

ДОКЛАДЫ БГУИР

Том 24, № 1, 2026

Научный журнал выходит шесть раз в год

Учредитель

Учреждение образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Журнал включен в Перечень ВАК Республики Беларусь, а также в базы данных:
CNKI, Dimensions, DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, НЭБ «КиберЛенинка», РИНЦ

СОДЕРЖАНИЕ

Демидович С. А., Юник А. Д., Ковальчук Н. С., Соловьёв Я. А. Влияние технологических параметров осаждения диэлектрических слоев методом ICP CVD на поверхностные токи утечки в AlGaIn/GaN HEMT	5
Саечников И. В., Чернявская Э. А., Саечников А. В. Гибридный метод глубокого обучения для решения обратной задачи детектирования гетерогенных систем по многомерным данным оптических сенсоров	13
Mordachev V. Probabilistic Characteristics of the Downlink Radio Channels Spectral Efficiency in Macro-Sites of 5G Mobile Communications (Мордачев В. И. Вероятностные характеристики спектральной эффективности нисходящих радиоканалов в макросайтах систем мобильной радиосвязи 5G)	21
Стануль А. А., Симоненко В. А., Юбка А. П. Оценка характеристик направленности антенных решеток с использованием сканера ближнего поля	30
Домеников В. П., Саперов А. Г., Уласюк Н. Н., Строгова А. С. Метод сжатия спектра широкополосного сигнала с использованием перекрывающихся импульсов	37
Шутович В. А., Гусинский А. В., Тумилович М. В. Методика измерения диэлектрической проницаемости материалов в СВЧ- и КВЧ-диапазонах на основе биконического резонатора	45
Храменков А. С., Чигряй В. Г. Анализ информативности признаков распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов по реальным записям импульсного радиолокатора S-диапазона	51
Герасимов В. А., Бойправ О. В., Русецкий Р. Н. Анализ событий информационной безопасности в системе электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры	60
Струкова А. А., Шилин Л. Ю. Алгоритм взаимодействия компонентов на стороне клиента	68
Макар Д. А., Вашкевич М. И. Нейронная сеть на основе сверточных, рекуррентных слоев и механизма внимания для визуального распознавания речи	75
Андрейчук А. О. Методы повышения энергетической эффективности граничных устройств в сети IoT	83
Осипов А. Н., Ма Т., Тумилович М. В., Пацеев А. В., Пацеев С. В. Оценка взаимодействия холодной атмосферной плазмы диэлектрического барьерного разряда с поверхностью различных материалов и биообъектов	91

**Главный редактор
Вадим Анатольевич Богуш,**

д. ф.-м. н., профессор, ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)

Редакционная коллегия

Лыньков Л. М., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – заместитель главного редактора

Стемпницкий В. Р., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – заместитель главного редактора

Бойправ О. В., к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь – ответственный секретарь редколлегии

Батура М. П., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Борисенко В. Е., д. ф.-м. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Гасанов М. Г., д. т. н., профессор, Азербайджанский технический университет, Баку, Азербайджан

Козлов С. В., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Лабунув В. А., акад. НАН Беларуси, д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Писецкий Ю. В., д. т. н., доцент, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразми, Ташкент, Узбекистан

Сигов А. С., акад. РАН, д. ф.-м. н., профессор, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Смирнов А. Г., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Татур М. М., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Цветков В. Ю., д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Ответственный секретарь Т. В. Мироненко

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь, рег. номер 1087

Журнал издается с 2003 г. Дата последней перерегистрации 23 января 2010 г.

Индекс для индивидуальной подписки 00787, для ведомственной – 007872.

Подписано в печать 19.02.2026. Формат бумаги 60×84%. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 11,88. Уч.-изд. л. 9,8. Тираж 72 экз. Заказ 31.

Адрес редакции:
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, ком. 329а
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

DOKLADY BGUIR

V. 24, No 1, 2026

The scientific journal is published 6 times a year

Founder

Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”

The Journal is included in the List of Scientific Editions in the Republic of Belarus,
as well as the following databases:

CNKI, Dimensions, DOAJ, Google Scholar, Mendeley, Open Alex, CyberLeninka, RSCI

CONTENTS

Demidovich S., Yunik A., Kovalchuk N., Solovjov Ja. The Influence of Technological Parameters of Deposition of Dielectric Layers by the ICP CVD Method on Surface Leakage Currents in AlGaN/GaN HEMT	5
Saetchnikov I., Tcherniavskaia E., Saetchnikov A. Hybrid Deep Learning Method for Solving the Inverse Problem of Heterogeneous Systems Detection Using Multidimensional Optical Sensor Data	13
Mordachev V. Probabilistic Characteristics of the Downlink Radio Channels Spectral Efficiency in Macro-Sites of 5G Mobile Communications.....	21
Stanul A., Simanenka V., Joubko A. Evaluation of the Directional Characteristics of Antenna Arrays Using a Near-Field Scanner	30
Domenikof V., Saperov A., Ulasuk N., Strogova A. A Method for Compressing the Spectrum of a Wideband Signal Using Overlapping Pulses	37
Shutovich V., Gusinskiy A., Tumilovich M. Method for Measuring the Dielectric Permittivity of Materials in the Microwave and EHF Frequencies Range Based on a Biconical Resonator.....	45
Khramiankou A., Chyhrai V. Analysis of the Information Content of Recognition Features of Small-Sized Unmanned Aerial Vehicles Based on Real S-Band Pulse Radar Recordings.....	51
Gerasimov V., Boiprav O., Rusetski R. Analysis of Information Security Events in an Electronic Digital Signature System Based on a Virtual Infrastructure	60
Strukova A., Shilin L. Algorithm of Components Interaction on the Client Side	68
Makar D., Vashkevich M. Neural Network Based on Convolutional, Recurrent Layers and an Attention Mechanism for Visual Speech Recognition.....	75
Andreichuk A. O. Methods for Increasing the Energy Efficiency of Edge Devices in IoT Networks	83
Osipov A., Ma T., Tumilovich M., Patseyev A., Patseyeu S. Evaluation of the Interaction of Cold Atmospheric Plasma of a Dielectric Barrier Discharge with the Surface of Various Materials and Biological Objects.....	91

