходимым признаком; вычислены среднее значение, стандартное отклонение, минимум, максимум, квартиль 1, квартиль 3, медиана. Для нижнего контура высчитана разность медианы и квартиля 1, для верхнего – разность квартиля 3 и медианы. Чтобы узнать точность результатов, определяли верхний и нижний пороги погрешности. Желтой точкой на рис. 4 обозначены средние значения для каждого способа получения околоплодных вод.

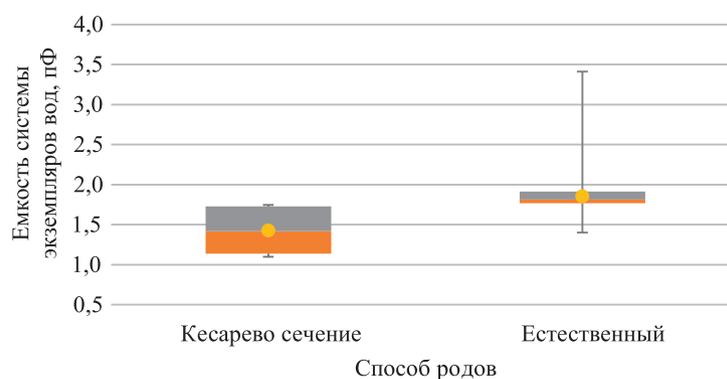


Рис. 4. Результат апробации полученных показателей
Fig. 4. The result of testing the obtained indicators

Согласно рис. 4, видна разница в показателях емкости измерительной ячейки при водах, полученных при кесаревом сечении и естественных родах: диапазон емкости для естественного процесса родов – 1,769–1,913 пФ, для кесарева сечения – 1,137–1,728 пФ. Пересечение значений, полученных при кесаревом сечении и естественных родах, минимальное для некоторых экземпляров вод. Основные же диапазоны не пересекаются.

Заключение

1. Проведено исследование по получению импедансометрических характеристик околоплодных вод в электрическом поле. Построена модель измерительной ячейки. Модель состоит из эскизов микрокуветы с полостями для электродов, электродов из стеклотекстолита, различных жидкостей и объектов и воздушной изолированной среды. Проведен программный расчет энергии измерительной ячейки с исследуемыми объектами и высчитаны значения емкости ячейки для каждого объекта при частоте 100 кГц.

2. Анализ значений емкости измерительной ячейки для контрольных жидкостей (вода и хлорид натрия) показал небольшое отличие в результатах моделирования и экспериментальной апробации. Это объясняется погрешностью при проведении исследований и прибора.

3. Согласно результатам программы и вычисленному параметру, емкость измерительной ячейки для моделей околоплодных вод и вод, полученных при естественных родах, лежит в од-

ном диапазоне. Отсюда можно судить о некоторой степени зависимости способа родов и значений емкости измерительной ячейки с околоплодными водами: чем меньше значение емкости измерительной ячейки, тем более вероятно кесарево сечение, и наоборот.

Список литературы

1. Мочалова, М. Н. Роль состава околоплодных вод в структуре перинатальной патологии / М. Н. Мочалова, В. А. Мудров, А. А. Мудров // Журнал акушерства и женских болезней. 2019. Т. 68, № 2. С. 95–108. DOI: 10.17816/JOWD68295-108.
2. Dielectric Properties of Human Placenta, Umbilical Cord and Amniotic Fluid / A. Peyman [et al.] // *Physics in Medicine and Biology*. 2011. No 56. P. 93–98. DOI: 10.1088/0031-9155/56/7/N01.
3. Ибрагимов, Р. Ш. Исследование пассивных электрических свойств биологических тканей на низких частотах / Р. Ш. Ибрагимов. Красноярск: Ин-т биофиз. Сиб. отд. Рос. акад. наук, 1992.
4. Устройство для измерения активной и емкостной составляющих импеданса биологических тканей: пат. 2196504 Рос. Федерации, МПК А 61 В 5/053 / А. В. Ефремов, Р. Р. Ибрагимов, Р. А. Манвелиадзе, В. Т. Леонтьев, К. Г. Булатецкий, Г. Г. Колонда, Е. В. Тарасов, Р. Ш. Ибрагимов; Новосибир. гос. мед. акад., № 2000117324/14. Заявл. 28.06.2000. Оpubл. 20.01.2003.
5. Устройство для измерения импеданса биологических тканей: пат. 2366360 Рос. Федерации, МПК Ф61И 5/053 / С. А. Образцов, С. Д. Леонов, Ю. В. Троицкий, Г. Н. Федоров; Смоленск. гос. мед. ун-т, № 2008110270/14. Заявл. 17.03.2008. Оpubл. 10.09.2009. Бюл. № 25.
6. Способ определения импеданса границы раздела металлический электрод-биологическая жидкость: пат. 2408875 Рос. Федерации, МПК G01N 27/07 / Р. Р. Ибрагимов, Е. П. Ромашкина, А. В. Марченко, Р. Ш. Ибрагимов; Новосибир. гос. мед. ун-т, № 2009126323/28. Заявл. 08.07.2009. Оpubл. 10.01.2011. Бюл. № 1.
7. Программная модель системы для анализа импедансометрических характеристик биологических жидкостей / К. Е. Мешкова [и др.] // *Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 8–9 декабря 2022 г.* Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2022. С. 93–97.
8. Dielectric Properties [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/>. Дата доступа: 11.08.2023.
9. Ренне, В. Т. Электрические конденсаторы / В. Т. Ренне. Л.: Изд-во «Энергия», Ленингр. отд-е, 1969.
10. Измеритель иммитанса E7-20 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0>. Дата доступа: 07.05.2023.
11. Мешкова, К. Е. Программное обеспечение для чтения данных / К. Е. Мешкова // *Электронные системы и технологии: сб. матер. 59-й Науч. конф. аспирантов и студ. БГУИР, г. Минск, 17–21 апреля 2023 г.* Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2023. С. 1168–1170.

References

1. Mochalova M. N., Mudrov V. A., Mudrov A. A. (2019) The Role of Amniotic Fluid Composition in the Structure of Perinatal Pathology. *Journal of Obstetrics and Women's Diseases*. 68 (2), 95–108. DOI: 10.17816/JOWD68295-108 (in Russian).
2. Peyman A., Gabriel C., Benedickter H. R., Fronlich J. (2011) Dielectric Properties of Human Placenta, Umbilical Cord and Amniotic Fluid. *Physics in Medicine and Biology*. (56), 93–98. DOI: 10.1088/0031-9155/56/7/N01.
3. Ibragimov R. S. (1992) *Investigation of Passive Electrical Properties of Biological Tissues at Low Frequencies*. Krasnoyarsk, Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (in Russian).
4. Efremov A. V., Ibragimov R. R., Manveliadze R. A., Leontiev V. T., Bulatetsky K. G., Kolonda G. G., et al. (2003) Device for Measuring the Active and Capacitive Components of the Impedance of Biological Tissues. *Patent 2196504 Ros. Federation, IPC A 61 B 5/053. Novosibirsk State Medical Academy, No 2000117324/14. Stated 28.06.2000. Publ. 20.01.2003 (in Russian)*.
5. Obraztsov S. A., Leonov S. D., Troitskiy Yu. V., Fedorov G. N. (2009) Device for Measuring the Impedance of Biological Tissues. *Patent 2366360 Ros. Federation, IPC F61I 5/053. Smolensk State Medical University, No 2008110270/14. Stated 17.03.2008. Publ. 10.09.2009. Bull. No 25 (in Russian)*.
6. Ibragimov R. R., Romashkina E. P., Marchenko A. V., Ibragimov R. S. (2011) Method for Determining the Impedance of the Interface Between a Metal Electrode and a Biological Liquid. *Patent 2408875 Ros. Federation, IPC G01N 27/07. Novosibirsk State Medical University, No 2009126323/28. Stated 08.07.2009. Publ. 10.01.2011. Bull. No 1 (in Russian)*.

7. Meshkova K. E., Patseev S. V., Davydov M. V., Saveyko A. R., Pashkilevich V. V. (2022) A Software Model of a System for Analyzing the Impedance Characteristics of Biological Fluids. *Medelectronics–2022. Medical Electronics and New Medical Technologies, Collection of Scientific Articles of the XIII International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 8–9*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 93–97 (in Russian).
8. Dielectric Properties. Available: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties> (Accessed 11 August 2023).
9. Renne V. T. (1969) *Electric Capacitors*. Leningrad, Publishing House “Energia”, Leningrad Branch (in Russian).
10. *Immitance Meter E7-20*. Available: <https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0> (Accessed 7 May 2023). (in Russian).
11. Meshkova K. E. (2023) Software for Reading Data. *Electronic Systems and Technologies, Collection of Materials of the 59th Scientific Conference of Postgraduates, Undergraduates and Students of BSUIR, Minsk, April 17–21*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 1168–1170 (in Russian).

Вклад авторов

Мешкова К. Е. разработала модели кювет, вычислила импедансометрическую характеристику биологических объектов и жидкостей, сформулировала результаты моделирования.

Давыдов М. В. курировал работу, анализировал результаты моделирования.

Пацев С. В. сформулировал ключевые цели и задачи моделирования, консультировал в области медицины.

Савейко А. Р., Пашкилевич В. В. помогли в разработке моделей для исследования в программе COMSOL Multiphysics®.

Authors' contribution

Meshkova K. E. developed cuvette models, calculated the impedance metric characteristic of biological objects and liquids, formulated the simulation results.

Davydov M. V. supervised the work, analyzed the simulation results.

Patseev S. V. formulated the key goals and objectives of modeling, advised in the field of medicine.

Saveyko A. R., Pashkevich V.V. helped in the development of models for research in the COMSOL Multiphysics® program.

Сведения об авторах

Мешкова К. Е., магистрант факультета компьютерного проектирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Давыдов М. В., канд. техн. наук, доц., первый проректор БГУИР

Пацев С. В., врач, ООО «Клиника «Мерси»

Савейко А. Р., студ., БГУИР

Пашкилевич В. В., студ., БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 44 742-00-05
E-mail: davydov-mv@bsuir.by
Давыдов Максим Викторович

Information about the authors

Meshkova K. E., Master's Student at the Faculty of Computer Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Davydov M. V., Cand. of Sci., Associate Professor, First Vice-Rector of the BSUIR

Patseev S. V., Doctor, LLC “Mercy “Clinic”

Saveyko A. R., Student, BSUIR

Pashkevich V. V., Student, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 44 742-00-05
E-mail: davydov-mv@bsuir.by
Davydov Maksim Viktorovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-76-83>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.415.533

МЕРА РАЗЛИЧИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕСТОВ

В. Н. ЯРМОЛИК¹, В. В. ПЕТРОВСКАЯ¹, Н. А. ШЕВЧЕНКО²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Дармштадтский технический университет (г. Дармштадт, Германия)

Поступила в редакцию 05.03.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Исследована задача построения характеристик различия тестовых последовательностей. Обоснованы ее актуальность для генерирования управляемых вероятностных тестов и сложность нахождения мер отличия для символьных тестов. Показана ограниченность применения традиционных характеристик расстояния для получения меры различия тестовых наборов. Для двоичного случая определена новая мера различия $MH(T_i, T_k)$ двух символьных тестовых наборов T_i и T_k на основе классического расстояния Хэмминга. Данная мера представляет собой n компонент, каждая из которых определяется расстоянием Хэмминга между двоичным набором T_i и циклически сдвинутым на ν бит набором T_k . Рассмотрены основные свойства предложенной меры различия и показана ее эффективность для классификации кандидатов в тесты при генерировании управляемых вероятностных тестов. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность меры различия.

Ключевые слова: мера различия, расстояние Хэмминга, расстояние Левенштейна, тест, тестовый набор.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ярмолик, В. Н. Мера различия для управляемых вероятностных тестов / В. Н. Ярмолик, В. В. Петровская, Н. А. Шевченко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-76-83>.

DIFFERENCE MEASURE FOR CONTROLLED RANDOM TESTS

VYACHESLAV N. YARMOLIK¹, VITA V. PETROVSKAYA¹, MIKALAI A. SHAUCHENKA²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Darmstadt Technical University (Darmstadt, Germany)

Submitted 05.03.2024

Abstract. The task of constructing test sequences difference characteristics was studied. Its relevance for generating controlled random tests and complexity in finding difference measures for the case of symbolic tests were substantiated. The limitations of using traditional distance characteristics to obtain a measure of the difference between test sets are shown. For the binary case, a new measure of the difference $MH(T_i, T_k)$ of two character test sets T_i and T_k is defined based on the classical Hamming distance. This measure represents n components, each of which is determined by the Hamming distance between the binary set T_i and the pattern T_k cyclically shifted by ν bits. The main properties of the proposed dissimilarity measure are reviewed and its effectiveness for classifying test candidates when generating controlled random tests is shown. Experimental results are presented that confirm the effectiveness of the proposed difference measure.

Keywords: measure of difference, Hamming distance, Levenshtein distance, test, test pattern.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Yarmolik V. N., Petrovskaya V. V., Shauchenka M. A. (2024) Difference Measure for Controlled Random Tests. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 76–83. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-76-83> (in Russian).

Введение

Классическое определение расстояния Хэмминга предполагает сравнение двух последовательностей $T_i = t_{i,0}, t_{i,1}, \dots, t_{i,n-1}$ и $T_k = t_{k,0}, t_{k,1}, \dots, t_{k,n-1}$, включающих по n символов $t_{i,j}$ и $t_{k,j}$ из произвольного алфавита [1, 2]. Расстояние Хэмминга $H(T_i, T_k)$ между T_i и T_k как количество позиций, в которых $t_{i,j}$ и $t_{k,j}$ различаются, описывается соотношением [1]

$$H(T_i, T_k) = \sum_{j=0}^{n-1} I(t_{i,j} \neq t_{k,j}). \quad (1)$$

Выражение $I(t_{i,j} \neq t_{k,j})$ представляет собой индикаторную функцию, равную единице при $t_{i,j} \neq t_{k,j}$ и нулю в противном случае. Минимальное значение $\min H(T_i, T_k)$ равняется 0 при совпадении всех символов последовательностей T_i и T_k , а максимальное $\max H(T_i, T_k)$ равняется n при несовпадении всех n символов.

Расстояние Хэмминга было разработано для измерения различия двух последовательностей двоичных символов и в основном использовалось для целей помехоустойчивого кодирования [1]. Для случая, когда $t_{i,j}, t_{k,j} \in \{0,1\}$, индикаторная функция $I(t_{i,j} \neq t_{k,j})$ принимает вид арифметического выражения $|t_{i,j} - t_{k,j}|$ или булевой функции $t_{i,j} \oplus t_{k,j}$. Простота и привлекательность этой меры различия предопределили ее применимость для более широкого диапазона практических задач. В первую очередь это касается метода сравнения символьных последовательностей, основанного на их выравнивании (метод редакционного расстояния), и его модификаций [3, 4]. Классическое расстояние Хэмминга обобщалось и модифицировалось с той же целью редактирования (преобразования) исходного графического изображения в целевое изображение [5]. Это расширение, называемое обобщенным расстоянием Хэмминга, рассматривалось для исследования свойств сопряженных (conjugates) последовательностей символов, когда $T_i = G, V, T_k = V, G$, где $G = t_{i,0}, t_{i,1}, \dots, t_{i,l}$, $V = t_{i,l+1}, t_{i,l+2}, \dots, t_{i,n-1}$ [6].

Расстояние Хэмминга как мера различия тестовых наборов широко применяется для формирования управляемых вероятностных тестов [7–9]. Характерной особенностью управляемого генерирования вероятностных тестовых наборов является информация, которая извлекается в виде некоторых характеристик (мер) из ранее сгенерированных тестовых наборов T_0, T_1, \dots, T_{i-1} и используется для формирования следующего набора T_i [7]. Очередной тестовый набор T_i управляемого вероятностного теста формируется максимально удаленным (различным) от ранее сгенерированных наборов T_0, T_1, \dots, T_{i-1} в терминах заранее выбранных мер различия. Основная операция при определении различия между наборами T_i и T_k – операция сравнения их символов с использованием расстояния Хэмминга $H(T_i, T_k)$ [7–9].

Как отмечалось в ряде работ, расстояние Хэмминга является малоэффективной мерой, поскольку позволяет различать лишь полностью совпадающие последовательности при $H(T_i, T_k) = 0$ и все остальные несовпадающие [3]. Примером несовпадающих двоичных наборов могут быть наборы $T_k \in \{00110011, 01010110, 10000100\}$, которые не совпадают с набором $T_i = 11110000$. Действительно, во всех трех случаях имеем одно и то же значение $H(T_i, T_k) = 4$, что свидетельствует об одинаковом различии трех наборов T_k от T_i , хотя последовательности T_k различны, и их структуры существенно отличаются. Приведенный пример показывает необходимость использования более эффективных мер сравнения двоичных последовательностей символов, позволяющих полнее оценивать их различие.

Мера различия двоичных тестовых наборов

Не нарушая общности дальнейшего изложения, предположим, что тестовые наборы T_i и T_k представляют собой двоичные последовательности, т. е. их символы $t_{i,j}, t_{k,j} \in \{0, 1\}$. Основываясь на классическом расстоянии Хэмминга [1] и его обобщениях [6, 10], введем меру различия, соответствующую следующему определению: мера различия $MH(T_i, T_k)$ двоичных тестовых набо-

ров $T_i = t_{i,0}, t_{i,1}, \dots, t_{i,n-1}$, и $T_k = t_{k,0}, t_{k,1}, \dots, t_{k,n-1}$, где $t_{i,j}, t_{k,j} \in \{0, 1\}$, для произвольного целого n состоит из n компонент $MH_0, MH_1, \dots, MH_{n-1}$, формируемых согласно соотношению:

$$MH_v = MH_v(T_i, T_k) = \sum_{j=0}^{n-1} (t_{i,j} \oplus t_{k,(j+v) \bmod n}), v = \overline{0, 1, \dots, (n-1)}. \quad (2)$$

Выражение (2) при $v = 0$ соответствует соотношению (1), используемому для двоичного случая. Для других значений v компоненты меры различия $MH(T_i, T_k)$ определяют расстояния Хэмминга между двоичным набором T_i и циклически сдвинутыми на v бит наборами T_k . В табл. 1 приведены результаты вычисления компонент предложенной меры различия для нескольких пар наборов T_i и T_k разрядностью $n = 8$.

Таблица 1. Значения компонент MH_0, MH_1, \dots, MH_7 меры различия $MH(T_i, T_k)$ для наборов T_i и T_k
Table 1. Values of the difference measure $MH(T_i, T_k)$ components MH_0, MH_1, \dots, MH_7 for patterns T_i and T_k

T_i, T_k	MH_0	MH_1	MH_2	MH_3	MH_4	MH_5	MH_6	MH_7
11110000, 00110011	4	4	4	4	4	4	4	4
11110000, 01010110	4	4	4	2	4	4	4	6
11110000, 10000100	4	6	4	4	4	2	4	4

Как видно из табл. 1, последовательности $T_k \in \{00110011, 01010110, 10000100\}$ имеют различные значения набора компонент меры различия $MH(T_i, T_k)$ по отношению к набору $T_i = 11110000$. Это позволяет более полно соотнести данные наборы с T_i , так как они стали различимыми между собой.

Рассмотрим основные свойства меры различия $MH(T_i, T_k) = MH_0, MH_1, \dots, MH_{n-1}$ для двоичных тестовых наборов $T_i = t_{i,0}, t_{i,1}, \dots, t_{i,n-1}$ и $T_k = t_{k,0}, t_{k,1}, \dots, t_{k,n-1}$ с весами $w_i = w_i(T_i)$ и $w_k = w_k(T_k)$. Весом двоичного вектора является количество в нем единичных символов, соответственно, $0 \leq w_i \leq n$ и $0 \leq w_k \leq n$.

Свойство 1. Первая компонента MH_0 меры различия $MH(T_i, T_k)$ принимает значение в диапазоне

$$|w_i - w_k| \leq MH_0 \leq \begin{cases} w_i + w_k, & \text{если } w_i + w_k \leq n; \\ 2n - (w_i + w_k), & \text{если } w_i + w_k > n. \end{cases} \quad (3)$$

Данное свойство вытекает из определения расстояния Хэмминга для случая двоичных наборов.

Свойство 2. Компоненты $MH_0, MH_1, \dots, MH_{n-1}$ меры различия $MH(T_i, T_k)$ принимают все нечетные либо все четные значения, а величина MH_j отличается от MH_l ($j \neq l$) на $2d$, где d – целое либо ноль.

Доказательство. Согласно определению расстояния Хэмминга, компонента MH_0 принимает произвольное значение от 0 до n , как четное, так и нечетное. Конкретная величина MH_0 зависит от сравниваемых, согласно (1) и (2), наборов символов T_i и T_k и их характеристик, включая w_i и w_k (свойство 1). Остальные компоненты $MH_1, MH_2, \dots, MH_{n-1}$ формируются на основании T_i и циклически сдвинутых на v позиций копий $T_k(v)$ набора T_k . В общем случае обе последовательности бит состоят из перемежающихся наборов серий, состоящих из нулей и единиц. Изменяющееся соотношение этих серий в наборах в результате циклического сдвига приводит к изменению количества их несовпадающих символов.

Оценим влияние серии из единиц на две последующие компоненты MH_v и MH_{v+1} для всевозможных вариантов соотношения двоичных значений в наборах $T_k(v)$ и $T_k(v+1)$. Первоначально исследуем влияние на компоненты $MH(T_i, T_k)$ только одной серии, понимая, что таких серий может быть больше.

Рассмотрим серию единиц $S(v) = s_{c-2}s_{c-1}s_c s_{c+1}s_{c+2} \dots s_{c+b}s_{c+b+1}s_{c+b+2} = 00111\dots 100$ как фрагмент двоичного набора $T_k(v)$ и ее сдвинутую версию $S(v+1) = 000111\dots 10$ для $T_k(v+1)$. Операция сдвига серии единиц $S(v)$ приводит к тому, что только два двоичных символа, связанных с рассматриваемой серией единиц, меняют свои значения на противоположные, а именно: s_c – с единицы на ноль, а s_{c+b+1} – наоборот, с нуля на единицу. Отметим, что двоичные символы a_c и a_{c+b+1} набора T_i в указанных позициях не меняют свои значения. Соответственно, изменение $\Delta MH_{v+1}(S) = MH_{v+1}(S) - MH_v(S)$ значения компоненты MH_{v+1} по отношению к MH_v , за счет сдвига серии единиц $S(v)$ будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta MH_{v+1}(S) &= MH_{v+1}(S) - MH_v(S) = \\ &= (|a_c - s_{c-1}| + |a_{c+b+1} - s_{c+b}|) - (|a_c - s_c| + |a_{c+b+1} - s_{c+b+1}|) = \\ &= (|a_c - 0| + |a_{c+b+1} - 1|) - (|a_c - 1| + |a_{c+b+1} - 0|) = \\ &= (a_c - |a_c - 1|) - (a_{c+b+1} - |a_{c+b+1} - 1|) = A_c - A_{c+b+1}. \end{aligned} \quad (4)$$

В выражении (4) $s_c, s_{c-1}, s_{c+b}, s_{c+b+1}, a_c$ и a_{c+b+1} являются двоичными булевыми переменными, а A_c и A_{c+b+1} – арифметическими, принимающими только два значения: -1 и $+1$. Таким образом, величина $\Delta MH_{v+1}(S)$ в зависимости от a_c и a_{c+b+1} принимает три возможных значения: $-2, 0$ и $+2$. Обобщая полученный результат для MH_v и MH_{v+1} на случай MH_j и MH_l , где $j \neq l \in \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$, можно заключить, что их численные значения будут отличаться на $2d$, где d – целое либо ноль. Тогда в зависимости от того, четное или нечетное значение MH_0 , все остальные компоненты меры различия $MH(T_i, T_k)$ будут принимать соответственно четные или нечетные значения и отличаться друг от друга на величину $2d$.

В качестве иллюстрации рассмотренного свойства в табл. 2 приведены значения $\Delta MH_{v+1}(S)$ изменений компоненты $MH_{v+1}(S)$ по отношению к $MH_v(S)$ для серии из двух единиц в наборе $T_k(v)$ и всевозможных комбинаций значений двоичных переменных a_c и a_{c+b+1} . Одноименные биты наборов T_i и $T_k(v)$, а также T_i и $T_k(v+1)$, участвующие в коррекции $MH_{v+1}(S)$ по отношению к $MH_v(S)$, выделены подчеркиванием.

Таблица 2. Значения изменений $\Delta MH_{v+1}(S)$ компоненты $MH_{v+1}(S)$ меры различия $MH(T_i, T_k)$
Table 2. Values of changes $\Delta MH_{v+1}(S)$ components $MH_{v+1}(S)$ measures of difference $MH(T_i, T_k)$

T_i	00000	0001110	001110	01110	011100
$T_k(v)$	01100	0110000	011000	01100	001100
$MH_v(S)$	2	5	3	1	1
T_i	00000	0001110	001110	01110	011100
$T_k(v+1)$	00110	0011000	001100	00110	000110
$MH_{v+1}(S)$	2	3	1	1	3
$\Delta MH_{v+1}(S)$	0	-2	-2	0	+2

Как видно из табл. 2, во всех случаях изменения компоненты $MH_{v+1}(S)$ по отношению к $MH_v(S)$ соответствуют свойству 2.

Свойство 3. Сумма компонент $MH_0, MH_1, \dots, MH_{n-1}$ меры различия $MH(T_i, T_k)$ равняется $n(w_i + w_k) - 2w_iw_k$.

Доказательство. Предположим, что двоичный набор T_i содержит w_i единиц и $n - w_i$ нулей, а T_k , соответственно, w_k единиц и $n - w_k$ нулей. Каждая из w_i единиц набора T_i совместно с каждым нулевым значением набора T_k порождает единичное слагаемое для одной из сумм (2). Это объясняется циклическими сдвигами T_k , когда каждый символ одного набора только один раз участвует в качестве слагаемого с каждым символом второго набора при вычислении компонент меры различия $MH(T_i, T_k)$. Количество таких ненулевых слагаемых для единичных символов набора T_i равняется $w_i(n - w_k)$. В свою очередь, число подобных слагаемых за счет единиц набора T_k определяется как $w_k(n - w_i)$. Общее количество единичных значений сумм (2), участвующих в определении всех компонент $MH_0, MH_1, \dots, MH_{n-1}$, равняется $w_i(n - w_k) + w_k(n - w_i) = n(w_i + w_k) - 2w_iw_k$.

Например, для $T_i = 11110000$ и $T_k = 10000100$ имеем $w_i = 4$, а $w_k = 2$; соответственно, сумма $MH_0 + MH_1 + MH_2 + MH_3 + MH_4 + MH_5 + MH_6 + MH_7 = 8 \cdot (4 + 2) - 2 \cdot 4 \cdot 2 = 32$. Два рассмотренных двоичных набора и их значения компонент меры различия $MH(T_i, T_k)$ приведены в табл. 1.

Важным выводом свойства 3 является постоянство суммы компонент меры $MH(T_i, T_k)$ для двоичных наборов T_i и T_k с весами w_i и w_k независимо от структуры этих наборов. Различия сравниваемых наборов наблюдается на уровне величин компонент $MH_0, MH_1, \dots, MH_{n-1}$. Как, например, это видно для двух наборов $T_k = 00110011$ и $T_k = 01010110$, которые сравниваются с набором $T_i = 11110000$ (табл. 1).

Сумма компонент меры различия $MH(T_i, T_k)$, определяемая весами w_k и w_i сравниваемых двоичных наборов T_i и T_k , позволяет вычислить среднее значение $MH_{avr} = MH_{avr}(w_i, w_k, n)$ для различного сочетания аргументов w_i, w_k и n

$$MH_{avr} = MH_{avr}(w_i, w_k, n) = \left(\sum_{j=0}^{n-1} MH_j \right) / n = w_i + w_k - \frac{2w_i w_k}{n}. \quad (5)$$

Для $T_i = 11110000$ и $T_k = 10000100$ имеем $MH_{avr} = 4$, аналогичное значение средней величины компонент (5) меры $MH(T_i, T_k)$ будет и в случае двух других пар наборов, приведенных в табл. 1. Это видно из следствия, вытекающего из соотношения (5), заключающегося в том, что если $w_i = n/2$, то для любого четного n , независимо от величины w_k , $MH_{avr} = n/2$.

В табл. 3 приведены примеры значений компонент меры различия $MH(T_i, T_k)$ для $n = 16$, которые соответствуют свойству 3 и его следствию. Действительно, средняя величина $MH_{avr} = n/2 = 8$, так как во всех случаях $w_i = n/2 = 8$.

Таблица 3. Численные значения компонент $MH_0, MH_1, \dots, MH_{15}$ меры различия $MH(T_i, T_k)$
Table 3. Numerical values of the difference measure $MH(T_i, T_k)$ components $MH_0, MH_1, \dots, MH_{15}$

T_i, T_k	$MH_0, MH_1, \dots, MH_{15}$															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0000000011111111 1111111100000000	16	14	12	10	8	6	4	2	0	2	4	6	8	10	12	14
0000000011111111 1111111111111111	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
0011001100110011 1100110011001100	16	8	0	8	16	8	0	8	16	8	0	8	16	8	0	8
0011001100110011 0111111111111110	8	10	8	6	8	10	8	6	8	10	8	6	8	10	8	6
0101010101010101 1010101010101010	16	0	16	0	16	0	16	0	16	0	16	0	16	0	16	0
0101010101010101 0000000000000010	9	7	9	7	9	7	9	7	9	7	9	7	9	7	9	7

Анализ численных величин $MH_0, MH_1, \dots, MH_{15}$ меры различия $MH(T_i, T_k)$ показывает наличие среди них нулевых значений, что является признаком сопряженных последовательностей символов. Действительно, для $T_i = 0000000011111111$, предположив, что $G = 00000000$ и $V = 11111111$, соответственно имеем $T_i = G, V$ и $T_k = V, G$ (табл. 3).

Приведенная мера различия $MH(T_i, T_k)$ позволяет идентифицировать подобие структур сравниваемых наборов по равенству нулю ее компонент. Наличие одного нулевого значения $MH_v = 0$ означает, что T_k является копией набора T_i , циклически сдвинутого на v позиций, т. е. $T_i = T_k(v)$. Для первых двух наборов, представленных в табл. 3, имеем $MH_8 = 0$, что свидетельствует об идентичности T_i и $T_k(8)$. Наличие большего количества нулевых значений MH_v свидетельствует о еще большем подобии сравниваемых наборов, заключающемся в идентичности их составных фрагментов.

Также важным свойством численных значений компонент $MH_0, MH_1, \dots, MH_{n-1}$ меры различия $MH(T_i, T_k)$ является наличие в них периодически повторяющихся значений. Это свидетельствует о периодичности одного из сравниваемых двоичных наборов. Так, в двух последних примерах, приведенных в табл. 3, один из сравниваемых наборов имеет период значений, равный 2, соответственно, и численные значения меры различия повторяются с таким же периодом.

Применение меры различия для формирования управляемых вероятностных тестов

Как отмечалось ранее, сущность управляемых вероятностных тестов заключается в том, что очередной тестовый набор T_i формируется максимально отличающимся от сгенерированных ранее наборов T_0, T_1, \dots, T_{i-1} [7–9]. Для этого на каждом шаге формирования очередного тестового набора осуществляется его выбор из множества кандидатов в тесты. Процедура выбора основана на вычислении численного значения меры различия между наборами T_i и T_k , один из которых, например, первый, является тестовым набором, а другой – одним из кандидатов в тесты. В качестве очередного тестового набора выбирается тот кандидат, для которого величина меры различия принимает максимальное значение. Однако чаще всего этому критерию отвечают несколько кандидатов в тесты, которые являются неразличимыми в рамках используемой меры различия.

В этом случае классическая методика формирования управляемых вероятностных тестов предполагает использование любого из кандидатов в тесты, отвечающего выбранному критерию [7].

Рассмотренная мера различия $MH(T_i, T_k)$ позволяет оценить степень различия двух тестовых наборов T_i и T_k , которые могут быть неразличимыми при использовании других мер различия, например, расстояния Хэмминга. Для подтверждения факта неразличимости тестовых наборов был реализован следующий эксперимент. Для заданного тестового набора T_i , полученного случайным образом, формировалось множество из кандидатов в тесты T_k , которые также генерировались случайным образом по равномерному закону распределения. Затем рассчитывались расстояния Хэмминга $H(T_i, T_k)$ между T_i и всеми тестовыми наборами из списка кандидатов T_k и определялось подмножество кандидатов в тесты, которые имели максимальное значение $H(T_i, T_k) = MH_0$. Отметим, что MH_0 является компонентой предложенной меры различия $MH(T_i, T_k)$. Эксперименты проводились для разных величин разрядности n наборов T_i, T_k и различного количества кандидатов в тесты. В качестве примера в табл. 4 приведены результаты вычисления компонент меры различия $MH(T_i, T_k)$ при $n = 8$. Для набора $T_i = 10000010$ было сформировано 100 кандидатов в тесты T_k , среди которых оказалось восемь наборов T_k с максимальным значением $H(T_i, T_k) = 6$.

Таблица 4. Значения компонент MH_0, MH_1, \dots, MH_7 меры различия $MH(T_i, T_k)$
Table 4. Values of the difference measure $MH(T_i, T_k)$ components MH_0, MH_1, \dots, MH_7

T_k		$T_i = 10000010$			
		MH_0, MH_1, \dots, MH_7	$\Delta MH_v = MH_v - MH_{avr}$	$\Delta MH_1 + \Delta MH_7$	$\Delta MH_2 + \Delta MH_6$
$T_{k,1}$	01101111	6, 4, 6, 6, 4, 6, 4, 4	1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, -1		
$T_{k,2}$	10111101	6, 6, 4, 6, 4, 4, 6, 4	1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, -1		
$T_{k,3}$	11110101	6, 4, 4, 4, 6, 4, 8, 4	1, -1, -1, -1, 1, -1, 3, -1		
$T_{k,4}$	01010101	6, 2, 6, 2, 6, 2, 6, 2	2, -2, 2, -2, 2, -2, 2, -2	-4	
$T_{k,5}$	11111001	6, 4, 4, 4, 4, 6, 6, 6	1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, 1		
$T_{k,6}$	00110101	6, 4, 4, 4, 4, 2, 6, 2	2, 0, 0, 0, 0, -2, 2, -2	-2	2
$T_{k,7}$	11101101	6, 4, 4, 6, 4, 6, 6, 4	1, -1, -1, 1, -1, 1, 1, -1		
$T_{k,8}$	01101001	6, 2, 4, 4, 2, 6, 4, 4	2, -2, 0, 0, -2, 2, 0, 0	-2	0

Соответственно, все восемь кандидатов в тесты оказались неразличимыми по критерию классического расстояния Хэмминга. В то же время значения компонент предложенной меры различия, как это видно из табл. 4, для них существенно разнятся. Анализ кандидатов в тесты, представленных в табл. 4, показывает их различие и по структуре. Наборы $T_{k,1}, T_{k,2}, T_{k,3}, T_{k,5}$ и $T_{k,7}$ имеют значение $w_k = 6$, а $T_{k,4}, T_{k,6}$ и $T_{k,8} - w_k = 4$. Соответственно, в первом случае $MH_{avr} = 5$, а во втором $- MH_{avr} = 4$ (5). Для определения наиболее отличающегося по отношению к $T_i = 10000010$ кандидата в тесты приведем для каждого из них различие $\Delta MH_v = MH_v - MH_{avr}$ компонент меры $MH(T_i, T_k)$ по отношению к их средней величине MH_{avr} . Как видно из табл. 4, максимальное отличие для ΔMH_0 , равное 2, достигается для $T_{k,4}, T_{k,6}$ и $T_{k,8}$. Для дальнейшего уменьшения количества кандидатов в тесты анализируются значения соседних по отношению к ΔMH_0 компонент, а именно: ΔMH_1 и ΔMH_7 (в общем случае ΔMH_{n-1}). Вычисляется их сумма, и по максимальному ее значению определяется тестовый набор. Как видно из табл. 4, максимальное значение $\Delta MH_1 + \Delta MH_7$ достигается для двух наборов $T_{k,6}$ и $T_{k,8}$. Подобная процедура повторяется для ΔMH_2 и ΔMH_6 (в общем случае ΔMH_{n-2}) и т. д. Как видно из рассмотренного в табл. 4 примера, величина $\Delta MH_2 + \Delta MH_6$ позволяет выбрать в качестве тестового набора $T_{k,6} = 00110101$.

Использование компонент MH_1 и MH_{n-1} при неразличимости наборов T_i и T_k по величине MH_0 объясняется их максимальной информативностью о структуре T_k , так как его циклически сдвинутая копия $T_k(1)$ в минимальной мере отличается от оригинала. Очевидно, что для выбора одного из кандидатов в тесты возможно применение и других критериев, основанных на предложенной мере различия.