Editor-in-Chief

Vadim A. Bogush, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor,
Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)

Editorial Board

Leonid M. Lynkov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Deputy Editor-in-Chief

Viktor R. Stempitsky, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Deputy Editor-in-Chief

Olga V. Boiprav, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus – Responsible Secretary of the Editorial Board

Mikhail P. Batura, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Victor E. Borisenko, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Mehman H. Hasanov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

Sergei V. Kozlov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Vladimir A. Labunov, Acad. of the NAS of Belarus, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Yuri V. Pisetsky, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

Alexander S. Sigov, Acad. of the RAS, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Alexander G. Smirnov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Mikhail M. Tatur, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Viktor Yu. Tsvetkov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Responsible Secretary T. Mironenka

The journal is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus, Reg. No 1087.

The journal has been published since 2003. Last re-registration date January 23, 2010.

Index for individual subscription 00787, for departmental – 007872.

Signed for printing 19.02.2026. Format 60×84 1/8. Office paper. Printed on a risograph. Type face Times.

Ed.-pr. l. 11,88. Ed.-ed. l. 9,8. Edition 72 copies. Order 31.

Editorial address

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

6, P. Brovki St., Room 329a, 220013, Minsk

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.

6, P. Brovki St., 220013, Minsk



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-5-12>

УДК 539.25; 538.91; 538.97

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ МЕТОДОМ ICP CVD НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ТОКИ УТЕЧКИ В AlGaN/GaN НЕМТ

С. А. ДЕМИДОВИЧ^{1,2}, А. Д. ЮНИК¹, Н. С. КОВАЛЬЧУК¹, Я. А. СОЛОВЬЁВ¹

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

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

Аннотация. Исследовано влияние технологических параметров осаждения диэлектрических пассивирующих пленок методом ICP CVD (соотношение газов, мощность индуктивно-связанной плазмы, температура подложки, рабочее давление) на структурные и электрофизические свойства слоев AlGaN-поверхности. Показано, что предварительная плазмохимическая обработка AlGaN в кислородной среде приводит к формированию контролируемого оксидного интерфейса, снижающего поверхностные состояния и подавляющего токи утечки сток-исток в закрытом состоянии на два-три порядка. Установлена корреляция между режимами осаждения нитрида кремния (SiN) и степенью плазменного повреждения AlGaN/GaN-гетероструктур. Для минимизации деградации предложен композитный диэлектрик на основе кислородсодержащего нитрида кремния (SiON). Ключевым результатом является разработка комбинированного подхода: предварительная модификация поверхности AlGaN кислородной плазмой с последующим осаждением SiON в мягком режиме ICP CVD (мощность ≤ 300 Вт, давление ≥ 14 Па). Полученные результаты демонстрируют перспективность комбинированного подхода (предварительная модификация поверхности + управляемая пассивация) для минимизации деградации электрофизических свойств НЕМТ-структур.

Ключевые слова: оксинитрид кремния, плазма высокой плотности, AlGaN/GaN НЕМТ, поверхностные утечки, осаждение из газовой фазы.

Благодарность. Научные исследования выполнены в рамках гранта Президента Республики Беларусь.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Влияние технологических параметров осаждения диэлектрических слоев методом ICP CVD на поверхностные токи утечки в AlGaN/GaN НЕМТ / С. А. Демидович [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 5–12. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-5-12>.

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF DEPOSITION OF DIELECTRIC LAYERS BY THE ICP CVD METHOD ON SURFACE LEAKAGE CURRENTS IN AlGaN/GaN HEMT

SERGEY DEMIDOVICH^{1,2}, ANDREY YUNIK¹, NATALLIA KOVALCHUK¹,
JAROSLAV SOLOVJOV¹

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

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

Abstract. The influence of technological parameters of deposition of dielectric passivating films by the ICP CVD method (gas ratio, inductively coupled plasma power, substrate temperature, operating pressure) on the structural and electrophysical properties of AlGaN surface layers was studied. It is shown that preliminary plasma-chemical treatment of AlGaN in an oxygen environment leads to the formation of a controlled oxide interface, which reduces surface states and suppresses drain-source leakage currents in the closed state by two to three orders of magnitude. A correlation was established between silicon nitride (SiN) deposition conditions and the degree of plasma-induced damage to AlGaN/GaN heterostructures. To minimize degradation, a composite dielectric based on oxygen-containing silicon nitride (SiON) is proposed. The key result is the development of a com-

bined approach: preliminary modification of the AlGa_N surface with oxygen plasma followed by SiON deposition in a low-power ICP CVD regime (power ≤ 300 W, pressure ≥ 14 Pa). The obtained results demonstrate the promise of the combined approach (surface pre-modification + controlled passivation) for minimizing the degradation of the electrophysical properties of HEMT structures.

Keywords: silicon oxynitride, high-density plasma, AlGa_N/Ga_N HEMT, surface leakage, chemical vapor deposition.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflicts of interests.

Gratitude. This research was supported by a grant from the President of the Republic of Belarus.

For citation. Demidovich S., Yunik A., Kovalechuk N., Solovjov Ja. (2026) The Influence of Technological Parameters of Deposition of Dielectric Layers by the ICP CVD Method on Surface Leakage Currents in AlGa_N/Ga_N HEMT. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 5–12. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-5-12> (in Russian).