Эксперимент с формированием тестового набора T_i и списка из 10-ти кандидатов в тесты T_k для $n = 8$ проводился 100 раз. Тестовый набор T_i и кандидаты в тесты T_k генерировались случайным образом по равномерному закону распределения. В каждом эксперименте рассчитывалось значение $H(T_i, T_k) = MH_0$ между T_i и всеми кандидатами. Далее рассматривались только те кандидаты в тесты, для которых MH_0 принимало максимальное значение. Если в списке с максимальным MH_0 оказывалось более одного кандидата, для каждого из них по мере необходимости рас-

считывалось MH_{avr} , вычислялись MH_1, MH_2, \dots, MH_7 , а также ΔMH_ν . Для кандидатов, у которых ΔMH_0 принимает наибольшее значение, рассчитывается сумма $\Delta MH_\nu + \Delta MH_{n-\nu}$, где $\nu = 1, \dots, n/2 - 1$. Итерации в рамках одного эксперимента продолжались до тех пор, пока в списке не оставался один кандидат в тесты или ν не достигало значения $n/2 - 1$. Результаты экспериментов приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты экспериментов с применением меры различия $MH(T_i, T_k)$ для $n = 8$
Table 5. Results of experiments using the difference measure $MH(T_i, T_k)$ for $n = 8$

$H(T_i, T_k)$	$MH(T_i, T_k)$			
	ΔMH_0	$\Delta MH_1 + \Delta MH_7$	$\Delta MH_2 + \Delta MH_6$	$\Delta MH_3 + \Delta MH_5$
61	20	15	3	1

Как видно из табл. 5, в 61 случае из проведенных 100 экспериментов кандидат в тесты был определен по значению расстояния Хэмминга. В остальных случаях использовалась предложенная мера различия $MH(T_i, T_k)$, которая позволила определить набор T_k , наиболее отличающийся от T_i по величине ΔMH_0 в 20 случаях, по значению суммы $\Delta MH_1 + \Delta MH_7$ в 15 экспериментах, а также в 3 и 1 случаях, соответственно, по суммам $\Delta MH_2 + \Delta MH_6$ и $MH_3 + \Delta MH_5$. Результаты аналогичных экспериментов для $n = 16$ и $n = 32$ бит, списков из 100 и 1000 кандидатов соответственно для 1000 итераций приведены в табл. 6, 7.

Таблица 6. Результаты экспериментов с применением меры различия $MH(T_i, T_k)$ для $n = 16$
Table 6. Results of experiments using the difference measure $MH(T_i, T_k)$ for $n = 16$

$H(T_i, T_k)$	$MH(T_i, T_k)$					
	ΔMH_0	$\Delta MH_1 + \Delta MH_{15}$	$\Delta MH_2 + \Delta MH_{14}$	$\Delta MH_3 + \Delta MH_{13}$	$\Delta MH_4 + \Delta MH_{12}$	$\Delta MH_6 + \Delta MH_{11}$
533	208	185	52	12	8	2

Таблица 7. Результаты экспериментов с применением меры различия $MH(T_i, T_k)$ для $n = 32$
Table 7. Results of experiments using the difference measure $MH(T_i, T_k)$ for $n = 32$

$H(T_i, T_k)$	$MH(T_i, T_k)$				
	ΔMH_0	$\Delta MH_1 + \Delta MH_{31}$	$\Delta MH_2 + \Delta MH_{30}$	$\Delta MH_3 + \Delta MH_{29}$	$\Delta MH_4 + \Delta MH_{28}$
542	277	149	27	4	1

Графически в процентном отношении результаты экспериментов для $n = 16$ и $n = 32$ представлены на рис. 1. Как видно из полученных данных, наибольшее количество результативного применения меры различия $MH(T_i, T_k)$ достигалось при анализе ΔMH_0 и $\Delta MH_1 + \Delta MH_{n-1}$, т. е. для $\nu = 0$ и $\nu = 1$.

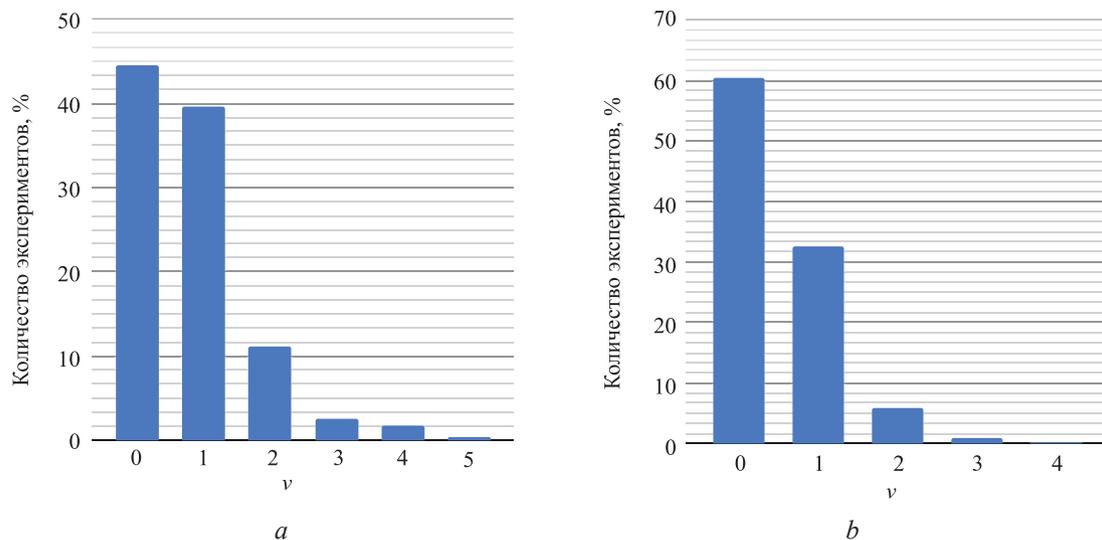


Рис. 1. Результаты экспериментов с применением меры различия $MH(T_i, T_k)$: $a - n = 16$; $b - n = 32$
Fig. 1. Results of experiments using the difference measure $MH(T_i, T_k)$: $a - n = 16$; $b - n = 32$

В исключительных случаях возникает необходимость в классификации кандидатов в тесты на основании предложенной меры различия $MH(T_i, T_k)$ для $v > 3$ (рис. 1), что свидетельствует о ее эффективности и невысокой вычислительной сложности.

Заключение

1. Предложена мера различия для построения управляемых вероятностных тестов, основанная на применении классического расстояния Хэмминга. Показана эффективность ее применения для построения управляемых вероятностных тестов.

2. Дальнейшие исследования целесообразно расширить в части свойств новой меры различия и ее применимости для различных прикладных задач. Наиболее интересным является применение данной меры различия в современных поисковых приложениях с оценкой вычислительной сложности ее получения.

Список литературы / References

1. Hamming R. W. (1950) Error Detecting and Error Correcting Codes. *Bell System Tech. J.* 29, 147–160.
2. Yarmolik V. N., Shevchenko N. A., Petrovskaya V. V. (2022) A Measure of Dissimilarity to Generate Controlled Random Tests. *Doklady BGUIR.* 20 (6), 52–60 (in Russian).
3. Sadvovsky M. G. (2002) Comparison of Symbol Sequences: No Editing, No Alignment. *Open Systems & Information Dynamics.* 9 (1), 19–36.
4. Tannga M. J., Rahman S., Hasniati (2017) Comparative Analysis of Levenshnein Distance Algorithm and Jaro Winkler for Text Document Plagiarism Detection Application. *J. of Technology Research in Information System and Engineering.* 4 (2), 44–54.
5. Bookstein A., Klein S. T., Raita T. (2001) Fuzzy Hamming Distance: A New Dissimilarity Measure. *Proceedings of 12th Annual Symposium on Combinatorial Pattern Matching, CPM2001.* 1–4.
6. Shallit J. (2009) Hamming Distance for Conjugates. *Discrete Mathematics.* 309 (12), 4197–4199.
7. Yarmolik V. N. (2019) *Monitoring and Diagnostics of Computer Systems.* Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
8. Yarmolik V. N., Mrozek I., Yarmolik S. V. (2015) Controlled Method of Random Test Synthesis. *Automatic Control and Computer Sciences.* 49 (6), 395–403.
9. Levantsevich V. A., Yarmolik V. N. (2019) Multiple Controlled Random Testing. *Doklady BGUIR.* 121 (3), 65–69 (in Russian).
10. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Karpov A. P., Yunin A. P. (2019) Conditions for the Correct Calculation of the Entropy of Meaningful Long Passwords in the Hamming Convolution Space with Reference Texts in Russian and English. *Instruments and Methods of Measurement.* 29 (3), 33–38 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Ярмолик В. Н., д-р техн. наук, проф., проф. каф. программного обеспечения информационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Петровская В. В., магистр техн. наук каф. программного обеспечения информационных технологий, БГУИР

Шевченко Н. А., студ., Дармштадтский технический университет

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 769-96-77
E-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Ярмолик Вячеслав Николаевич

Information about the authors

Yarmolik V.N., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Information Technology Software, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Petrovskaya V. V., M. of Sci. at the Department of Information Technology Software, BSUIR

Shauchenka M. A., Student, Darmstadt Technical University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 769-96-77
E-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Yarmolik Vyacheslav Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-84-91>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.7, 621.391

ДВУХУРОВНЕВАЯ МОБИЛЬНАЯ САМООРГАНИЗУЮЩАЯСЯ СЕТЬ С КОМБИНИРОВАННЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ

Т. В. ПОЛУЯН, В. Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 15.04.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Предложен комбинированный метод построения и функционирования двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети, основанный на распределении узлов по транспортному уровню и уровню доступа с переводом их соответственно в одноранговый и инфраструктурный режимы работы. Метод отличается разделением источников нагрузки каждого транспортного узла на два домена коллизий по частоте, что позволяет повысить вероятность успешного случайного доступа к среде передачи. Это приводит к расширению полосы используемых частот в два раза, но уменьшает вероятность потерь кадров и повышает пропускную способность сети с сохранением возможности самоорганизации и масштабирования. Предложенный метод позволяет организовать двухуровневую мобильную самоорганизующуюся сеть с более высокой пропускной способностью по сравнению с одноуровневой, работающей в одноранговом режиме, при одинаковых полосе используемых частот и площади покрытия. Причем эффективность метода растет с увеличением количества узлов доступа, поскольку приводит к уменьшению числа транспортных узлов в канале передачи и вероятности потерь кадров данных.

Ключевые слова: мобильная самоорганизующаяся сеть, вероятность потерь кадров данных, пропускная способность канала передачи данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Полуян, Т. В. Двухуровневая мобильная самоорганизующаяся сеть с комбинированным режимом работы / Т. В. Полуян, В. Ю. Цветков // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-84-91>.

TWO-LEVEL MOBILE SELF-ORGANIZING NETWORK WITH COMBINED OPERATION MODE

TATSIANA V. PALUYAN, VIKTAR YU. TSVIATKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15.04.2024

Abstract. A combined method for constructing and operating a two-level mobile self-organizing network is proposed, based on the distribution of nodes across the transport and access levels, transferring them to peer-to-peer and infrastructure operating modes, respectively. The method is distinguished by dividing the load sources of each transport node into two frequency collision domains, which increases the probability of successful random access to the transmission medium. This leads to a doubling of the used frequency band, but reduces the likelihood of frame loss and increases network throughput while maintaining the ability to self-organize and scale. The proposed method makes it possible to organize a two-level mobile self-organizing network with higher throughput

compared to a single-level one operating in peer-to-peer mode, with the same frequency band and coverage area. Moreover, the effectiveness of the proposed method increases with the increase in the number of access nodes, since it leads to a decrease in the number of transport nodes in the transmission channel and the probability of data frame loss.

Keywords: mobile self-organizing network, probability of data frame loss, data transmission channel capacity.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Paluyan T. V., Tsviatkou V. Yu. (2024) Two-Level Mobile Self-Organizing Network with Combined Operation Mode. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-84-91> (in Russian).

Введение

Мобильные самоорганизующиеся сети (МСОС) – это сети без инфраструктуры, эффективные в условиях сложного развертывания и технического обслуживания (во время стихийных бедствий, военных операций, для обеспечения связи между мобильными устройствами в сложных условиях). В МСОС используются специальные стандарты связи и интеллектуальные технологии, способные масштабироваться на большое расстояние и количество узлов [1–4].

Современные МСОС работают в режиме Ad-Нос (одноранговый метод организации сети), позволяющем узлам связываться напрямую (точка к точке) без использования центрального узла, наличие которого характерно для инфраструктурного метода организации сети. Это упрощает процесс самоорганизации и повышает живучесть мобильной сети (отказ любого узла или произвольной группы узлов не приводит к отказу сети и компенсируется перестройкой маршрутов передачи данных) [1]. Однако с ростом интенсивности нагрузки и количества узлов, не только транслирующих данные соседних узлов, но также отправляющих и получающих собственные данные, быстро повышается вероятность потерь пакетов и падает пропускная способность сети. Известными подходами к уменьшению вероятности потерь пакетов в таких условиях являются повышение скорости передачи и разделение узлов на группы коллизий (в пространстве, по частоте или времени). В обоих случаях это приводит к росту сложности и (или) расширению полосы частот. Кроме того, во втором случае сеть теряет возможность самоорганизации, переходя в инфраструктурный режим. В этой связи исследование сочетания однорангового и инфраструктурного методов организации мобильной сети заслуживает внимания, поскольку позволяет повысить ее пропускную способность с сохранением возможности самоорганизации.

Цель исследований – повышение пропускной способности МСОС за счет комбинирования однорангового и инфраструктурного режимов работы.

Постановка задачи

Рассмотрим передачу кадров данных (канальный уровень модели OSI) через фрагмент МСОС в виде цепочки из N узлов (рис. 1, *a*), работающей в одноранговом режиме. Такая цепочка складывается в результате работы протоколов маршрутизации МСОС и состоит из $N-2$ перекрывающихся звеньев, включающих по три узла: центральный, принимающий и передающий данные от двух пограничных узлов.

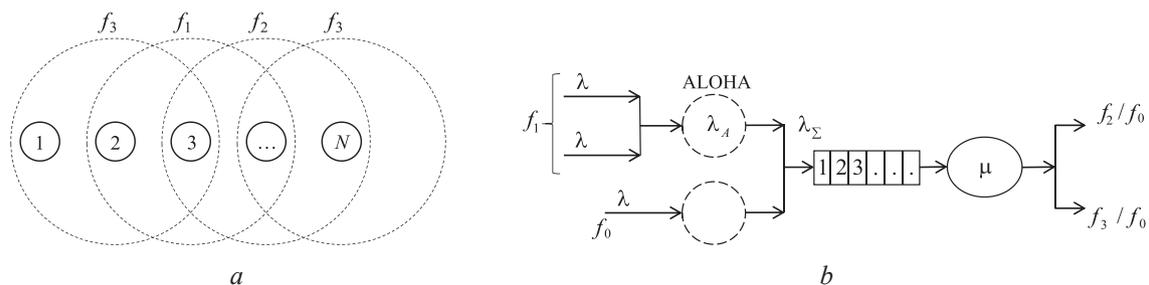


Рис. 1. Мобильные самоорганизующиеся сети в одноранговом режиме:

a – структура сети; *b* – функциональная схема узла

Fig. 1. Mobile self-organizing networks in peer-to-peer mode:

a – network structure; *b* – functional diagram of the unit

Предположим, что узлы МСОС имеют примерно одинаковые мощности передатчиков, чувствительности приемников и располагаются на примерно одинаковом расстоянии друг от друга таким образом, что непосредственная передача кадров данных между пограничными узлами в одном звене невозможна. Для лучшей энергетической развязки между звеньями МСОС вместо одночастотного может использоваться трехчастотный план, предполагающий прием центральным узлом и передачу левым и правым пограничными узлами одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, передачу центральным узлом и прием левым пограничным узлом одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$, передачу центральным узлом и прием правым пограничным узлом одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, где i – порядковый номер узла.

Пусть все узлы МСОС формируют кадры данных на передачу независимо друг от друга, а вероятность передачи кадра в течение любого интервала времени описывается законом Пуассона. В таком случае к звену МСОС применима модель АЛОНА доступа к радиоканалу [5–8], позволяющая определить вероятность потерь кадров и пропускную способность звена сети исходя из известной интенсивности нагрузки λ и средней длительности кадров T . В качестве интенсивности нагрузки λ удобно использовать вероятность поступления кадра данных за интервал T , а в качестве этого интервала – единичную безразмерную величину.

Предположим также, что направления потоков кадров в МСОС случайны, каждый ее узел является источником и получателем собственных данных с интенсивностью λ на виртуальной частоте f_0 , имеет внутреннюю очередь с неограниченным количеством мест ожидания и процессор с достаточной производительностью μ для распределения без задержек по двум направлениям передачи $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}/f_0$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}/f_0$ кадров данных, принимаемых по направлениям $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$, $f_{1+\text{mod}_3(i)}$ и f_0 . В таком случае каждый узел МСОС описывается функциональной моделью, приведенной на рис. 1, *b*, в которой потери кадров связаны только с доменом коллизий, описываемым моделью АЛОНА, а интенсивность λ_Σ суммарной нагрузки вычисляется с помощью выражения

$$\lambda_\Sigma = 1 - (1 - \lambda_A)(1 - \lambda) = \lambda((2 - \lambda)e^{-2\lambda}(1 - \lambda) + 1), \quad (1)$$

где λ_A – интенсивность нагрузки от домена коллизий, описываемого моделью АЛОНА, $\lambda_A = p_0(1 - (1 - \lambda)^2) = \lambda(2 - \lambda)e^{-2\lambda}$; p_0 – вероятность отсутствия коллизии в домене АЛОНА, $p_0 = e^{-2\lambda}$ [5].

С учетом случайного распределения направлений потоков кадров обслуживаемая процессором нагрузка λ_Σ распределяется равномерно по двум направлениям $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}/f_0$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}/f_0$ с интенсивностью $\frac{\lambda_\Sigma}{2} = \frac{\lambda((2 - \lambda)e^{-2\lambda}(1 - \lambda) + 1)}{2}$ по каждому из них. Причем из-за коллизий в домене АЛОНА $\lambda_\Sigma/2 < \lambda$. Следовательно, интенсивности нагрузки на одном входе (от источника) и выходе узла МСОС примерно совпадают, а вероятность P_N потерь кадров и пропускная способность S_N цепочки из N узлов (при условии, что первый узел цепочки является источником кадров, а последний – получателем) вычисляются с помощью выражений:

$$P_N = 1 - e^{-2(N-1)\lambda}; \quad (2)$$

$$S_N = \lambda e^{-2(N-1)\lambda}. \quad (3)$$

На рис. 2 приведены зависимости вероятности потерь кадров P_N и пропускной способности S_N канала передачи данных в МСОС, рассчитанные по выражениям (2) и (3), от интенсивности нагрузки, из которых следует, что даже при незначительном трафике коллизии приводят к быстрому росту потерь кадров и снижению пропускной способности сети. При повышении скорости передачи, например в два раза, $P_{2N} = 1 - e^{-(N-1)\lambda}$ и $S_{2N} = \lambda e^{-(N-1)\lambda}/2$, что приводит, как следует из рис. 2, к незначительному улучшению характеристик сети. Таким образом, для существенного повышения пропускной способности сети при сохранении возможности ее самоорганизации необходим более эффективный подход к уменьшению вероятности потерь кадров. Такой подход может быть реализован за счет разделения узлов на домены коллизий в локальном инфраструктурном режиме работы при использовании однорангового метода для организации сети в целом.

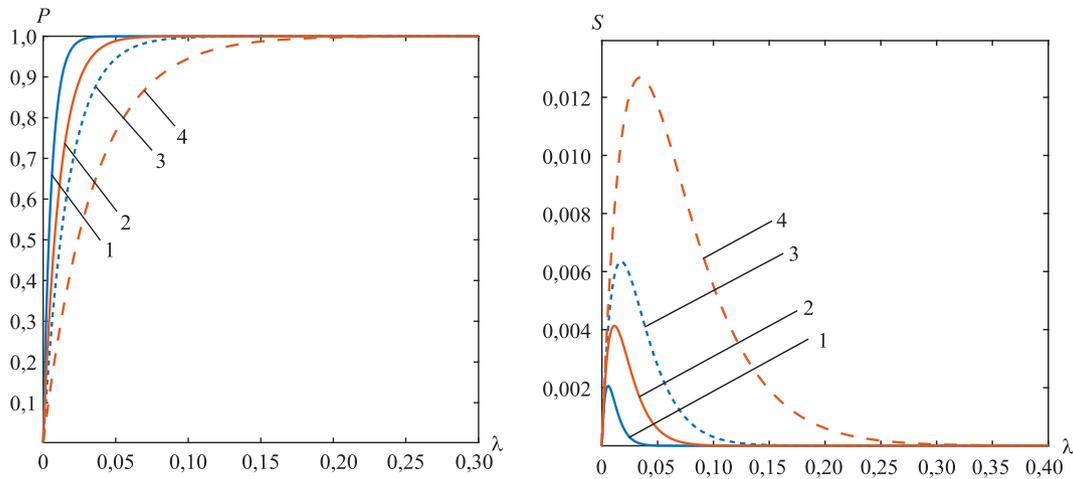


Рис. 2. Зависимость вероятности потерь кадров и пропускной способности канала передачи мобильной самоорганизующейся сети в одноранговом режиме работы от интенсивности нагрузки:

1, 3 – P_N и S_N для 90 и 30 узлов соответственно; 2, 4 – P_{2N} и S_{2N} для 90 и 30 узлов

Fig. 2. Dependence of the probability of frame loss and transmission channel capacity of a mobile self-organizing network in peer-to-peer mode on load intensity:

1, 3 – P_N and S_N for 90 and 30 nodes, respectively; 2, 4 – P_{2N} and S_{2N} for 90 and 30 nodes

Комбинированный метод организации мобильной самоорганизующейся сети

Предлагается комбинированный метод организации двухуровневой МСОС, основанный на распределении узлов по двум уровням (транспортному и доступа) и на использовании соответственно двух режимов работы узлов: однорангового – на верхнем (транспортном) уровне сети и инфраструктурного – на ее нижнем уровне (уровне доступа). Сущность метода заключается в разделении источников нагрузки каждого транспортного узла на два домена коллизий (транспортный и доступа) по частоте, работающих в одноранговом и инфраструктурном режимах, для повышения вероятности успешного случайного доступа к среде передачи, что приводит к расширению полосы используемых частот в два раза, но позволяет уменьшить вероятность потерь кадров и повысить пропускную способность сети с сохранением возможности самоорганизации и масштабирования.

Для обеспечения самоорганизации мобильной сети в комбинированном режиме может использоваться двухчастотный план: одна частота – для транспортного уровня в одноранговом режиме, вторая частота – для уровня доступа в инфраструктурном режиме. С целью улучшения энергетической развязки между звеньями транспортного уровня и доменами коллизий на уровне доступа предлагается применять шестичастотный план, согласно которому узлы транспортного уровня используют трехчастотный план, предполагающий прием центральным узлом и передачу левым и правым пограничными узлами одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, передачу центральным узлом и прием левым пограничным узлом одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$, передачу центральным узлом и прием правым пограничным узлом одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, где i – порядковый номер узла. Узлы уровня доступа также используют трехчастотный план, согласно которому узел уровня доступа выбирает частоту передачи и приема $f_{4+\text{mod}_3(i)}$, если он регистрирует передачу на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$.

Для работы МСОС в комбинированном режиме предлагаются следующие правила самоорганизации.

1. Новый узел сети становится транспортным узлом, если он регистрирует передачу только на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$. В этом случае он переходит в одноранговый режим работы с формированием первого домена коллизий и выбирает для приема частоту $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, а для передачи – частоты $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ или $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$ (на одной из них принимает граничный транспортный узел, к которому подключается рассматриваемый новый узел).

2. Новый узел сети становится узлом доступа, если он регистрирует передачу на двух частотах: $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$. В этом случае он переходит в инфраструктурный режим работы и выбирает для передачи и приема частоту $f_{4+\text{mod}_3(i)}$. По такому же принципу меняются частоты при изменении пространственного положения узла.

3. Транспортный узел, работающий в одноранговом режиме и принимающий на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, переходит дополнительно в локальный инфраструктурный режим с формированием второго домена коллизий, если регистрирует передачу на частоте $f_{4+\text{mod}_3(i)}$.

4. Узел, который не регистрирует передачу на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$, $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, становится первым транспортным узлом сети, принимающим на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$ и передающим на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$.

5. Узел доступа, регистрирующий отсутствие передачи на частоте $f_{4+\text{mod}_3(i)}$ и передачу на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, становится транспортным узлом, восстанавливая топологию сети при увеличении расстояния между транспортными узлами, что обеспечивает масштабирование сети.

Из предложенных правил самоорганизации следует, что транспортный домен коллизий МСОС в комбинированном режиме содержит не более двух источников, обеспечивая высокую пропускную способность транспортного уровня сети и защиту от перегрузок: узлы, регистрирующие передачу на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, в любом количестве становятся узлами доступа и переходят в инфраструктурный режим, занимая частоту $f_{4+\text{mod}_3(i)}$ для передачи и приема (рис. 3).

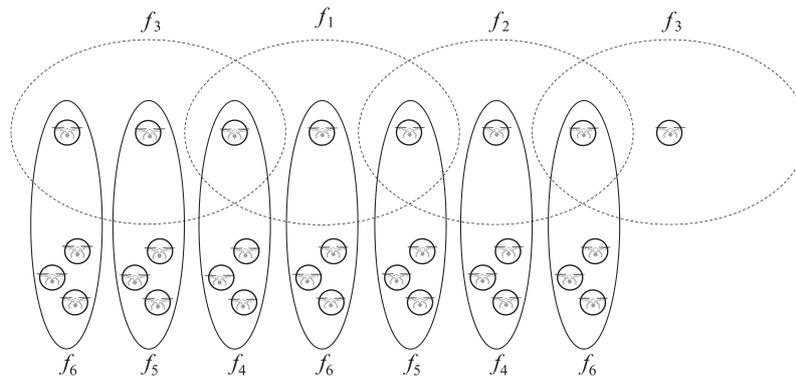


Рис. 3. Структура двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети в комбинированном режиме
Fig. 3. Structure of a two-level mobile self-organizing network in combined mode

Оба домена коллизий двухуровневой МСОС – транспортный и доступа – используют случайный доступ к среде передачи, что позволяет применять для их описания модель АЛОНА (рис. 4).

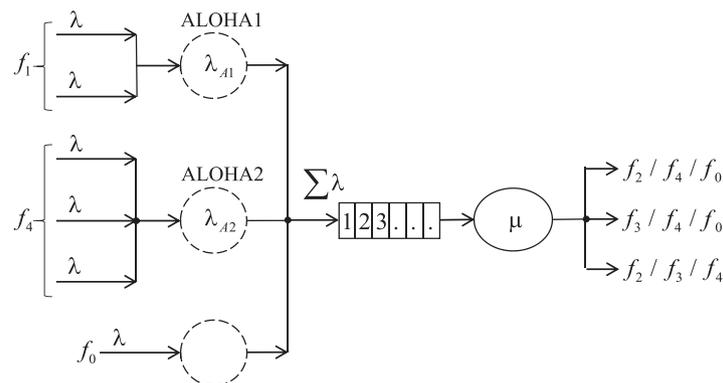


Рис. 4. Функциональная схема транспортного узла двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети
Fig. 4. Functional diagram of a transport node of a two-level mobile self-organizing network

При тех же предположениях, что были сделаны для МСОС в одноранговом режиме (рис. 1–2), интенсивности λ_{TA} и λ_{AA} нагрузки в транспортном домене и домене доступа определяются с помощью выражений:

$$\lambda_{TA} = p_{T0}(1 - (1 - \lambda)^2) = \lambda(2 - \lambda)e^{-2\lambda}; \quad (4)$$

$$\lambda_{AA} = p_{A0}(1 - (1 - \lambda)^m) = e^{-2(1 - (1 - \lambda)^{m-1})}(1 - (1 - \lambda)^m), \quad (5)$$

где p_{T0} – вероятность отсутствия коллизии в транспортном домене, $p_{T0} = e^{-2\lambda}$ [5]; p_{A0} – вероятность отсутствия коллизии в домене доступа, $p_{A0} = e^{-2\lambda_{AC}}$; $\lambda_{AC} = 1 - (1 - \lambda)^{m-1}$; m – количество узлов в домене доступа.

Если источником и получателем кадров данных являются первый и последний транспортные узлы фрагмента МСОС, то вероятность потерь кадров $P_{TN/m}$ и пропускная способность $S_{TN/m}$ цепочки из $N/(m+1)$ транспортных узлов вычисляются с помощью выражений:

$$P_{TN/m} = 1 - e^{-2\left(\frac{N}{m+1}-1\right)\lambda}; \quad (6)$$

$$S_{TN/m} = \lambda e^{-2\left(\frac{N}{m+1}-1\right)\lambda}. \quad (7)$$

Если источником и получателем кадров данных являются узлы доступа, входящие в домены коллизий первого и последнего транспортных узлов фрагмента МСОС, то вероятность потерь кадров $P_{AN/m}$ и пропускная способность $S_{AN/m}$ канала, образованного двумя узлами доступа и $N/(m+1)$ транспортными узлами, вычисляются по формулам:

$$P_{AN/m} = 1 - \left(e^{-2\lambda_{AC}}\right)^2 e^{-2\left(\frac{N}{m+1}-1\right)\lambda}; \quad (8)$$

$$S_{AN/m} = \lambda \left(e^{-2\lambda_{AC}}\right)^2 e^{-2\left(\frac{N}{m+1}-1\right)\lambda}. \quad (9)$$

Оценка эффективности методов организации мобильной самоорганизующейся сети

Произведена оценка вероятностей $P_N, P_{2N}, P_{TN/m}, P_{AN/m}$, потерь кадров и пропускной способности $S_N, S_{2N}, S_{TN/m}, S_{AN/m}$ канала передачи данных МСОС от интенсивности нагрузки в одноранговом, одноранговом с удвоенной скоростью передачи и комбинированном режимах работы при различных значениях N и m (рис. 5, 6). Из рис. 5, 6 следует, что предложенный комбинированный метод организации двухуровневой МСОС по сравнению с обычным одноранговым методом и одноранговым методом с удвоенной скоростью передачи обеспечивает меньшую вероятность потерь кадров в 1,61 и 1,57 раза при $N = 30, m = 9, \lambda = 0,13$; в 1,52 и 1,29 раза – при $N = 30, m = 2, \lambda = 0,06$; в 1,66 и 1,65 раза – при $N = 90, m = 9, \lambda = 0,05$; в 1,59 и 1,36 раза – при $N = 90, m = 2, \lambda = 0,02$ (для случая, когда источник и получатель данных являются узлами доступа). Пропускная способность канала передачи данных при этом увеличивается соответственно в 714 и 17 раз; в 12 и 2,1 раза; в 2927 и 34 раза; в 13,7 и 2,3 раза.

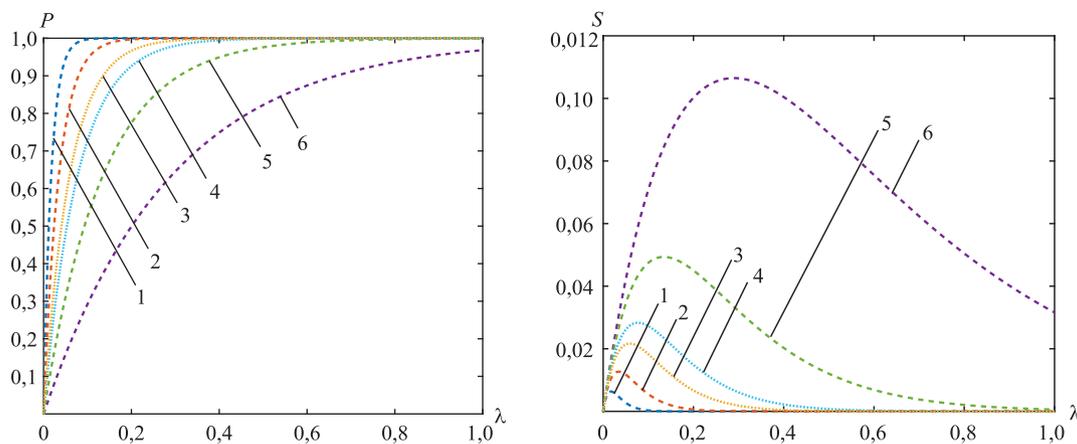


Рис. 5. Зависимость вероятности потерь кадров и пропускной способности канала передачи мобильной самоорганизующейся сети от интенсивности нагрузки при $N = 30$:

1 – P_N, S_N ; 2 – P_{2N}, S_{2N} ; 3, 5 – $P_{AN/m}, S_{AN/m}$ при $m = 2$ и $m = 9$ соответственно;
4, 6 – $P_{TN/m}, S_{TN/m}$ при $m = 2$ и $m = 9$

Fig. 5. Dependence of the probability of frame loss and transmission channel capacity of a mobile self-organizing network on load intensity at $N = 30$: 1 – P_N, S_N ; 2 – P_{2N}, S_{2N} ; 3, 5 – $P_{AN/m}, S_{AN/m}$ for $m = 2$ and $m = 9$, respectively; 4, 6 – $P_{TN/m}, S_{TN/m}$ at $m = 2$ and $m = 9$

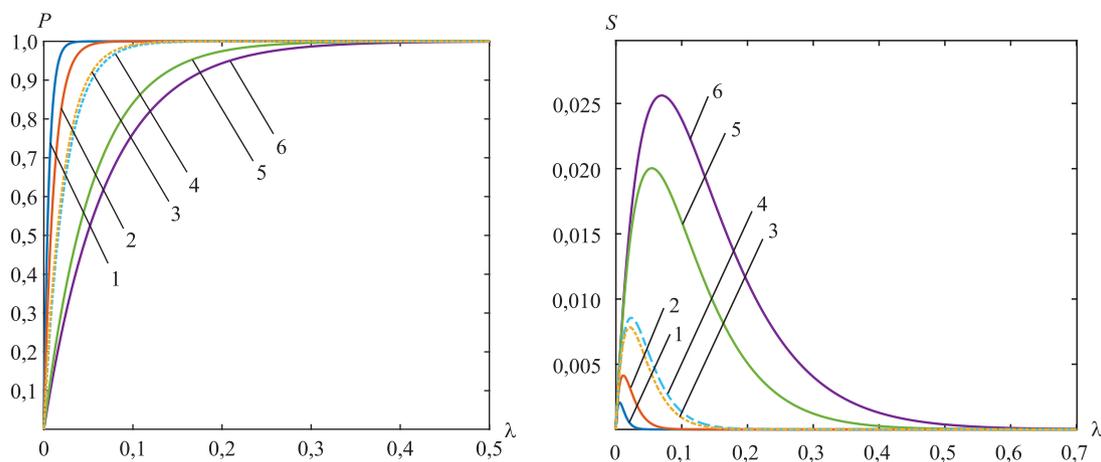


Рис. 6. Зависимость вероятности потерь кадров и пропускной способности канала передачи мобильной самоорганизующейся сети от интенсивности нагрузки при $N = 90$: 1–6 – то же, что на рис. 5

Fig. 6. Dependence of the probability of frame loss and transmission channel capacity of a mobile self-organizing network on load intensity at $N = 90$: 1–6 – the same as in Fig. 5

Заключение

1. Установлено, что в мобильной самоорганизующейся сети с одноранговым режимом работы вероятность потерь кадров быстро растет с увеличением количества транспортных узлов в канале передачи данных между отправителем и получателем, что приводит к снижению его пропускной способности.

2. Разделение нагрузки на два частотных домена коллизий в соответствии с предложенным комбинированным методом организации двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети позволяет снизить вероятность потерь кадров, повысить пропускную способность канала передачи данных и является более эффективным подходом по сравнению с увеличением скорости передачи в методе одноранговой организации мобильной самоорганизующейся сети, также расширяющим полосу используемых частот. Причем эффективность предложенного метода растет с увеличением количества узлов доступа, поскольку приводит к уменьшению количества транспортных узлов в канале передачи данных.

3. Предложенный метод позволяет организовать двухуровневую мобильную самоорганизующуюся сеть с более высокой пропускной способностью по сравнению с одноуровневой мобильной самоорганизующейся сетью, работающей в одноранговом режиме, при одинаковых полосе используемых частот и площади покрытия.

Список литературы

1. Dynamic Channel Selections and Performance Analysis for High-Speed Train WiFi Network / F. Xuming [et al.] // International Workshop on High Mobility Wireless Communications. 2015. DOI: 10.1109/HMWC.2015.7353350.
2. Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: IEEE Standard for Information Technology 802.11–2020. Date of access: 14.12.2016.
3. Hirioo, S. End-to-End Throughput and Delay Analysis for IEEE 802.11 String Topology Multi-Hop Network Using Markov-Chain Model / S. Hirioo, S. Kosuke, K. Nobuyoshi // IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. 2015. DOI: 10.1109/PIMRC.2015.7343572.
4. Jayalakshmi, V. Study of Clustering Schemes in Mobile Ad hoc Networks / V. Jayalakshmi, R. Sarumathi // 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems. 2022. DOI: 10.1109/ICICCS53718.2022.9788134.
5. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл; 5-е изд. СПб.: Питер, 2012.
6. Степанов, С. Н. Теория телеграфика: концепции, модели, приложения / С. Н. Степанов. М.: Горячая линия – Телеком, 2015.
7. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок; пер. с англ. Б. С. Цыбакова. М.: Мир, 1979.
8. Iversen, V. B. Teletraffic Engineering and Network Planning / V. B. Iversen. Denmark: DTU Fotonik, 2015.