Введение

Гетероструктуры AlGa_N/Ga_N служат основой для создания высокочастотных и высоковольтных устройств благодаря уникальным свойствам двумерного электронного газа (2DEG). Высокая подвижность носителей заряда (~ 2000 см²/(В·с)) и их концентрация ($\sim 10^{13}$ см⁻²) обеспечивают рекордные значения плотности тока насыщения и выходной мощности [1]. Однако ключевыми ограничениями надежности Ga_N-приборов, таких как транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT), остаются коллапс тока и высокий уровень токов утечки. Эти явления напрямую связаны с дефектами поверхности AlGa_N-слоя, включая неконтролируемое окисление и захват носителей заряда в поверхностных состояниях. Отсутствие пассивации поверхности AlGa_N, а также наличие исходного оксидного слоя существенно влияют на мощность и надежность Ga_N-HEMT [2].

Исследования демонстрируют, что захват и релаксация электронов в поверхностных состояниях зависят от напряженности электрического поля, температуры и ширины запрещенной зоны интерфейса, что объясняет зависимость тока утечки от внешних условий [3]. При этом незначительные вариации параметров пассивации поверхности, таких как состав, толщина и других свойств покрытий (или изменение условий осаждения), приводят к существенному росту утечек и снижению напряжения пробоя в выключенном состоянии [4]. Например, наличие дефектов на границе AlGa_N/диэлектрик может создавать пути для туннелирования носителей, усиливая токи утечки [5].

Для подавления деградационных процессов предложены различные пассивирующие материалы, включая SiO₂ [6–8], Si₃N₄ [9–12], SiON [13], Al₂O₃ [14], HfO₂ [15] и др. Часто применяют многослойные структуры, где тонкий (~ 10 нм) буферный слой минимизирует повреждение поверхности при осаждении [16–18]. Тем не менее большинство существующих подходов не обеспечивают комплексного решения: часть методов снижает ток утечки, но не обеспечивает надежность прибора из-за низкого качества пленки, другие не устанавливают четкой корреляции между параметрами диэлектрика (толщина, плотность, состав) и характеристиками прибора.

Цель исследований – получение процесса пассивации поверхности AlGa_N/Ga_N HEMT путем химического осаждения из газовой фазы (CVD) методом индуктивно-связанного плазменного осаждения (ICP), направленного на одновременное подавление коллапса тока и снижение токов утечки. В рамках исследования анализируются ключевые технологические параметры (мощность плазмы, температура подложки, соотношение газовых прекурсоров) и их влияние на электрофизические свойства диэлектрических пленок. Особое внимание уделяется минимизации дефектности интерфейса AlGa_N/диэлектрик и стабилизации поверхностных состояний.

Методика проведения эксперимента

Исследуемая эпитаксиальная структура гетероструктуры AlGa_N/Ga_N включала сверху вниз слой Ga_N толщиной 2–3 нм, нелегированный барьер Al_{0,25}Ga_{0,75}N толщиной 22 нм, спейсер AlN (1–2 нм), каналный слой Ga_N толщиной 330 нм и буфер Ga_N толщиной 4,85 мкм на подложке Si (рис. 1). Процесс изготовления приборов начался с формирования изолированных областей мезы методом ICP в газовой среде BCl₃/Cl₂. Затем были сформированы омические контакты из металлических слоев Ti/Al/Ni/Au (20/120/40/40 нм) с последующим быстрым термическим отжигом при 720 °С в течение 60 с в атмосфере азота N₂. Затворные электроды изготавливались

из слоев Ni/Au: 30/300 нм. Омические контакты и затворные электроды формировались с помощью электронно-лучевого испарения и метода фотолитографии с удалением резиста (lift-off). Перед осаждением диэлектрика поверхность гетероструктуры обрабатывалась кислородной плазмой в течение 10 мин при давлении 40 Па для улучшения качества интерфейса.



Рис. 1. Общий вид поперечного сечения гетероструктуры HEMT
Fig. 1. General cross-sectional view of the HEMT heterostructure

Тестовая структура HEMT имела следующие параметры:

- длина затвора – 2,0 мкм;
- расстояние между истоком и стоком – 14,5 мкм;
- расстояние между затвором и стоком – 8,0 мкм;
- ширина затвора – 3,8 мкм.

Электрические характеристики измерялись с помощью анализатора силовых приборов Keysight B1505A. Осаждение диэлектрических пленок выполнялось методом CVD в ICP-реакторе установки STE ICP200D (SemiTEq, Санкт-Петербург). Для оценки параметров диэлектрика использовались кремниевые подложки КДБ-12 диаметром 100 мм. Толщина пленки и показатель преломления измерялись спектральным эллипсометром ЭМ-6022. Механические напряжения определялись с помощью хроматического датчика белого света (CWL-сенсора). Изображения срезов тестовых образцов исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе S-4800. Морфология поверхности оценивалась с помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA Prima.

Результаты исследований и их обсуждение

В изготовленных тестовых образцах AlGaIn/GaN-гетероструктур начальный уровень тока утечки сток-исток в закрытом состоянии (I_{DSS}) составил от 5 до 10 мкА при напряжениях $V_{GS} = -5$ В и $V_{DS} = 100$ В. Для улучшения состояния поверхности AlGaIn была применена предварительная плазменная обработка в средах азота (N_2) и кислорода (O_2). Наилучшие результаты продемонстрировала обработка кислородной плазмой в течение 10 мин при давлении 40 Па: уровень тока утечки сток-исток I_{DSS} снизился до 10–100 нА ($V_{DS} = 100$ В).