References

1. Xuming F., Yawei Z., Yaxiong F., Yu W., Yuxin Z. (2015) Dynamic Channel Selections and Performance Analysis for High-Speed Train WiFi Network. *International Workshop on High Mobility Wireless Communications*. DOI: 10.1109/HMWC.2015.7353350.
2. *IEEE Standard for Information Technology 802.11–2020. Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. Accessed 14 December 2016.
3. Hirioo S., Kosuke S., Nobuyoshi K. (2015) End-to-End Throughput and Delay Analysis for IEEE 802.11 String Topology Multi-Hop Network Using Markov-Chain Model. *IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*. DOI: 10.1109/PIMRC.2015.7343572.
4. Jayalakshmi V., Sarumathi R. (2022) Study of Clustering Schemes in Mobile Ad hoc Networks. *6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*. DOI: 10.1109/ICICCS53718.2022.9788134.
5. Tanenbaum E., Weatherall D. (2012) *Computer Networks*. Saint Petersburg, Peter Publ. (in Russian).
6. Stepanov S. N. (2015) *Theory of Teletraffic: Concepts, Models, Applications*. Moscow, Hotline – Telecom Publ. (in Russian).
7. Kleinrock L. (1979) *Computing Systems with Queues*. Moscow, Mir Publ. (in Russian).
8. Iversen V. B. (2015) *Teletraffic Engineering and Network Planning*. Denmark, DTU Fotonik Publ.

Вклад авторов

Полюян Т. В. разработала метод организации двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети с комбинированным режимом работы, математическую модель описания вероятности потерь кадров и пропускной способности канала передачи данных, провела оценку эффективности методов организации мобильной самоорганизующейся сети.

Цветков В. Ю. определил направление и цель исследования, осуществил постановку задачи, выполнил интерпретацию полученных результатов.

Authors' contribution

Paluyan T. V. developed a method for organizing a two-level mobile self-organizing network with a combined operating mode, a mathematical model for describing the probability of frame loss and data transmission channel capacity, assessed the effectiveness of methods for organizing a mobile self-organizing network.

Tsviatkou V. Yu. determined the direction and purpose of the study, formulated the problem, and interpreted the results obtained.

Сведения об авторах

Полюян Т. В., асс. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Цветков В. Ю., д-р техн. наук, проф., зав. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-04
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Information about the authors

Paluyan T. V., Assistant at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Tsviatkou V. Yu., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-92-99>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.043

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ БИОСФЕРЫ

П. К. ШАЛЬКЕВИЧ¹, Д. С. ЛАВНИКОВИЧ², Ю. С. ГОРОДНАЯ², А. В. ЧЕМЕНЦОВА²

¹Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 10.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. В рамках решения задачи комплексной оценки состояния биосферы актуален вопрос о разработке такой геоинформационной системы, которая будет не только хранить большие объемы данных разного типа, но и обеспечивать возможности по применению методов обработки и анализа этих данных, методов численного моделирования и интеллектуальных методов принятия решений. Основами для функционирования геоинформационной системы являются база данных и система управления базой данных. Поэтому главной задачей исследований был выбор структуры базы данных и технологии системы управления базой данных для разработки программного обеспечения геоинформационной системы комплексной оценки состояния биосферы. Проведен анализ видов данных, используемых в геоинформационной системе, показавший, что система для комплексной оценки состояния биосферы должна обеспечивать возможность работы со всеми видами пространственных данных, которые могут потребоваться для решения задач различного характера в области мониторинга окружающей среды. Согласно экспериментальным показателям, была выбрана система управления базой данных MariaDB, показавшая лучшую производительность при работе с геоинформационной системой онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды города Орши и Оршанского района.

Ключевые слова: база данных, система управления базой данных, реляционная база данных, геоинформационная система, мониторинг окружающей среды.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Система управления данными и программное обеспечение для комплексной оценки состояния биосферы / П. К. Шалькевич [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 92–99. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-92-99>.

DATA MANAGEMENT SYSTEM AND SOFTWARE FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE STATE OF THE BIOSPHERE

PAVEL K. SHALKEVICH¹, DARYA S. LAVNIKOVICH², YULIYA S. GORODNAYA²,
ALEXANDRA V. CHEMENTSOVA²

¹International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 10.01.2024

Abstract. As part of solving the problem of a comprehensive assessment of the state of the biosphere, the urgent question is to develop a geographic information system that will not only store large amounts of data of various types, but also provide the ability to use methods for processing and analyzing this data, numerical modeling methods and intelligent decision-making methods. The basis for the functioning of a geographic information system is a database and a database management system. Therefore, the main task of the research was to select the database structure and database management system technology for developing software for a geographic information system for a comprehensive assessment of the state of the biosphere. An analysis of the types of data used in the geographic information system was carried out, which showed that a system for a comprehensive assessment of the state of the biosphere should provide the ability to work with all types of spatial data that may be required to solve problems of various nature in the field of environmental monitoring. According to experimental data, the MariaDB database management system was selected, which showed the best performance when working with a geographic information system for online monitoring of the state of environmental components in the city of Orsha and the Orsha region.

Keywords: database, database management system, relational database, geoinformation system, environmental monitoring.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Shalkevich P. K., Lavnikovich D. S., Gorodnaya Yu. S., Chementsova A. V. (2024) Data Management System and Software for Comprehensive Assessment of the State of the Biosphere. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 92–99. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-92-99> (in Russian).

Введение

Применение геоинформационных систем (ГИС) охватывает широкий спектр важных научных задач, таких как: определение оптимальных маршрутов на цифровых картах местностей; анализ факторов, влияющих на экологические и демографические проблемы; моделирование и прогнозирование физических и социальных процессов; принятие управленческих решений, основанных на аналитических отчетах и прогнозах, и т. д. При этом разнообразие и сложность решаемых задач подразумевают следующие признаки классификации ГИС: пространственный охват, объект информационного моделирования, предметная область информационного моделирования, проблемная ориентация, функциональные возможности, уровень управления [1]. Такая классификация свидетельствует о том, что технологии ГИС должны быть, с одной стороны, достаточно разнообразными для решения задач в различных областях научных исследований, а с другой – объединенными одной общей концепцией работы с пространственно-координированными данными. Как следствие, разработка одного универсального программного комплекса (ПК) ГИС для решения задач широкого спектра из всех существующих областей научных исследований является крайне сложной, возможно, неразрешимой проблемой. Например, универсальные ГИС, такие как ПК QGIS и Grass GIS, применяются для решения задач геоморфометрии, гидрологии, экологии, ландшафтного дизайна, возобновляемой энергетики и логистики [2], что ограничивает исследователей этих областей единым интерфейсом, программной архитектурой и структурой данных, усложняя решение специфической для конкретной области задачи. С другой стороны, разработка специализированного программного обеспечения (ПО) ГИС, предназначенного для решения определенного класса задач, ограниченного одной или несколькими областями исследований, – актуальное и перспективное направление научной деятельности. Примером такого класса задач являются задачи мониторинга окружающей среды, которые требуют решений не только в области наблюдений за состоянием окружающей среды, но и в области оценки и прог-

ноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов [3]. К ГИС, способным решать такого класса задачи, относится разработанная на основе данных Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) Республики Беларусь ГИС онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды города Орши и Оршанского района [4]. Эта ГИС обеспечивает работу со структурой данных, которая годами формировалась Главным информационно-аналитическим центром НСМОС и обеспечивает технические возможности для интеграции методов прогнозирования изменений состояния окружающей среды [5, 6] и разработки принятия решений в рамках комплексной оценки состояния исследуемых территорий. Так, рассматриваемая ГИС может быть использована для решения одной из важнейших задач мониторинга окружающей среды – комплексной оценки состояния биосферы.

Следовательно, при решении задачи комплексной оценки состояния биосферы актуальна разработка такой ГИС, которая будет не только хранить большие объемы данных разного типа (геометрические полигоны, свойства геологических материалов, параметры загрязняющих веществ), но и обеспечивать возможность применения методов обработки и анализа этих данных, методов численного моделирования и интеллектуальных методов принятия решений. Необходимость в такой широко направленной функциональности формирует ряд требований к программному обеспечению ГИС для комплексной оценки состояния биосферы. При этом одно из важнейших требований – открытость программного кода ГИС для ее развития, модернизации и интеграции с другими программно-аппаратными системами. Основами для функционирования такой ГИС являются база данных (БД) и система управления базой данных (СУБД). Поэтому задача проводимых исследований состояла в выборе структуры БД и технологий СУБД для разработки ГИС комплексной оценки состояния биосферы.

Виды данных в геоинформационных системах для комплексной оценки состояния биосферы

В целом ГИС оперируют четырьмя видами данных: пространственными, которые содержат информацию о пространственном положении объектов; атрибутивными, описывающими качественные и количественные свойства; библиотекой условных знаков, где содержатся наборы стандартных условных данных; метаданными, как правило, содержащими информацию об источниках данных, о методах получения и конкретных исполнителях, получивших данные. Представление пространственных данных подразумевает способы цифрового описания объектов, наиболее универсальные из которых – растровый, векторный, GRID и TIN [1]. Учитывая широкий ряд задач, стоящих перед современными ГИС [7–9], востребованным является использование каждого из перечисленных способов описания объектов. При этом применение того или иного способа определяется спецификой задач, решаемых конкретной ГИС.

Комплексная оценка состояния биосферы подразумевает наличие данных мониторинга различных компонентов окружающей среды и системы оценки этих данных. На примере системы онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды города Орши и Оршанского района (рис. 1) [7] видно, что информация об окружающей среде представлена в виде набора геомаркеров, к которым привязаны данные измерений параметров компонентов окружающей среды. Геомаркеры, в свою очередь, привязаны к картографическим данным веб-сервисов OpenStreetMap и Google Maps. Этих данных может быть достаточно для проведения экспертной оценки [10] состояния окружающей среды, что открывает перспективы для применения технологий искусственного интеллекта в комплексе с рассматриваемой ГИС. Кроме того, данные ГИС онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды города Орши и Оршанского района могут быть использованы как исходные для решения задач моделирования и прогнозирования состояния окружающей среды. Пример такой задачи – прогнозирование миграции радионуклидов в почве [5]. Для ее решения с помощью рассматриваемой ГИС потребуются подключение к ГИС БД с параметрами почв и реализация в рамках ГИС программного модуля прогнозирования трехмерной миграции радионуклидов в почве. Визуализация результатов может быть реализована в виде трехмерной карты или массива данных для их импорта в стороннее программное обеспечение.

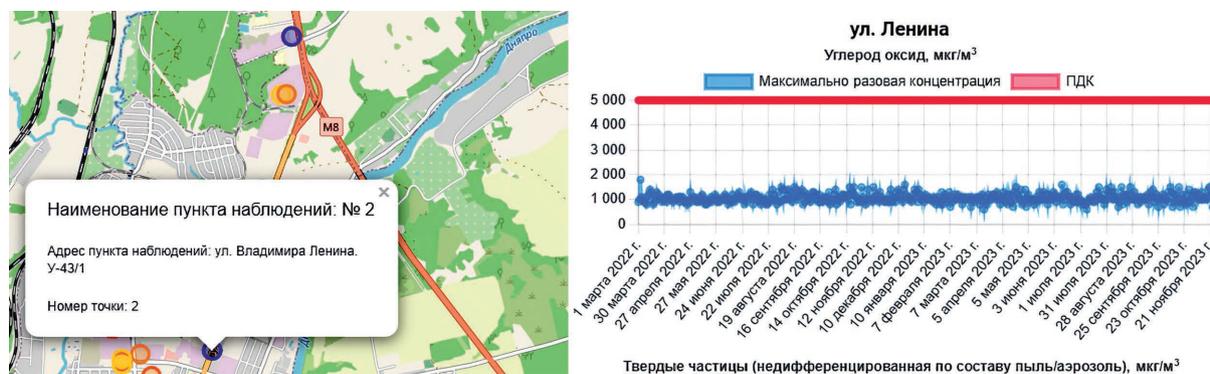


Рис. 1. Данные измерений параметров в пункте наблюдений системы онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды города Орши и Оршанского района

Fig. 1. Parameter measurement data at the observation point of the online monitoring system for the state of environmental components in the city of Orsha and Orsha region

Таким образом, система комплексной оценки состояния биосферы должна обеспечивать возможность работы со всеми видами пространственных данных, которые могут потребоваться для решения задач различного характера в области мониторинга окружающей среды.

Анализ структур баз данных и выбор системы управления базой данных

На основании видов данных и типов хранимых объектов к оптимальной структуре БД ГИС справедливо выдвинуть следующие требования [11]:

- полнота предоставленной информации;
- избыточность и внутренняя непротиворечивость (данные и связи между ними должны быть корректными и неповторяющимися);
- актуализация хранимых данных (особо важно для решения задач мониторинга окружающей среды);
- позиционная точность (информация в базе данных должна быть строго совместима с теми данными, которые могут добавляться в нее в процессе работы);
- достоверность (все явления должны быть правильно отражены посредством атрибутов);
- доступность данных (информация должна быть легко извлекаемой для выбранной категории пользователей).

На сегодняшний день выделяют три основных типа структур баз данных: иерархическую, сетевую и реляционную [12]. Для работы с БД реляционной структуры существует широкий диапазон СУБД, предоставляющих необходимые средства для работы с реляционными базами данных: Oracle Database, Microsoft SQL Server, PostgreSQL, MySQL, MariaDB, SQLite, dBase, R:Base, Informix, Paradox, Microsoft Access.

Широкий выбор СУБД открывает хорошие перспективы выбора такой системы, которая будет соответствовать не только вышеперечисленным требованиям, но и обеспечивать интеграцию с современными информационно-коммуникационными технологиями, обеспечивающими возможности расширения функциональности ГИС комплексной оценки состояния биосферы. Применение иерархической и сетевой структур БД этой цели не соответствует. Однако в качестве альтернативы реляционным СУБД предлагаются так называемые нереляционные СУБД (NoSQL), использование которых при решении технических задач позволяет получить лучшую производительность [13].

Для выбора наиболее подходящей СУБД для ГИС комплексной оценки состояния биосферы воспользуемся списком самых распространенных СУБД [14]: Oracle Database, MySQL, Microsoft SQL Server, PostgreSQL, MongoDB, Redis, Elasticsearch, IBM Db2, SQLite, Microsoft Access, MariaDB. Учитывая, что одним из важных требований для ГИС комплексной оценки состояния окружающей среды является открытость программного кода, при выборе СУБД исключим из списка проприетарное ПО. Характеристики наиболее распространенных открытых СУБД приведены в табл. 1 [15, 16].

Таблица 1. Характеристики наиболее распространенных
открытых систем управления базами данных
Table 1. Characteristics of the most common open database management systems

Наименование системы	Структура данных	Поддерживаемая платформа	Поддерживаемый язык программирования
MySQL	Реляционная	AIX, BSDi, FreeBSD, HP-UX, Linux, macOS, NetBSD, OpenBSD, OS/2 Warp, SGI IRIX, Solaris, SunOS, SCO OpenServer, UnixWare, Tru64, Windows 95, Windows 98, Windows NT, Windows 2000, Windows XP, Windows Server 2003, WinCE, Windows Vista, Windows 7 и Windows 10	Delphi, C, C++, Эйфель, Java, Лисп, Perl, PHP, Python, Ruby, Smalltalk, Компонентный Паскаль, Tcl, Lua, .NET
PostgreSQL		AIX, BSD-системы, HP-UX, IRIX, Linux, macOS, Solaris/OpenSolaris, Tru64, QNX, Microsoft Windows	Lua, LOLCODE, Perl, PHP, Python, Ruby, PL/sh, PL/Tcl, PL/Scheme, PL/v8 (Javascript), C, C++, Java
MongoDB	Нереляционная	Linux, macOS, Windows, OpenBSD	C, C++, C#, Go, Java, Node.js, Perl, PHP, Python, Ruby, Rust, Scala, Swift
Redis		Linux, BSD, Mac OS X	C, C++, C#, Clojure, Лисп, Erlang, Java, JavaScript, Haskell, Lua, Perl, PHP, Python, Ruby, Scala, Go, Tcl, Rust, Swift, Nim.
Elasticsearch		Linux, macOS, Windows	PHP, Java, .NET (C#), Python, Groovy
SQLite	Реляционная	Linux, macOS, Windows	Apple Swift, Delphi, C++, Java, Kotlin, C#, VB.NET, Python, Perl, Node.js, PHP, PureBasic, Ruby, Haskell, Scheme, Smalltalk, Lua, Parser
MariaDB		Windows, macOS, Linux, Solaris, OpenBSD	Delphi, C, C++, Эйфель, Java, Лисп, Perl, PHP, Python, Ruby, Smalltalk, Компонентный Паскаль, Tcl, Lua, .NET

Как видно из табл. 1, все перечисленные СУБД являются кросс-платформенными и поддерживают многие современные языки программирования. Однако при выборе СУБД для ГИС комплексной оценки состояния биосферы необходимо учесть, что данные об измерениях параметров окружающей среды поступают в систему в результате проведения мероприятий по мониторингу окружающей среды. Эти мероприятия включают в себя обработку и структурирование данных о параметрах окружающей среды на основании различных источников этих данных. Таким образом, в ГИС комплексной оценки состояния биосферы используются структурированные данные, следовательно, в качестве ее СУБД рационально применять реляционную систему.

Чтобы выявить наиболее подходящую СУБД для ГИС комплексной оценки состояния биосферы, проведем эксперимент на базе системы онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды города Орши и Оршанского района. Программная структура этой ГИС реализована с использованием системы управления содержимым Drupal 7 и языка программирования PHP. Drupal 7 поддерживает взаимодействие с любой из реляционных СУБД, приведенных в табл. 1, однако поддержка SQLite ограничена. Кроме того, применение СУБД SQLite показывает лучшую производительность не в онлайн-системах, а в локальных, что является дополнительным

аргументом против ее применения в системе онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды. Поэтому для проведения эксперимента использовали системы MySQL, PostgreSQL, MariaDB. Суть исследований сводилась к измерению времени выполнения запросов в этих системах при следующих действиях в ГИС: создание страницы, добавление группы параметров при помощи AJAX, сохранение страницы, фильтрация страниц, загрузка страницы модулей. Каждое измерение проводилось 10 раз с последующим расчетом среднего значения. В качестве сервера при выполнении эксперимента использовался компьютер на базе четырехъядерного процессора AMD EPYC с 8 Гб оперативной памяти. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение скорости работы системы управления базой данных в геоинформационных системах онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды города Орши и Оршанского района

Table 2. Comparison of the speed of the database management system in geographic information systems for online monitoring of the state of environmental components of the city of Orsha and the Orsha region

Наименование задачи	Время выполнения запроса, мс, в системе		
	MySQL (v. 8.0.36)	PostgreSQL (v. 16.1)	MariaDB (v. 10.11)
Создание страницы	149	234	142
Добавление группы параметров при помощи AJAX	1314	1423	1208
Сохранение страницы	584	787	536
Фильтрация страниц	1077	984	981
Загрузка страницы модулей	1268	1587	1147

Результаты эксперимента показывают, что у СУБД MariaDB лучшая производительность при работе с ГИС онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды города Орши и Оршанского района. Следовательно, применение этой системы более предпочтительно в программном комплексе ГИС комплексной оценки состояния биосферы при условии использования в ней программных технологий Drupal 7 и PHP.