В качестве исходного режима осаждения использовали процесс с низкой мощностью, рабочим давлением и температурой: мощность ICP-плазмы – (–50) Вт, давление – 1 Па, температура подложки – 120 °С, соотношение потоков $SiH_4/N_2 = 1:60$. После осаждения тока утечки сток-исток I_{DSS} возрос до 50–70 мкА. Эксперименты показали, что добавление закиси азота (N_2O) улучшает характеристики тока утечки. Зависимость I_{DSS} от соотношения N_2O/SiH_4 и показателя преломления пленки представлена на рис. 2.

При увеличении соотношения N_2O/SiH_4 до 10 ток утечки снижается до 5 мкА, а дальнейшее повышение доли N_2O не приводит к значительным изменениям. Оптимальное соотношение N_2O/SiH_4 составило 10, что подтверждается стабилизацией показателя преломления пленки ($n = 1,49$) при дальнейшем росте потока N_2O . Кроме того, выявлена зависимость уровня тока утечки сток-исток I_{DSS} от времени, прошедшего после осаждения. Повторные измерения показали улучшение тока утечки через 30 сут: I_{DSS} снизился до 10 мкА при исходных параметрах осаждения. Это может быть связано с временной стабилизацией поверхностных состояний на границе AlGaIn. Введение N_2O и оптимизация параметров осаждения сократили время стабилизации.

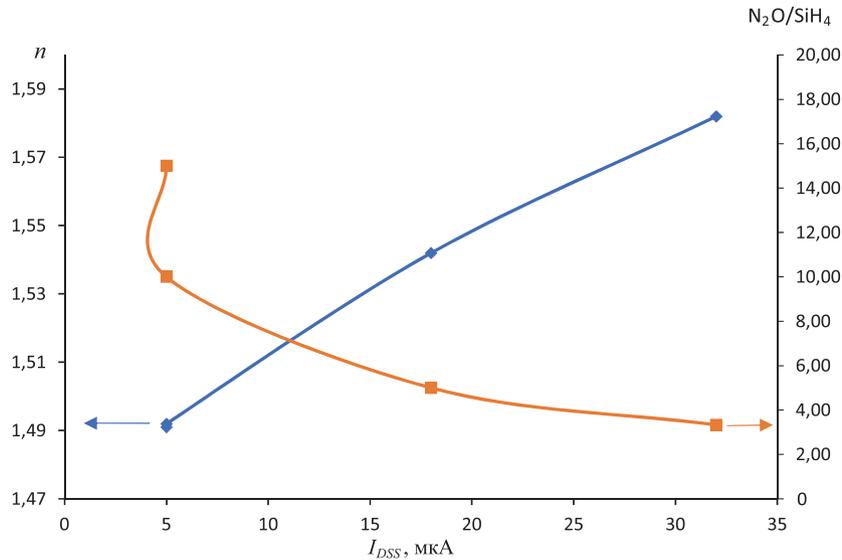


Рис. 2. Зависимость тока утечки сток-исток в закрытом состоянии от соотношения N_2O/SiH_4 и показателя преломления пленки
Fig. 2. The dependence of the leakage current in a closed state on the N_2O/SiH_4 ratio and the film refraction indicator

В ходе дальнейших исследований параметры процесса осаждения пленки кислородсодержащего нитрида кремния SiON – мощность ICP-плазмы, температура подложки T и рабочее давление p – были увеличены с целью улучшения качества пленки. Повышение этих параметров приводило к росту тока утечки сток-исток I_{DSS} . Однако синхронное увеличение всех трех параметров ICP, T , p позволило снизить I_{DSS} и сократить время стабилизации поверхностных состояний на границе AlGaN. На рис. 3 представлена зависимость времени стабилизации тока утечки сток-исток I_{DSS} от параметров осаждения при фиксированном соотношении газовых потоков.

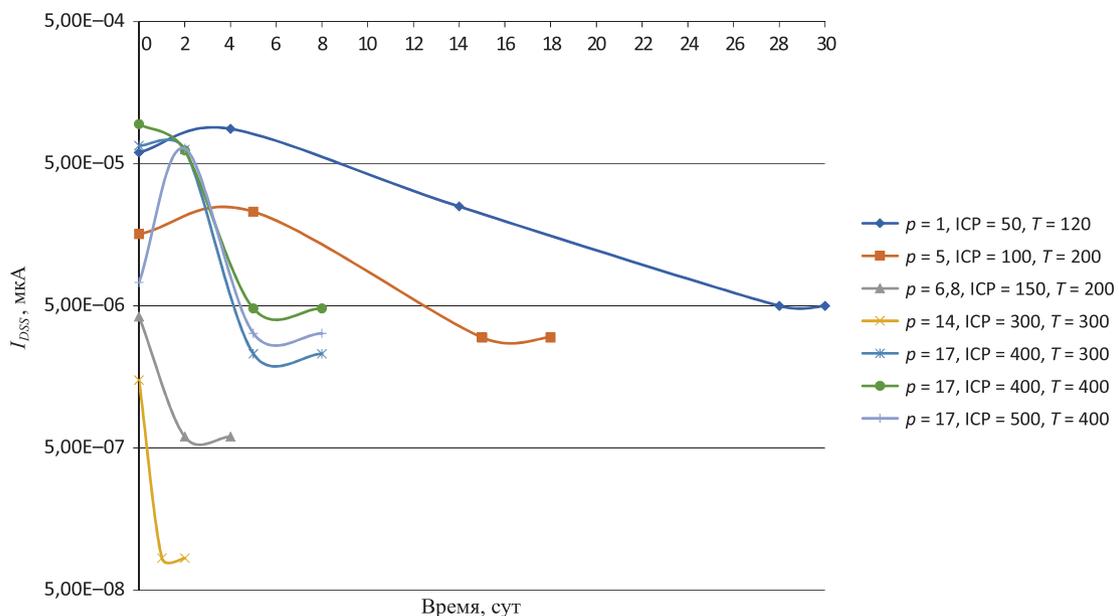


Рис. 3. Время стабилизации тока утечки в зависимости от параметров процесса осаждения (ICP; T , °C; p , Па) при одинаковом соотношении газов
Fig. 3. The stabilization time of the leakage current depending on the parameters of the precipitation process (ICP, T , °C; p , Pa) with the same gas ratio