Заключение

1. Анализ видов данных, используемых в геоинформационных системах, показал, что такие системы для комплексной оценки состояния биосферы должны обеспечивать возможность работы со всеми видами пространственных данных, которые могут потребоваться для решения задач различного характера в области мониторинга окружающей среды. При этом в геоинформационных системах комплексной оценки состояния биосферы используются структурированные данные. Следовательно, в качестве системы управления базой данных рационально применять реляционную систему.

2. Выбранная в процессе экспериментов система управления базой данных MariaDB показала лучшую производительность при работе с геоинформационной системой комплексной оценки состояния биосферы на примере системы онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды города Орши и Оршанского района.

Список литературы

1. Красовская, И. А. ГИС-технологии / И. А. Красовская, Д. М. Курлович, А. Н. Галкин. Витебск: Витеб. гос. ун-т им. П. М. Машерова, 2015.
2. Tangible Modeling with Open Source GIS / A. Petrasova [et al.]. Springer Internat. Publ., 2018.
3. Об охране окружающей среды: Закон Респ. Беларусь от 26 ноября 1992 г. № 1982-ХІІ, с изм. и доп. Минск: Нац. центр прав. инф. Респ. Беларусь, 2022.
4. Журавков, В. В. Разработка веб-ориентированного интерфейса для проведения ретроспективного анализа данных системы онлайн-мониторинга состояния компонентов окружающей среды г. Орши и Оршанского района / В. В. Журавков, Б. А. Тонконогов, П. К. Шалькевич // г. Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века: матер. 22-й Междунар. науч. конф., г. Минск, 19–20 мая 2022 г.; в 2 ч. Минск: Информ.-вычисл. центр Мин-ва финан. Респ. Беларусь, 2022. Ч. 2.

5. Шалькевич, П. К. Компьютерное прогнозирование пространственного распределения концентрации Cs-137 в почве / П. К. Шалькевич // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2021. Т. 65, № 2. С. 139–145.
6. Шалькевич, П. К. Алгоритм автоматизации процессов ввода и обработки исходных данных для компьютерного прогнозирования пространственной миграции радионуклидов в почвах / П. К. Шалькевич, А. О. Долматова // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 3. С. 34–42.
7. Application of Modern GIS and Remote Sensing Technology Based on Big Data Analysis in Intelligent Agriculture / X. Wang [et al.] // J. Indian Soc Remote Sens. 2022. Vol. 50, No 2.
8. Spatial Modeling Through GIS Analysis of Flood Risk and Related Financial Vulnerability: Case Study: Turcu River, Romania / S. Trif [et al.] // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No 17.
9. The Comparison of Vector and Raster Data for The Calculation of Landscape Environment Using a Geographic Information System Approach / E. Giofandi [et al.] // IT Journal Research and Development. 2023. Vol. 7, No 2. P. 209–219.
10. Пинаев, В. Е. Оценка современного состояния окружающей среды / В. Е. Пинаев, Д. А. Шахин // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 6. С. 1–11.
11. Ципилева, Т. А. Геоинформационные системы / Т. А. Ципилева; 2-е изд. Томск: Томск. межвуз. центр дистан. образ., 2004.
12. Коннолли, Т. Базы данных: проектирование, реализация, сопровождение. Теория и практика / Т. Коннолли, К. Бегг; 3-е изд. М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.
13. Шарипова, Н. Н. Об использовании NoSQL-хранилищ данных / Н. Н. Шарипова // Восточно-европейский научный журнал. 2016. Т. 9, № 3. С. 73–76.
14. Most Popular Database Management Systems 2023 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.statista.com/statistics/809750/worldwide-popularity-ranking-database-management-systems/>. Data of access: 08.12.2023.
15. Rajput, V. Fundamentals of DBMS / V. Rajput // LAP LAMBERT Academic Publishing. 2021.
16. Silberschatz, A. Database System Concepts / A. Silberschatz, H. Korth, S. Sudarshan. McGraw Hill, 2021.

References

1. Krasovskaya I. A., Kurlovich D. M., Galkin A. N. (2015) *GIS Technologies: A Course of Lectures*. Vitebsk, Vitebsk State University named after P. M. Masherov (in Russian).
2. Petrasova A., Harmon B., Petras V., Mitasova H. (2018) *Tangible Modeling with Open Source GIS*. Springer Internat. Publ.
3. *On Environmental Protection, Law Rep. Belarus, Dated 26 Nov. 1992, No 1982-XII*. Minsk, National Center of Legal Information of the Republic of Belarus, 2022 (in Russian).
4. Zhuravkov V. V., Tonkonogov B. A., Shalkevich P. K. (2022) Development of a Web-Based Interface for Retrospective Analysis of Data from an Online Monitoring System of the State of Environmental Components in Orsha and the Orsha Region. *Sakharov Readings 2022, Environmental Problems of the XXI Century Minsk, Republic of Belarus, at 2 Part*. Minsk, Information and Computing Center of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus (in Russian).
5. Shalkevich P. K. (2021) Computer Prediction of the Spatial Distribution of Cs-137 Concentration in Soil. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 65 (2), 139–145 (in Russian).
6. Shalkevich P. K., Dolmatova, A. O. (2023) Algorithm for Automating Input and Processing of Initial Data for Computer Forecasting of Spatial Migration of Radionuclides in Soils. *Digital Transformation*. 29 (3), 34–42 (in Russian).
7. Wang X., Yu S., Wen Z., Zhang L., Fang C., Jiang L. (2022) Application of Modern GIS and Remote Sensing Technology Based on Big Data Analysis in Intelligent Agriculture. *J. Indian Soc Remote Sens*. 50 (2).
8. Trif S., Bilaşco S., Petrea D., Roşka S., Fodorean I., Vescan L. (2023) Spatial Modeling Through GIS Analysis of Flood Risk and Related Financial Vulnerability: Case Study: Turcu River, Romania. *Applied Sciences*. 13 (17).
9. Giofandi E., Munibah K., Kraugusteeliana K., Novalinda A., Sekarrini C. (2023) The Comparison of Vector and Raster Data for the Calculation of Landscape Environment Using a Geographic Information System Approach. *IT Journal Research and Development*. 7 (2), 209–219.
10. Pinaev V. E., Shakhin D. A. (2013) Assessment of the Current State of the Environment. *Internet Journal "Science"*. (6), 1–11 (in Russian).
11. Tsipileva T. A. (2004) *Geoinformation Systems*. Tomsk, Tomsk Interuniversity Center for Distance Education (in Russian).
12. Connolly T., Begg K. (2003) *Databases: Design, Implementation, Maintenance. Theory and Practice*. Moscow, Publishing House "Williams" (in Russian).

13. Sharipova N. N. (2016) On the Use of NoSQL Data Warehouses. *Eastern European Scientific Journal*. 9 (3), 73–76 (in Russian).
14. Most Popular Database Management Systems 2023. Available: <https://www.statista.com/statistics/809750/worldwide-popularity-ranking-database-management-systems/> (Accessed 8 December 2023).
15. Rajput V. (2021) Fundamentals of DBMS. *LAP LAMBERT Academic Publishing*.
16. Silberschatz A., Korth H., Sudarshan S. (2021) *Database System Concepts*. McGraw Hill.

Вклад авторов

Шалькевич П. К. определил цель и задачи проведенных исследований, сформулировал введение и заключение, выполнил эксперимент и научное редактирование статьи.

Лавникович Д. С., Городная Ю. С., Чемецова А. В. выполнили анализ видов данных, используемых в ГИС, анализ структур БД и СУБД, внеся равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

Shalkevich P. K. defined the purpose and objectives of the researches, formulated an introduction and conclusion, performed the experiment and the scientific editing of the article.

Lavnikovich D. S., Gorodnaya Yu. S., Chementsova A. V. performed the analysis of data types used in GIS, the analysis of database structures and DBMS, making an equal contribution to the writing of the article.

Сведения об авторах

Шалькевич П. К., канд. техн. наук, доц., зав. каф. информационных технологий в экологии и медицине, Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета

Лавникович Д. С., студ., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Городная Ю. С., студ., БГУИР

Чемецова А. В., студ., БГУИР

Адрес для корреспонденции

220070, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Долгобродская, 23
Международный государственный экологический
институт имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета
Тел.: +375 17 230-68-97
E-mail: p.k.shalkevich@gmail.com
Шалькевич Павел Константинович

Information about the authors

Shalkevich P. K., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies in Ecology and Medicine, International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University

Lavnikovich D. S., Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Gorodnaya Yu. S., Student, BSUIR

Chementsova A. V., Student, BSUIR

Address for correspondence

220070, Republic of Belarus,
Minsk, Dolgobrodskaya St., 23
International Sakharov
Environmental Institute
of Belarusian State University
Tel.: +375 17 230-68-97
E-mail: p.k.shalkevich@gmail.com
Shalkevich Pavel Konstantsinovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-100-104>

Original paper

UDC 621.385.6

TRANSFORMING THE ENERGY OF VACUUM BY USING THE OSCILLATOR BASED ON CASIMIR EFFECT

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 29.02.2024

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024

Abstract. The article shows the possibility of extracting energy from vacuum using an electric oscillator model based on Casimir's effect with split mirrors rotating relative to each other. Since, according to existing physical concepts, unilateral extraction of energy from vacuum is impossible, the task goes into experimentally detecting tangential forces in Casimir's effect during the relative rotation of the mirrors that slows down this rotation.

Keywords: Casimir's effect, vacuum energy, rotating mirrors, tangential forces.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2024) Transforming the Energy of Vacuum by Using the Oscillator Based on Casimir Effect. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 100–104. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-100-104>.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВАКУУМА С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА КАЗИМИРА

A. A. КУРАЕВ, В. В. МАТВЕЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 29.02.2024

Аннотация. Показана возможность извлечения энергии из вакуума с использованием модели электрического генератора на основе эффекта Казимира с вращающимися относительно друг друга разделенными зеркалами. Поскольку, согласно существующим физическим представлениям, одностороннее извлечение энергии из вакуума невозможно, задача состоит в экспериментальном обнаружении тангенциальных сил в эффекте Казимира при относительном вращении зеркал, замедляющих это вращение.

Ключевые слова: эффект Казимира, энергия вакуума, вращающиеся зеркала, тангенциальные силы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кураев, А. А. Преобразование энергии вакуума с помощью генератора на основе эффекта Казимира / А. А. Кураев, В. В. Матвеев // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 100–104. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-100-104>.

Introduction

Vacuum is a state of quantum fields (bosons: electromagnetic photons, fermions: electron-positron “Dirac sea”) with the lowest energy density [1–3] and this lowest energy density does not equal zero in accordance with modern physical concepts. Indeed [2, 3], the spectrum of possible particle states, taking into account the Heisenberg uncertainty principle, is defined as

$$E_n = \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right), n = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

where E_n are the permissible energy values \hbar (the reduced Planck constant); $\omega = 2\pi f$; f – the particle frequency.

The lowest energy state (“zero energy”) corresponds to $n = 0$, and it gives the final energy value

$$E_n = \frac{1}{2} \hbar\omega. \quad (2)$$

If a certain volume V in a vacuum is limited by the walls, then the zero-point energy in it depends on the size and shape of the volume boundaries [2, 3] due to the admissible ω set depends on them and corresponding them virtual particles. And as a result of above, then changing the size and shape of the walls drives to ones does the work and certain the forces act on the walls [2, 3]. One example of such forces is the attraction force between two parallel conducting mirrors in Casimir’s effect, predicted by Heinrich Casimir in 1948. The formula [4] presents this attractive force

$$F_c = \frac{c\hbar\pi^2}{240d^4} S, \quad (3)$$

where F_c is the attraction force of the mirrors directed normally to their surfaces; c is the speed of light in a vacuum; S is the area of the mirrors; d is the distance between the mirrors.

Formula (3) was confirmed experimentally with high accuracy, and in 2011 the dynamic Casimir’s effect was discovered: when vibrating one of the two mirrors generated electromagnetic radiation [4].

Casimir’s force phenomenon opens up the application possibility of vacuum energy in creating the new engine design. One can be the following: a sector-separation mirror (equal sectors with spraying and voids) is sprayed onto a piezocrystal plate. The same mirror is mounted on a rotating disk underneath the first mirror. When the disk rotation frequency and the piezocrystal resonant frequency equals, elastic vibrations are excited in upper disk and is generated piezoelectricity due to periodically appearing Casimir’ forces. This scheme is practice one, but difficult to analyze and calculate. Therefore one considers an analog design circuit in which the piezoelectric crystal is replaced by a mechanical oscillating design with an induction coil.

The scheme of oscillator design analog

The oscillator construction scheme presents Fig. 1, *a* (cross section), where: 1 – the top mirror; 2 – the lower mirror is driven by motor 3; 4 – the elastic spring; 5 – the axial pin with locking device 6; 7 – the induction coil is excited by the axial magnet vibrations 8 mounted on axis 5; 9 – the oscillator housing. Mirror 1, spring 4, axial pin 5 and magnets 8 attached to it represent a mechanical one-dimensional (only in the axis direction) oscillatory system, the losses in which are caused by braking magnet movement 8 by the induced magnetic fields in coil 7. Mirror 2, fixed in the axial direction, is driven into rotation by motor 3. Thus, the movement direction of mirrors 1 and 2 are mutually orthogonal (without related). The sector-cut mirror structures are identical and are presented on Fig. 1, *b*. When rotating mirror 2, the complete alignment moments of the mirror surfaces and zero alignment are repeated.

The modeled oscillator

To describe one-dimensional mechanical vibrations in the oscillator, one takes the direction of the vibration axis X from mirror 1 to the mirror 2 (downwards – according to the drawing). Due to it the system oscillates 1–4–5–8 (Fig. 1, *a*) in accordance with [5] is described by the following equation:

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + \beta \frac{dX}{dt} + kX = F_c(t), \quad (4)$$

where m is the mass of the oscillatory system; β is loss coefficient in the exciting induction system 7–8; k is spring stiffness coefficient; $F_c(t)$ is variable Casimir’s force.

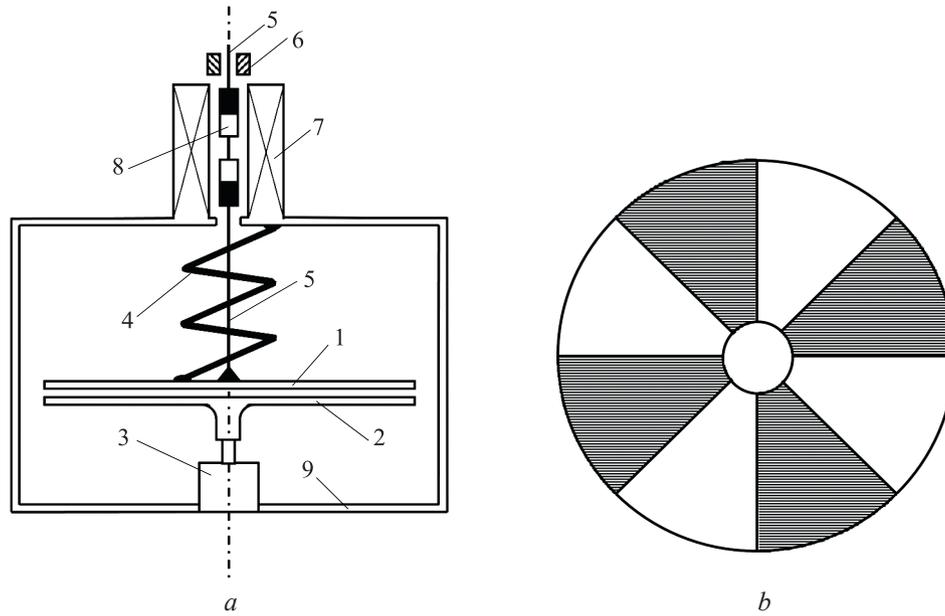


Fig. 1. Construction scheme of the oscillator

Dividing both sides of (4) by m , one obtains the standard vibration equation

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + \alpha \frac{dX}{dt} + \omega_0^2 X = \frac{F_c(t)}{m}, \quad (5)$$

where $\alpha = \frac{\beta}{m}$ is the damping coefficient; $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ is the eigen system frequency.

Next, one introduces dimensionless variables and parameters: $y = \frac{X}{d}$, d is the distance between the mirrors in the neutral relative position of the split mirrors, i. e. when the mirror overlap area is zero (in (3) $S = 0$), $\theta = \omega_0 t$, $p = \frac{\omega}{\omega_0}$, ω is the rotation frequency of the lower mirror, $\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{\omega_0}$. Then, taking into account (3), one obtains the final dimensionless vibration equation of the system:

$$\frac{d^2 y}{d\theta^2} + \bar{\alpha} \frac{dy}{d\theta} + y = \frac{A}{(1-y)^4} F_n(p\theta), \quad (6)$$

$$\text{where } A = \frac{c\hbar\pi^2 S_m}{240d^5\omega_0^2 m}; \quad F_n(p\theta) = \begin{cases} \frac{2(p\theta - n\pi)}{\pi}, & \theta \in [n\pi, n\pi + \frac{\pi}{2}]; \\ 1 - \frac{2(p\theta - n\pi)}{\pi}, & \theta \in [n\pi + \frac{\pi}{2}, (n+1)\pi]. \end{cases}$$

The initial conditions for (6) have the form

$$y(0) = 0, \quad \frac{dy}{d\theta}(0) = 0. \quad (7)$$

In accordance with [5, 6], the energy obtained in the oscillatory system load for one period given notation is expressed as: $\Delta E = \bar{\alpha} m d^2 \omega_0^2 I$, $I = \int_0^{2\pi} \left(\frac{dy}{d\theta} \right)^2 d\theta$. Accordingly, obtained the power P is calculated as

$$P = \frac{\Delta E}{T_0} = \frac{\bar{\alpha} m d^2 \omega_0^3}{2\pi} I. \quad (8)$$

The calculation data

The calculation carries out for four oscillator cases:

- 1) $A = 0,112$; $\bar{\alpha} = 0,35$; $p = 0,4$; $I = 0,243$;
- 2) $A = 0,112$; $\bar{\alpha} = 0,65$; $p = 0,3$; $I = 0,09$;
- 3) $A = 0,112$; $\bar{\alpha} = 0,1$; $p = 0,5$; $I = 0,154$;
- 4) $A = 0,112$; $\bar{\alpha} = 0,35$; $p = 0,5$; $I = 0,059$.

The plots for the first three options are shown in Fig. 2. In all cases can see the dependences $y(p\theta)$, the oscillation modes are stable.