Анализ данных показал, что при низких значениях ICP, T и p наблюдалось максимальное время стабилизации (порядка 30 сут). Постепенное увеличение этих параметров привело к снижению

начального уровня тока утечки сток-исток I_{DSS} и сокращению времени стабилизации до 1–2 сут. Однако при мощности ИСР-плазмы выше 400 Вт, даже на фоне повышенного давления p и температуры подложки T , наблюдалось ухудшение характеристик: рост I_{DSS} (до 60–90 мкА) и увеличение времени стабилизации до 6 сут. Это может быть связано с деградацией поверхности AlGaN из-за чрезмерной энергии плазмы, что требует дополнительного изучения.

Оптимальные параметры осаждения составили: рабочее давление $p = 14$ Па, мощность ИСР-плазмы – 300 Вт, температура подложки $T = 300$ °С. При толщине пленки 50 нм значение I_{DSS} находилось в диапазоне 50–100 нА. Последующие исследования подтвердили, что данная толщина достаточна для формирования защитного подслоя, обеспечивающего совместимость с последующим осаждением диэлектрических пленок с повышенной механической и электрической прочностью. Это позволяет минимизировать дефекты на границе раздела и улучшить надежность многослойной структуры.

На тестовых образцах AlGaN/GaN-гетероструктур с помощью РЭМ были получены изображения среза затвора с пассивацией оксинитридом кремния (рис. 4).

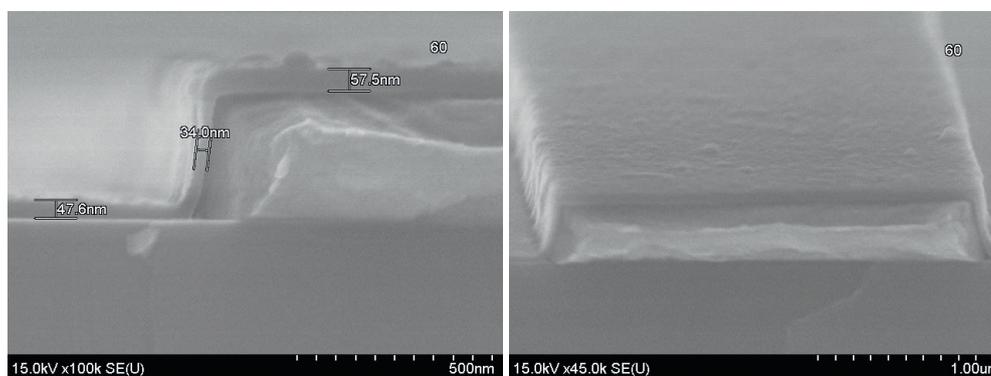


Рис. 4. Изображение поверхности тестового образца
Fig. 4. Test sample surface image

Как видно из рис. 4, толщина осажденного диэлектрика составила порядка $(50 \pm 7,5)$ нм, толщина боковой поверхности – 34 нм. Таким образом, осаждение можно считать практически конформным.

Также методом атомно-силовой микроскопии исследовали морфологию поверхности данной диэлектрической пленки, нанесенной на кремниевую подложку (рис. 5). На рисунке видно, что на поверхности пленки отсутствуют какие-либо заметные неровности. Средняя шероховатость поверхности на площади 10×10 мкм² составила 0,302 нм при толщине пленки 50 нм, что является достаточно хорошим результатом.

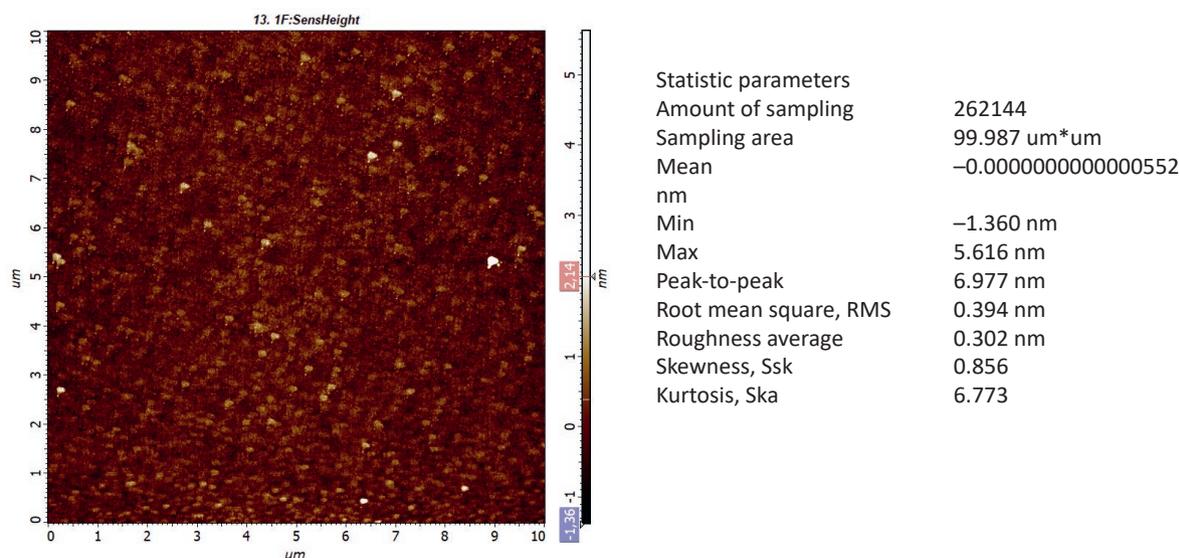


Рис. 5. Изображение и статистика параметров поверхности пленки SiON
Fig. 5. Image Test and surface parameter statistics for SiON film

Разработанная технология была апробирована при изготовлении силовых НЕМТ с общей шириной затвора 16 мм. На готовом приборе получены достаточно низкие токи утечки сток-исток I_{DSS} в закрытом состоянии – не более 2 мкА ($V_{GS} = -5$ В и $V_{DS} = 100$ В).

Заключение

1. Проведенное исследование подтвердило значительное влияние режимов плазмохимического осаждения (ICP CVD) диэлектрических пассивирующих пленок на электрофизические характеристики AlGaIn/GaN НЕМТ. Разработанный метод предварительной плазменной обработки поверхности AlGaIn в кислородной среде продемонстрировал эффективное подавление тока утечки сток-исток в закрытом состоянии на два-три порядка, что связано с минимизацией поверхностных дефектов и подавлением паразитных токовых каналов. Установленные критические параметры осаждения (соотношение газовых компонентов, мощность плазмы, температура подложки и давление) позволили определить оптимальные условия для предотвращения коллапса тока и снижения утечек.

2. Предложенный режим пассивации на основе кислородсодержащего нитрида кремния (SiON) обеспечил сохранение стабильности электрофизических свойств транзисторов после воздействия плазмы, что подтверждает его преимущества перед традиционными методами. Комбинированный подход, объединяющий предварительную модификацию поверхности и управляемое осаждение диэлектрика, открывает новые возможности для повышения надежности и производительности НЕМТ-структур в условиях высоких напряжений и температур.

3. Полученные результаты имеют важное прикладное значение для разработки AlGaIn/GaN-устройств нового поколения, включая компоненты силовой электроники и СВЧ-техники. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию предложенной технологии для массового производства, а также на изучение влияния других диэлектрических материалов и плазменных режимов на долговременную стабильность транзисторов на основе GaN.

Список литературы

1. Investigation of the Fabrication Processes of AlGaIn/AlN/GaN HEMTs with in SITU Si₃N₄ Passivation / K. N. Tomosh [et al.] // Semiconductors. Vol. 50, No 10. P. 1416–1420.
2. Surface Electrical Characterization of Defect Related Inhomogeneities of AlGaIn/GaN/Si Heterostructures Using Scanning Capacitance Microscopy / A. Szyszka [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. 2019. Vol. 94. P. 57–63. DOI: 10.1016/j.mssp.2019.01.043.
3. Mao, L.-F. Investigating the Effects of the Interface Defects on the Gate Leakage Current in MOSFETs / L.-F. Mao // Applied Surface Science. 2008. Vol. 254, No 20. P. 6628–6632. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.04.045.
4. Comprehensive Comparison of MOCVD- and LPCVD-SiN_x Surface Passivation for AlGaIn/GaN HEMTs for 5G RF Applications / L. Deng [et al.] // Micromachines. 2023. Vol. 14, No 11. DOI: 10.3390/mi14112104.5.
5. Meyer, D. J. Pre-Passivation Plasma Surface Treatment Effects on Critical Device Electrical Parameters of AlGaIn/GaN HEMTs / D. J. Meyer, J. R. Flemish, J. M. Redwing // International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, CS MANTECH 2008. P. 261–264.
6. High Quality PECVD SiO₂ Process for Recessed MOS-Gate of AlGaIn/GaN-On-Si Metal-Oxide-Semiconductor Heterostructure Field-Effect Transistors / J. Lee [et al.] // Solid State Electron. 2016. Vol. 122. P. 32–36.
7. AlGaIn/GaN MOS-HEMT Device Fabricated Using a High Quality PECVD Passivation Process / A. Chakroun [et al.] // IEEE Electr. Device Lett. 2017. Vol. 38. P. 779–782.
8. Reactive Evaporation of SiO_x Films for Passivation of GaN High-Electron-Mobility Transistors / G. Zhu [et al.] // Journal of Physics and Chemistry of Solids. DOI: 10.1016/j.jpics.2018.12.021.
9. Investigation of Surface Related Leakage Current in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors / J. K. Kaushik [et al.] // Thin Solid Films. 2016. Vol. 612. P. 147–152. DOI: 10.1016/j.tsf.2016.06.003.
10. GaN-Based Metal-Insulator-Semiconductor High-Electron-Mobility Transistors Using Low-Pressure Chemical Vapor Deposition SiN_x as Gate Dielectric / M. Hua [et al.] // IEEE Electron Device Letters. 2015. Vol. 36, No 5. P. 448–450. DOI: 10.1109/LED.2015.2409878.
11. Оптимизация процесса пассивации при изготовлении СВЧ-транзисторов на основе AlGaIn/GaN гетероструктур методом ICP CVD / А. А. Слепцова [и др.] // Материалы электронной техники. 2020. Т. 23, № 2. С. 127–133. DOI: 10.17073/1609-3577-2020-23-2-127-133.