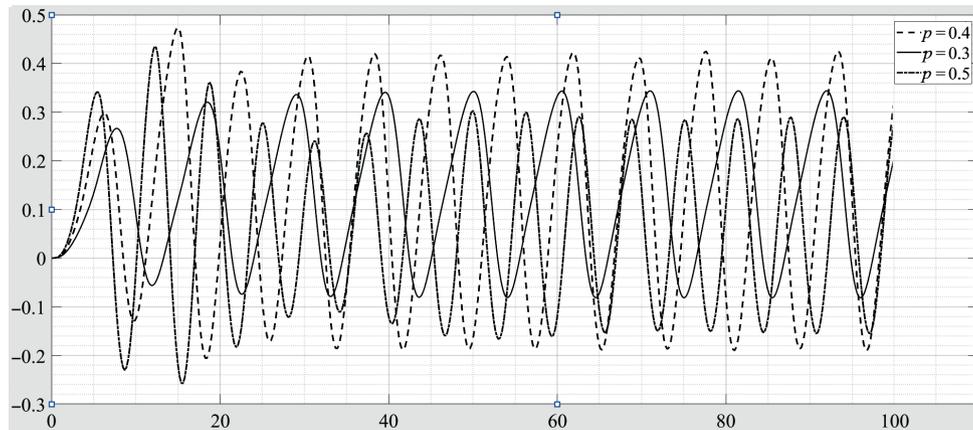


Fig. 2. Dependence plots $y(p\theta)$

Let us turn to the calculation of the powers extracted from the vacuum in presented the three cases. To do this, one uses formula (8), and for given A , $\bar{\alpha}$, I remain free to choose a combination of parameters: S_m , m , d , ω_0 . If one takes into account the original design of the piezoelectric crystal oscillator [7, 8], then the permissible values f_0 ($\omega_0 = 2\pi f_0$) can reach $10^3 \div 5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ (ultrasonic range). So, the possible options for parameters are presented in Tab. 1.

Table 1. Generator parameters

Parameter	S_m, m^2	m, kg	d, m	f_0, Hz	P, W
1.1	0,53	0,100	10^{-6}	100	$3,36 \cdot 10^{-7}$
1.2	0,10	0,100	$0,7 \cdot 10^{-6}$	105	$1,9 \cdot 10^{-7}$
1.3	0,01	0,010	$0,7 \cdot 10^{-6}$	105	$1,9 \cdot 10^{-8}$
1.4	0,01	0,019	10^{-7}	10^4	$6,38 \cdot 10^{-4}$
2.1	0,53	0,100	10^{-6}	100	$2,31 \cdot 10^{-7}$
2.2	0,10	0,100	$0,7 \cdot 10^{-6}$	105	$1,31 \cdot 10^{-7}$
2.3	0,01	0,010	$0,7 \cdot 10^{-6}$	105	$1,31 \cdot 10^{-7}$
2.4	0,01	0,019	10^{-7}	10^4	$4,4 \cdot 10^{-8}$
3.1	0,53	0,100	10^{-6}	100	$6,1 \cdot 10^{-8}$
3.2	0,10	0,100	$0,7 \cdot 10^{-6}$	105	$3,45 \cdot 10^{-8}$
3.3	0,01	0,010	$0,7 \cdot 10^{-6}$	105	$3,45 \cdot 10^{-9}$
3.4	0,01	0,019	10^{-7}	10^4	$1,16 \cdot 10^{-4}$

The resulting values P are quite noticeable and measurable. However, if one adheres to modern physical views, unilateral energy extraction from vacuum is impossible [3]. This energy must come from outside. In the device considered, such a source can only be the energy required to rotate the lower mirror 2 relative to mirror 1 in a vacuum. In other words, in a vacuum, one can arise only braking forces tangential to the surface of the mirrors.

There is no information about such forces. Therefore, the data presented the article pose a very relevant task for experimental research: to detect and study the tangential forces that arise during parallel mirror displacement in a vacuum. These studies can be carried out both on special installations

and in the circuit of oscillator proposed the article to measure the power of motor 3 necessary to ensure the rotation of mirror 2.

Conclusion

Thus, the article substantiates the formulating an actual experimental problem for detecting and studying tangential forces arising in a vacuum with a parallel mirror shift due to Casimir's effect. If these forces are not discovered, the possibility of direct using vacuum energy opens up, which is denied at the present time.

References

1. Grib A. A., Mamaev S. G., Mostepanenko V. M. (1988) *Vacuum Quantum Effects in Strong Fields*. Moscow, Energoatomizdat Publ.
2. Tsypenyuk Yu. M. (2012) Zero Energy and Zero Oscillations: How They Are Detected Experimentally. *UFN*. 18, 855–867.
3. Zeldovich Ya. B., Khlopov M. Yu. (1988) *Drama of Ideas in the Knowledge of Nature*. Moscow, Nauka Publ.
4. Mostepanenko V. M., Trunov N. N. (1988) The Casimir Effect and Its Applications. *UFN*. 156, 385–426.
5. Wilson M., Johansson G., Pourkabirian A., Simoen M., Johansson J. R., Duty T., et al. (2011) Observation of the Dynamical Casimir Effect in a Superconducting Circuit. *Nature*. 479, 376–379.
6. Butikov E. I., Bykov A. A., Kondratiev A. S. (1978) *Physics*. Moscow, Nauka Publ.
7. Shimoni K. (1977) *Physical Electronics*. Moscow, Energia Publ.
8. Eremka V. D., Kurayev A. A., Sinitsyn A. K. (2005) Ultra-Powerful Gyrotron with Piezoelectric Tuning of a Traveling T-Wave Mirror Resonator. *Vesti NASB, Ser. FTN*. (1), 78–81.

Authors' contribution

The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Кураев А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Матвеев В. В., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-89-56
E-mail: kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

Information about the authors

Kurayev A. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Information Radiotechnologies Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Matveyenka V. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Computational Methods and Programming Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-89-56
E-mail: kurayev@bsuir.by
Kurayev Alexander Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-105-113>

Original paper

UDC 004.738; 615.47

MODEL AND STRUCTURE OF IoT NETWORK FOR ALZHEIMER'S DISEASE DIAGNOSTICS

ULADZIMIR A. VISHNIAKOU, CHUYUE YU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 22.01.2024

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024

Abstract. The article presents the structure and model of an Internet of Things network that can be used for remote rapid detection of Alzheimer's disease. A local server model of the Internet of Things network has been created for personalized medical care on the client side. The model corresponds to the characteristics of the Internet of Things network: interconnection between devices, real-time communication, data processing and analysis, the use of various protocols for data transfer and exchange. When building the model, the Flask framework was used to create an application instance with a trigger condition for sending data from a smartphone to a local server via an HTTP request. The local server receives the HTTP request sent by the smartphone and processes the data. The result of the procedure is transmitted through the MQTT protocol to the MQTT client that has been subscribed to certain topics, i.e., the smartphone. Taking into account the selected structure and configuration of the Internet of Things network device, a complete model of this network was built, which can be applied to various applications. The functions and performance of the model are verified through experiments.

Keywords: Internet of things network, IT diagnostics, Flask, EMQX, MQTTX, HTTP, prediction.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Vishniakou U. A., Chuyue Yu. (2024) Model and Structure of IoT Network for Alzheimer's Disease Diagnostics. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 105–113. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-105-113>.

МОДЕЛЬ И СТРУКТУРА СЕТИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА

В. А. ВИШНЯКОВ, ЧУЮЭ ЮЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 22.01.2024

Аннотация. В статье представлены структура и модель сети интернета вещей, которые могут быть использованы для удаленного быстрого выявления болезни Альцгеймера. Создана локальная серверная модель сети интернета вещей для персонализированного медицинского обслуживания на стороне клиента. Модель соответствует характеристикам сети интернета вещей: взаимосвязь между устройствами, связь в режиме реального времени, обработка и анализ данных, использование различных протоколов для передачи и обмена данными. При построении модели использовался фреймворк Flask для создания экземпляра приложения с триггерным условием отправки данных со смартфона на локальный сервер через HTTP-запрос. Локальный сервер получает HTTP-запрос, отправленный смартфоном, обрабатывает данные. Результат процедуры передается через протокол MQTT для клиента MQTT, который был подписан на определенные темы, т. е. на смартфон. С учетом выбранной структуры и настройки устройства сети интернета вещей построена полная модель данной сети, которую можно применять к различным приложениям. Функции и производительность модели проверены с помощью экспериментов.

Ключевые слова: сеть интернета вещей, IT-диагностика, Flask, EMQX, MQTTX, HTTP, прогноз.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Вишняков, В. А. Модель и структура сети интернета вещей для диагностики болезни Альцгеймера / В. А. Вишняков, Чуюэ Юй // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 105–113. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-105-113>.

Introduction

Internet of things (IoT) technology primarily relies on information collection devices to establish connections between objects and the network. It interacts on the basis of predefined protocols to perform functions such as tracking and managing information [1]. The monograph [2] provides information on the design of the Internet for the analysis of product quality and environmental sound processing. The construction of an intelligent medical system supported by the IoT technology contributes to the informatization of medical resources and personalized medical decision-making. This allows you to analyze, calculate and exchange huge amounts of data. Traditional hospital models rely heavily on complex processes of multiple analyses, which leads to a loss of time, the necessity of patient presence, and a decrease in efficiency. In addition, due to regional differences, the distribution of medical resources is uneven. The IoT model helps to solve these problems.

The authors presented the technology of recognition of Alzheimer's disease based on the analysis of voice data, machine learning and a neural network in [3]. In this article, the authors presented a model and proposed the structure of the IoT network for remote recognition of Alzheimer's disease. This helps in early diagnosis and surgical treatment, provides real-time monitoring, expands the voice database and can help improve the quality of medical services for patients with Alzheimer's disease.

Flask framework

Flask is a Python based development that relies on Jinja2 template rendering engine and Werkzeug WSGI routing service component as core of the micro-framework, with good scalability and compatibility, can help users to quickly realize a website or web service [4], its work process diagram is shown in Fig. 1. Routing, debugging and WSGI subsystem, are three core components of Flask framework, provided by Werkzeug. Among them, routing refers to mapping URI requests to the corresponding processing function, generally a view function, Werkzeug provides Flask framework internal routing system, which is responsible for route matching distribution and HTTP service response, support for URL routing request integration and can respond to multiple users access requests at a time. Debugging means that Werkzeug provides a complete debugging tool, including stack tracing and error alerts, able to pinpoint the error or exception code during the development process, and perform debugging. WSGI is known as the Web Server Gateway Interface, is a general interface specification between Python Web servers and Web applications, Werkzeug implements the WSGI protocol, so that Flask applications can run on WSGI-compliant Web servers.

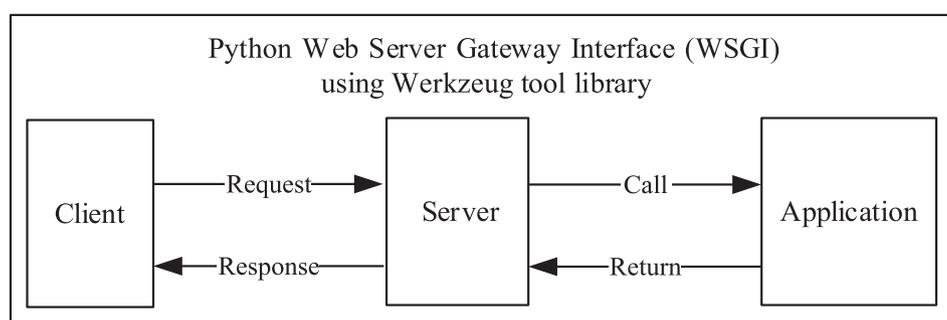


Fig. 1. The flask framework working process diagram

The template system is provided by Jinja2, a technology used for building dynamic web pages that allows for the separation of the page's structure and content. Jinja2 enables developers to embed dynamic Python code within HTML files, generating dynamic content.

Flask is currently a very popular web framework [5]. It not only allows developers to combine MVC (Model-View-Controller) pattern for development but also supports small teams in quickly building medium to small-sized websites or web services. Additionally, Flask offers strong customization capabilities and a powerful plugin library, enabling users to achieve personalized website customization while maintaining a concise, easily maintainable, highly secure, stable, and efficient core functionality. For instance, Flask can be extended with Flask-SQLAlchemy to implement database functionality, Flask-Login for user authentication, Flask-Mail for email functionality, and also supports adding ORM (Object-Relational Mapping), form validation tools, file uploads, and more. The basic pattern of Flask is to assign a view function to a URL in the program, whenever a user accesses the URL, the system will execute the view function assigned to the URL, get the return value of the function and display it to the browser.

The server in Fig. 1 is the WSGI server responsible for listening to network ports, receiving HTTP requests and invoking the WSGI application to process the requests. Werkzeug provides an implementation of the WSGI interface. When a client initiates an HTTP request, the request is sent to the listening interface of the WSGI server, based on the received HTTP request data, the server creates a dictionary of environment variables (`environ`), which will be used as parameters along with a callback function (`start_response`) to invoke the WSGI application object. An application in Flask is defined as an instance of a Flask object or its subclass, which is a WSGI application object. When a WSGI server calls the WSGI application, it is actually calling the Flask object, which will locate the object's route based on the URI path and method of the HTTP request. Upon finding a matching route (view function), Flask will call it to process the HTTP request and get a result, usually a response object will be returned, the response data includes status code, header and body of a HTTP response, then send the response back to the client.

EMQX Broker

EMQX (also known as EMQX Broker) is an open-source, distributed MQTT message middleware server [4], used for implementing MQTT protocol-based message transmission and communication. It is widely applied in various real-time communication and message push scenarios, including the IoT, smart homes, and industrial control. The latest version, EMQX 5.0, adopts a brand-new Mria cluster architecture, allowing an EMQX cluster to support up to 100 million concurrent MQTT connections, significantly enhancing its scalability. Additionally, the Mria cluster architecture reduces the risk and impact of brain-splitting in large-scale deployments, providing customers with more stable access to IoT data services.

EMQX supports publish/subscribe messaging model and provides multiple functions including support for subscribing to wildcard topics, retaining message and Quality of Service (QoS). Wildcard support is that EMQX supports MQTT wildcard subscription. Clients can use specific wildcard symbols to subscribe vaguely, flexibly realizing topic-based message filtering, the wildcard symbol includes two kinds of symbols: "+" and "#". Retained message refers to the MQTT message retention mechanism supported by EMQX to maintain message persistence. When a client publishes a message with the retain flag to designated topic, EMQX server will retain the message and if a new client subscribes to the topic, the retained message will be immediately delivered to the new client. The retain flag is a boolean value, configurable by the client, which can be either "0" or "1". Quality of Service (QoS) support refers to EMQX's support for MQTT's QoS level settings. The quality of service for message distribution can be categorized into QoS 0, QoS 1, and QoS 2, again allowing the client specify its own quality of message delivery.

As a server-side software, EMQX Broker is responsible for maintaining subscription relationships, it receives MQTT messages from different clients and ensures that these messages are routed to the correct subscribers, acting as a relay station for the messages. EMQX Broker is a central server implementing the MQTT protocol and can be a local server or a cloud server. This project established a connection with the MQTT Broker server using python code, allowing the application to publish and subscribe to messages for real-time data transfer and communication. The used connection parameters and their explanations are shown in Tab. 1.

Table 1. Connection Parameters for the EMQX Broker

Parameters' names	Parameters' implications	Parameters' values
broker_address	The address of the MQTT Broker server is typically an IP address or domain name used to identify the location of the MQTT Broker on the network	'localhost'
broker_port	The port number of the MQTT Broker server is used to identify the port on which the MQTT Broker is listening on the server	1883
broker_username	Optional: Since the EMQX Broker requires authenticated users, the authors provide a username	Authors' username
broker_password	Optional: Since the EMQX Broker requires authenticated users, the authors provide a password	Authors' password
topic	MQTT message publishing and subscribing are done using topics. Clients can publish messages to specific topics or subscribe to messages from specific topics	'/flask/predict'

Model and structure of IoT network

This project adopted the architecture design of 'mobile frontend display + Flask framework backend + EMQX Broker.' The code has strong scalability and maintainability. The system structure and interaction process are shown in Fig. 2.

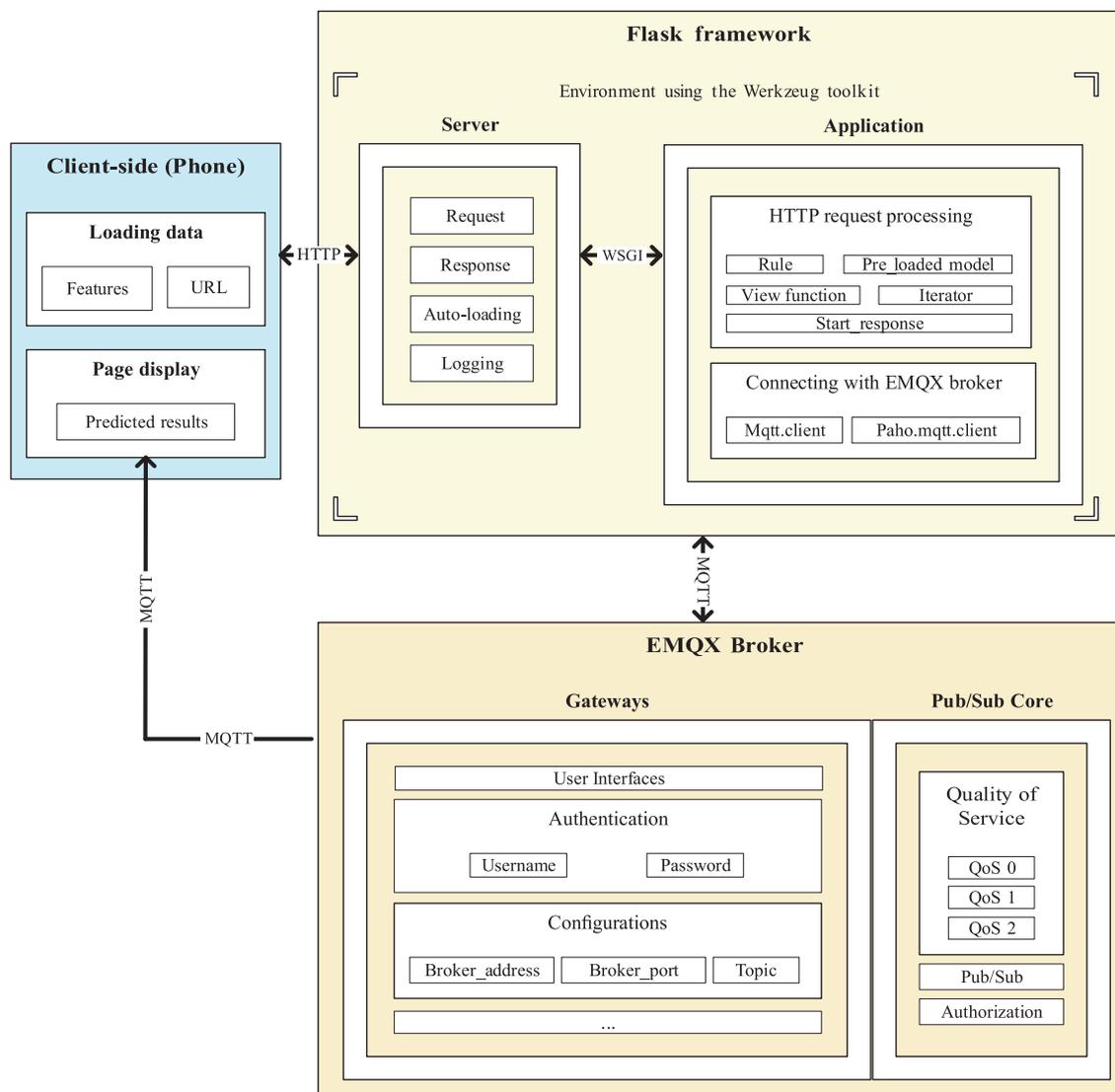


Fig. 2. Structure of IoT network for AD diagnostics

The Frontend layout of the screen was written in Java, it realized the process of uploading data to the local server through HTTP protocol and received the prediction result after the data was processed through MQTT protocol. The Result was presented on the screen. The function of local server was implemented by Flask framework and EMQX Broker, Flask framework received HTTP request sent from phone, parsed and found a matching view function, executed it, returned a HTTP response. EMQX Broker precisely sent the prediction result to the client subscribed to the topic cross-platform to realize the real-time communication. The following is a specific materialization of all the processes in the code, which was shown in three blocks from client-side to server-side in detail.

1. Uploading data from client to the local server:

a) reading the pre-collected data features from mobile phone. After collected participant's related speech, it will be processed and feature-extracted by the data preprocessing and feature extraction algorithms installed on the client. The authors directly load the data feature file in this project, which has a file extension of 'csv';

b) setting URL for the request. The authors set URL as "*http://192.168.100.14:5000/predict*", containing local IP address and local port in data format, 192.168.100.14 was the local IP address of authors' computers, 5000 is authors' local port number, which can be used to identify the web service, indicating that the web service listens on port "5000" on computer. */predict* was the path portion of URL, which can be used to identify a specific resource or function in the Web service. In this project, function 'predict' can predict whether a participant has Alzheimer's disease based on the data uploaded by the client and generate a diagnostic prediction of Alzheimer's disease;

c) sending a POST request and receiving HTTP response

Project code as: "*response = requests.post(url, json=data[1])*"

'requests' is a Python third-party library for sending HTTP requests. POST requests are usually used when the client submits data to the server to perform various operations or create new resources. The *requests.post()* method in this line of code accepted two parameters, one was the URL address to be requested, the other was the requested data. Response variable can store the HTTP response returned by the *requests.post()* method;

d) checking the status code of the HTTP response object

Project code as: "*if response.status_code == 200:*

```
    result = response.json()
    prediction = result['prediction']
    print('Prediction result:', prediction)
```

else:

```
    print(' Request failed:', response.status_code)"
```

The HTTP status code is a three-digit numerical code returned by the server in response to a request, it was used to indicate the result of the request's processing. In particular, status codes starting with '2**' indicate successful responses, and specifically, a status code of 200 means the request has been successfully processed. Therefore, authors checked whether the status code of the HTTP response object was 200, if it was, printed the prediction result from the data returned by the server, if not, then printed the current status code received, which will help debugging the project.

2. Designing a Flask program:

a) importing modules

Project code as: "*from flask import Flask, jsonify, request
from joblib import load
import pandas as pd*"

The authors introduced three classes from Flask framework to build web applications, where 'Flask' is the main class of it, designed to create instances of Flask applications, 'jsonify' is a helper function provided by the Flask framework that converts a Python object into a JSON-formatted HTTP response, and 'request' can represent an HTTP request initiated by a client. The 'joblib' library is a library for serializing and deserializing python objects in python. The 'load' function can load python object from disk which has been saved to disk by 'dump' function. The 'pandas' third-party library has also been imported into the current code environment, providing extensive functionality for handling manipulation of tabular data (such as csv);

b) declaring object

Project code as: `app = Flask(__name__)`

After imported all the relevant modules, one can start creating a Flask instance, the line of code created an instance of a web application using the Flask framework. Instance ‘*app*’ can be used to define different routes, handle HTTP requests and errors, set configuration options, etc. The “`= Flask(__name__)`” part was for initializing ‘*app*’ variable, which was created by calling the constructor from ‘*Flask*’ class;

c) setting up route

Project code as: `@app.route('/predict', methods=['POST'])`
`def predict():`

Routing is the process of defining a mapping between a URL path and its corresponding view function in Flask application. ‘`@app.route`’ is a decorator that defines a route in Flask. Routing in Flask is usually done by using a decorator, which specifies a URL path and associates it with a view function. The URL path of this project’s decorator was ‘`/predict`’, implying a client needs to send a request to the ‘`/predict`’ path for triggering its bound view function `predict()`. ‘`methods=['POST']`’ means that only POST method can trigger this route when a client sends its HTTP request.

In Flask framework, the routing module of Werkzeug library is responsible for implementing URL parsing. Different URLs correspond to different view functions. The routing module parsed URL from the request, matched it to its corresponding view function and executed this function to generate a response message. A view function is a python function in the web framework that handles an HTTP request and returns an HTTP response;

d) data processing. Data processing refers to the process of parsing and handling the received request data in a Flask application. The purpose of data processing is to extract necessary information from the request for use in business logic.

Project code as: `data = request.json`
`received_data = pd.DataFrame(data)`
`received_data_series = received_data.iloc[0]`

In the ‘`predict`’ view function, authors first stored the JSON data from the HTTP request in the variable named ‘`data`’, the structure and content of ‘`data`’ corresponds to the JSON data sent in the HTTP request. The variable ‘`received_data`’ has the same content with variable ‘`data`’, but its format was converted into DataFrame, the first row of variable ‘`received_data`’ was extracted from its DataFrame table and stored in a Series object called ‘`received_data_series`’. ‘`iloc`’ is the method provided by the pandas library for locating the data;

e) responding business. Business response refers to the procedure in the view function where the received request data is used for business logic and generate an HTTP response to be returned to the client. The view function is the primary place in the Flask program where business logic is handled, and it ultimately returns the generated response

Part of project code as: `def predict():`
`prediction = predict_with_model(received_data_series)`
`return jsonify({'prediction': prediction})`

After received the processed data, a function named ‘`predict_with_model`’ was called and data was input to this function for prediction operation. ‘`predict_with_model`’ was a function defined by authors in the code, which contained the encapsulated machine learning model. After the data has been input, the prediction method of the model will be called to make a prediction, its generated result was stored in variable ‘`prediction`’. The obtained prediction result was dictionary data, which was sent back to the client as a response object after being converted into JSON format by ‘`jsonify()`’;

f) starting up service

Project code as: `app.run(host='0.0.0.0', port=5000)`

‘`run()`’ is the method used to start the local development server in the Flask application. ‘`host`’ is the listening address of the specified server, when its value equals to ‘`0.0.0.0`’, the server will listen to all useful network interfaces, making the Flask application accessible to both local and public networks. The value 5000 for ‘`port`’ is the default port number of the Flask development server. Combining all the above code, the experimental result of running this line was:

The client initiated the HTTP request by making a request to the URL, the server listened on the *host*= '0.0.0.0' address and *port* 5000, the client's request reached the server and matched the route with the path *'/predict'*, which triggered its bound view function to process the request, the view function encapsulated the result of processing, that is, the generated response prediction, into an HTTP response, which was sent back to the client, who received the HTTP response from the server, and the prediction result was displayed.

3. Configuring and using the EMQX Broker

Although the HTTP request is already capable of returning the prediction results to the original client and displaying the results, but it is not possible to save the prediction results or distribute them to other clients, in order to achieve this function, the authors used the EMQX broker, through the MQTT protocol to achieve the prediction results published based on the topic filtering:

a) importing module

Project code as: `import paho.mqtt.client as mqtt`

The authors imported *'paho.mqtt.client'* library into the current code environment, which is a Python implementation of an MQTT client used to communicate with an MQTT Broker;

b) setting the connection parameters for the MQTT Broker server as shown in Tab. 1;

c) initializing the MQTT client

Project code as: `mqtt_client = mqtt.Client()`

Typically, when using the MQTT protocol, it is necessary to create an MQTT client object. The authors created an MQTT client by using the MQTT client's class *'Client'*, which was used for communicating with EMQX Broker. *'mqtt_client'* was the name of a variable that was used to store the created MQTT client object, afterward, it can be used to invoke methods of the MQTT client;

d) connecting to EMQX Broker

Project code as: `mqtt_client.connect(broker_address, broker_port)
mqtt_client.username_pw_set(broker_username, broker_password)`

The authors established connection to the EMQX Broker by calling the *'connect()'* method based on the previously set parameters, broker address and broker port. Since EMQX Broker requires authenticated the user, the *'username_pw_set()'* method of *'mqtt_client'* class was called, which was used to set the username and password required to connect to the EMQX Broker, with the parameters that have been previously set. After a successful connection, the MQTT client implemented by Python code can be started publishing and subscribing to messages;

e) starting the client loop

Project code as: `mqtt_client.loop_start()`

In the MQTT protocol, the client needs to continuously maintain communication with the MQTT agent (usually an MQTT server) to handle message subscriptions and publications in real-time. To achieve this purpose, the MQTT client needs to run a loop in a separate thread, typically starting the loop immediately after completing the connection operation. This ensures that the client can receive and process MQTT Broker-sent messages in real-time. *'mqtt_client.loop_start()'* method started a MQTT client's loop in a new thread. This loop ran in the background and did not block the execution of the main thread, allowing the MQTT client to process other operations simultaneously;

f) publishing prediction result to designated topic

Project code as: `mqtt_client.publish(topic, prediction)`

4. Displaying results:

a) client page. The client page realized by Java in this project was shown in Fig. 3, it can be seen that participants can choose from three functions: "record your voice", "speech to text" and "prediction", of which, speech to text is an example of data preprocessing methods, developers can supplement or modify this function according to the actual design requirements. After the participant has recorded his/her voice message to the cell phone, the cell phone will save the voice message and carry out the data preprocessing and feature extraction operation, when the participant triggered the "prediction" function, the cell phone as a client sent the corresponding feature file to the server. After received the prediction result from the server or EMQX Broker, the cell phone parsed it and displayed the result on the page, as shown in the figure;

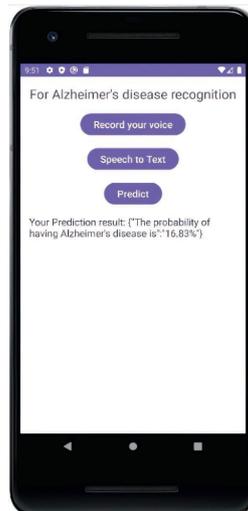


Fig. 3. Client-side page display

b) EMQX Broker page. The page of the EMQX Broker after being successfully connected by devices was shown in Fig. 4. It can be seen that there were 2 devices connected to the broker, in this project implementation, the cell phone and the MQTTX client, with the number of subscribed topics being 1;

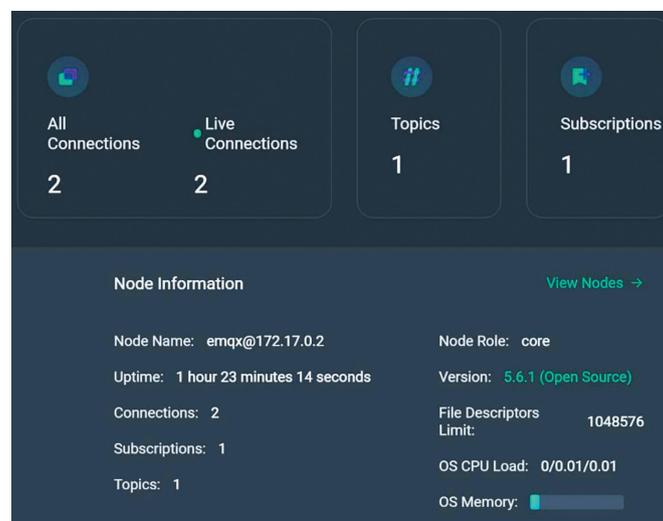


Fig. 4. EMQX

c) MQTTX page. Since in this project, the predicted result that displayed on the mobile phone page was parsed from the HTTP response. To examine the feasibility of distributing the prediction results using the EMQX Broker, the authors used MQTTX to simulate a new client, whose page display was shown in Fig. 5. MQTTX is an open source, cross-platform MQTT 5.0 client tool built on Electron, which is primarily used for debugging and testing MQTT communication. As can be seen from the figure, after subscribed to the topic "/flask/predict", MQTTX, as another client, received the prediction results transmitted via the MQTT protocol.



Fig. 5. MQTTX

Conclusion

1. The article presents the model and structure of the Internet of things network, which are designed to determine the presence of Alzheimer's disease in patients, using the author's developments in the technology of IT diagnostics of this disease. An instance of the network project was created using the Flask framework, described how to create a WSGI application from `app.py` to process client requests. The process of using the `app.route` decorator method of an instance of the Flask program to create viewing functions that are performed when accessing routes was explained, thus, business logic was implemented for fact information and result display functions.

2. It also describes how to use the JSONIFY function to return data in JSON format to the client based on a call to the view function. It explains how to start the Flask web application service using the `app.run()` method. To expand the scope of providing prediction results, the EMQX Broker was used to facilitate data transmission over the MQTT protocol. The layout of the client page of this project was developed using Java, which included displaying the prediction results of Alzheimer's disease on smartphones of a patient and a doctor.

References

1. Dong L. (2023) Application of Internet of Things Technology in Hospital Information Construction. *Shihezi Science and Technology*. (3), 77–78.
2. Vishniakou U. A. (2023) *Specialised IoT Systems: Models, Structures, Algorithms, Hardware, Software Tools*. Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
3. Vishniakou U. A., Chuyue Yu. (2023) Using Machine Learning for Recognition of Alzheimer's Disease Based on Transcription Information. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 106–112. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-106-112>.
4. Jiafa C., Yujing H. (2022) Application of Flask Framework in Data Visualization. *Fujian Computer*. 38 (12), 44–48.
5. Grinberg M. (2018) *Flask Web Development: Developing Web Applications with Python*. O'Reilly Media, Inc.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Information about the authors

Vishniakou U. A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Chuyue Yu, Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 44 486-71-82
E-mail: vish@bsuir.by
Vishniakou Uladzimir Anatol'evich

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ РАЗДЕЛА «СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ»

В помощь авторам при формировании литературных источников в разделе «Список литературы» предлагаем несколько примеров их оформления согласно Приложению 2 к Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации (ВАК) (тире, указанные в таблице Приложения 2 для оформления источников, не ставим).

1. Теория кодирования / Т. Касами [и др.]; пер. с япон. А. В. Кузнецова. М.: Мир, 2006.
2. Галкин, Я. Д. Улучшенная модель двухзатворного JFET для аналоговых интегральных микросхем / Я. Д. Галкин, О. В. Дворников, В. А. Чеховский // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 3. С. 20–25. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-20-25>.
3. Hacker, P. S. Range Distance Requirement for Measuring Low and Ultralow Sidelobe Antenna Patterns / P. S. Hacker, H. E. Schrank // IEEE Trans. Antennas and Propagation Magazine. 1982. Vol. AP-30, No 5. P. 956–966.
4. Авиационные правила организации и проведения летной проверки средств радиолокации, средств связи и радиотехнического обеспечения полетов государственной авиации Республики Беларусь: пост. Мин-ва обороны Респ. Беларусь от 14.04.2017 № 7.
5. Respiration Rate and Volume Measurements Using Wearable Strain Sensors / M. Chu [et al.] // npj. Digital Medicine. 2019. No 2. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>.
6. Устройство для измерения активной и емкостной составляющих импеданса биологических тканей: пат. 2196504 Рос. Федерации, МПК А 61 В 5/053 / А. В. Ефремов, Р. Р. Ибрагимов, Р. А. Манвелиадзе, В. Т. Леонтьев, К. Г. Булатецкий, Г. Г. Колонда, Е. В. Тарасов, Р. Ш. Ибрагимов; Новосибир. гос. мед. акад., № 2000117324/14. Заявл. 28.06.2000. Опубл. 20.01.2003.
7. Программная модель системы для анализа импедансометрических характеристик биологических жидкостей / К. Е. Мешкова [и др.] // Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 8–9 декабря 2022 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2022. С. 93–97.
8. Измеритель иммитанса E7-20 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0>. Дата доступа: 07.05.2023.

Оформление не попавших в перечисленные выше примеры литературных источников смотрите в таблице Приложения 2 указанной инструкции.

При оформлении раздела **REFERENCES** в цитируемой публикации следует указывать **ВСЕХ** авторов (если их более 6-ти, то после 6-го ставить et al. – см. пример под цифрами 5, 6).

1. Kasami T., Tokura N., Iwadari E., Inagaki Ya. (2006) *Coding Theory*. Transl. from Japan by A.V. Kuznetsov. Moscow, Mir Publ. (in Russian).
2. Galkin Y. D., Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A. (2022) Double Gate JFET Improved Model for Analog Integrated Circuits. *Doklady BGUIR*. 20 (3), 20–25. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-3-20-25> (in Russian).
3. Hacker P. S., Schrank H. E. (1982) Range Distance Requirement for Measuring Low and Ultralow Sidelobe Antenna Patterns. *IEEE Trans. Antennas and Propagation Magazine*. AP-30 (5), 956–966.
4. Equipment and Radio Technical Support for State Aviation Flights of the Republic of Belarus. *Resolution of the Ministry of Defense of the Republic of Belarus, Apr. 14 2017, No 7* (in Russian).
5. Chu M., Nguyen T., Pandey V., Zhou Y., Hoang N. Pham, Bar-Yoseph R., et al. (2019) Respiration Rate and Volume Measurements Using Wearable Strain Sensors. *npj Digital Medicine*. (2). <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>.
6. Efremov A. V., Ibragimov R. R., Manveliadze R. A., Leontiev V. T., Bulatetsky K. G., Kolonda G. G., et al. (2003) Device for Measuring the Active and Capacitive Components of the Impedance of Biological Tissues. *Patent 2196504 Ros. Federation, IPC A 61 B 5/053. Novosibirsk State Medical Academy, No 2000117324/14. Stated 28.06.2000. Publ. 20.01.2003* (in Russian).
7. Meshkova K. E., Patseev S. V., Davydov M. V., Saveyko A. R., Pashkilevich V. V. (2022) A Software Model of a System for Analyzing the Impedance Characteristics of Biological Fluids. *Medelectronics–2022. Medical Electronics and New Medical Technologies, Collection of Scientific Articles of the XIII International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 8–9. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 93–97 (in Russian).
8. *Immitance Meter E7-20*. Available: <https://www.mnipi.ru/products.php?group=6&device=0> (Accessed 7 May 2023) (in Russian).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ФОРМУЛ

Настройки для набора формул в редакторе MathType