12. Jin, C. Silicon Nitride Has Been Broadly Used as a Passivation Film Material and Shown to Improve Device Performance / C. Jin // *Electronics Letters*. 2018. Vol. 54, No15. DOI: 10.1049/el.2018.1401.
13. Effective Passivation with High-Density Positive Fixed Charges for GaN MIS-HEMTs / S.-C. Liu [et al.] // *IEEE Journal of the Electron Devices Society*. 2017. Vol. 5, No 3. P. 170–174. DOI: 10.1109/jeds.2017.2669100.
14. Impact of Al₂O₃ Passivation on AlGaN/GaN Nanoribbon High-Electron-Mobility Transistors / S. Joglekar [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2016. Vol. 63, No 1. P. 318–325. DOI: 10.1109/ted.2015.2500159.
15. Influence of Oxygen-Plasma Treatment on AlGaN/GaN Metal-Oxide-Semiconductor Heterostructure Field-Effect Transistors with HfO₂ by Atomic Layer Deposition: Leakage Current and Density of States Reduction / R. Stoklas [et al.] // *Semiconductor Science and Technology*. 2017. Vol. 32, No 4. DOI: 10.1088/1361-6641/aa5fcb.
16. Koehler, A. D. Advances in AlGaN/GaN HEMT Surface Passivation / A. D. Koehler // *ECS Trans*. 2016. P. 75–99. DOI: 10.1149/07512.0099ecst.
17. Chenkai, D. Improvement of DC Performance and RF Characteristics in GaN-Based HEMTs Using SiN_x Stress-Engineering Technique / D. Chenkai, W. Peiran, T. Chuying // *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, No 18. DOI: 10.3390/nano14181471.
18. Tongde, H. Small- and Large-Signal Analyses of Different Low-Pressure-Chemical-Vapor-Deposition SiN_x Passivations for Microwave GaN HEMTs / H. Tongde, B. Johan // *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2018. Vol. 99. P. 1–7. DOI: 10.1109/TED.2017.2789305.

Поступила 18.07.2025

Принята в печать 09.09.2025

References

1. Tomosh K. N., Pavlov A. Y., Pavlov V. Y., Khabibullin R. A., Arutyunyan S. S., Maltsev P. P. (2016). Investigation of the Fabrication Processes of AlGaN/AlN/GaN HEMTs with in SITU Si₃N₄ Passivation. *Semiconductors*. 50 (10),1416–1420.
2. Szyszka A., Wośko M., Paszkiewicz B., Paszkiewicz R. (2019) Surface Electrical Characterization of Defect Related Inhomogeneities of AlGaN/GaN/Si Heterostructures Using Scanning Capacitance Microscopy. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 94, 57–63. DOI: 10.1016/j.mssp.2019.01.043.
3. Mao L.-F. (2008) Investigating the Effects of the Interface Defects on the Gate Leakage Current in MOSFETs. *Applied Surface Science*. 254 (20), 6628–6632. DOI: 10.1016/j.apsusc.2008.04.045.
4. Deng L., Zhou L., Lu H., Yang L., Yu Q., Zhang M., et al. (2023) Comprehensive Comparison of MOCVD- and LPCVD-SiN_x Surface Passivation for AlGaN/GaN HEMTs for 5G RF Applications. *Micromachines*. 14 (11). DOI: 10.3390/mi14112104.
5. Meyer D. J., Flemish J. R., Redwing J. M. (2008) Pre-Passivation Plasma Surface Treatment Effects on Critical Device Electrical Parameters of AlGaN/GaN HEMTs. *International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, CS MANTECH 2008*. 261–264.
6. Lee J., Kim H., Seo K., Cho C., Cha H. (2016) High Quality PECVD SiO₂ Process for Recessed MOS-Gate of AlGaN/GaN-On-Si Metal-Oxide-Semiconductor Heterostructure Field-Effect Transistors. *Solid State Electron*. 122, 32–36.
7. Chakroun A., Jaouad A., Soltani A., Arenas O., Aimez V., Arès R., et al. (2017) AlGaN/GaN MOS-HEMT Device Fabricated Using a High Quality PECVD Passivation Process. *IEEE Electr. Device Lett*. 38, 779–782.
8. Zhu G., Liang G., Zhou Y., Chen X., Xu X., Feng X., et al. (2018) Reactive Evaporation of SiO_x Films for Passivation of GaN High-Electron-Mobility Transistors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. DOI: 10.1016/j.jpss.2018.12.021.
9. Kaushik J. K., Balakrishnan V. R., Mongia D., Kumar U., Dayal S., Panwar B. S., et al. (2016) Investigation of Surface Related Leakage Current in AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors. *Thin Solid Films*. 612, 147–152. DOI: 10.1016/j.tsf.2016.06.003.
10. Hua M., Liu C., Yang S., Liu S., Fu K., Dong Z., et al. (2015) GaN-Based Metal-Insulator-Semiconductor High-Electron-Mobility Transistors Using Low-Pressure Chemical Vapor Deposition SiN_x as Gate Dielectric. *IEEE Electron Device Letters*. 36 (5), 448–450. DOI: 10.1109/LED.2015.2409878.
11. Sleptsova A. A., Chernykh S. V., Podgorny D. A., Zhilnikov I. A. (2020) Optimization of Passivation in AlGaN/GaN Heterostructure Microwave Transistor Fabrication by ICP CVD. *Electronic Engineering Materials*. 23 (2), 127–133. DOI: 10.17073/1609-3577-2020-23-2-127-133 (in Russian).
12. Jin C. (2018) Silicon Nitride Has Been Broadly Used as a Passivation Film Material and Shown to Improve Device Performance. *Electronics Letters*. 54 (15). DOI: 10.1049/el.2018.1401.
13. Liu S.-C., Huang C.-K., Chang C.-H., Lin Y.-C., Chen B.-Y., Tsai S.-P., et al. (2017) Effective Passivation with High-Density Positive Fixed Charges for GaN MIS-HEMTs. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*. 5 (3), 170–174. DOI: 10.1109/jeds.2017.2669100.

14. Joglekar S., Azize M., Jones E. J., Piedra D., Gradecak S., Palacios T. (2016). Impact of Al₂O₃ Passivation on AlGaIn/GaN Nanoribbon High-Electron-Mobility Transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 63 (1), 318–325. DOI: 10.1109/ted.2015.2500159.
15. Stoklas R., Gregušová D., Blaho M., Fröhlich K., Novák J., Matys M., et al. (2017) Influence of Oxygen-Plasma Treatment on AlGaIn/GaN Metal-Oxide-Semiconductor Heterostructure Field-Effect Transistors with HfO₂ by Atomic Layer Deposition: Leakage Current and Density of States Reduction. *Semiconductor Science and Technology*. 32 (4). DOI: 10.1088/1361-6641/aa5fcb.
16. Koehler A. D. (2016) Advances in AlGaIn/GaN HEMT Surface Passivation. *ECS Trans.* 75–99. DOI: 10.1149/07512.0099ecst.
17. Chenkai D., Peiran W., Chuying T. (2024) Improvement of DC Performance and RF Characteristics in GaN-Based HEMTs Using SiN_x Stress-Engineering Technique. *Nanomaterials*. 14 (18). DOI: 10.3390/nano14181471.
18. Tongde H., Johan B. (2018) Bergsten Small- and Large-Signal Analyses of Different Low-Pressure-Chemical-Vapor-Deposition SiN_x Passivations for Microwave GaN HEMTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 99, 1–7. DOI: 10.1109/TED.2017.2789305.

Received: 18 July 2025

Accepted: 9 September 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Демидович С. А., вед. инж. отрасл. лаб. новых технологий и материалов научно-технического центра (НТЦ), ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ОАО «ИНТЕГРАЛ»); асп., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Юник А. Д., вед. инж. отрасл. лаб. новых технологий и материалов НТЦ, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Ковальчук Н. С., канд. техн. наук, доц., зам. ген. дир. – гл. инж., ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Соловьёв Я. А., д-р техн. наук, доц., зав. отрасл. лаб. новых технологий и материалов НТЦ, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
Минск, ул. Корженевского, 16
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Тел.: +375 29 207-10-84
E-mail: SDemidovich@integral.by
Демидович Сергей Александрович

Information about the authors

Demidovich S., Leading Engineer at the R&D Center for Branch Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL” (JSC “INTEGRAL”); Postgraduate, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Yunik A., Leading Engineer at the R&D Center for Branch Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL”

Kovalchuk N., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Deputy General Director – Chief Engineer, JSC “INTEGRAL”

Solovjov Ja., Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Laboratory of New Technologies and Materials, JSC “INTEGRAL”

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo St., 16
JSC “INTEGRAL” –
Manager Holding Company “INTEGRAL”
Tel.: +375 29 207-10-84
E-mail: SDemidovich@integral.by
Demidovich Sergey



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-13-20>

УДК 535.8

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ ПО МНОГОМЕРНЫМ ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ

И. В. САЕЧНИКОВ, Э. А. ЧЕРНЯВСКАЯ, А. В. САЕЧНИКОВ

Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Современные методы машинного и глубокого обучения эффективно справляются с прямыми задачами обработки данных с сенсоров и с выявлением сложных зависимостей, обеспечивая устойчивость к шумам и вариациям в данных. Наиболее актуальной является задача синтеза результатов обработки многомерных данных гибридными методами обучения для решения обратных задач, таких как определение компонент динамически изменяющихся сложных гетерогенных систем без нарушения их свойств в мультисенсорных измерительных платформах. В статье рассмотрен гибридный метод глубокого обучения, интегрированный в платформу на основе оптических сенсоров и сочетающий сверточные нейронные сети, двунаправленные сети долгой краткосрочной памяти и трансформерные энкодеры, что обеспечивает динамический мониторинг компонент гетерогенных систем. Гибридный метод применительно к биосенсорной платформе демонстрирует точность классификации более 98 % по типу раствора и восстановление значений концентрации белковых компонентов с медианной точностью до 2 нг/мл.

Ключевые слова: гибридное глубокое обучение, обратная задача, многомерные данные, детектирование, оптический сенсор, динамический мониторинг.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Саечников, И. В. Гибридный метод глубокого обучения для решения обратной задачи детектирования гетерогенных систем по многомерным данным оптических сенсоров / И. В. Саечников, Э. А. Чернявская, А. В. Саечников // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С.13–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-13-20>.

HYBRID DEEP LEARNING METHOD FOR SOLVING THE INVERSE PROBLEM OF HETEROGENEOUS SYSTEMS DETECTION USING MULTIDIMENSIONAL OPTICAL SENSOR DATA

IVAN SAETCHNIKOV, ELINA TCHERNIAVSKAIA, ANTON SAETCHNIKOV

Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Modern machine and deep learning methods effectively handle direct sensor data processing tasks and identify complex dependencies, ensuring robustness to noise and data variations. The most pressing problem is the synthesis of the results of processing multidimensional data using hybrid learning methods to solve inverse problems, such as determining the components of dynamically changing complex heterogeneous systems without violating their properties in multisensory measurement platforms. This paper presents a hybrid deep learning method integrated into an optical sensor platform that combines convolutional neural networks, bidirectional long short-term memory networks, and transformer encoders to enable dynamic monitoring of heterogeneous system components. The hybrid method, when applied to a biosensor platform, demonstrates classification accuracy of over 98 % by solution type and recovery of protein component concentration values with a median accuracy of up to 2 ng/ml.

Keywords: hybrid deep learning, inverse problem, multidimensional data, detection, optical sensor, dynamic monitoring.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Saetchnikov I., Tcherniavskaia E., Saetchnikov A. (2026) Hybrid Deep Learning Method for Solving the Inverse Problem of Heterogeneous Systems Detection Using Multidimensional Optical Sensor Data. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 13–20. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-13-20> (in Russian).

Введение

Современные сенсорные технологии занимают фундаментальное место в процессах сбора данных для систем мониторинга, автоматизации и аналитики, охватывающих широкий спектр прикладных областей – от биомедицины [1] до роботизированных систем [2]. Интеграция методов машинного и глубокого обучения существенно повышает точность интерпретации сенсорных сигналов, способствует выявлению сложных паттернов в данных и обеспечивает устойчивость моделей к шумам и вариациям данных [3]. Современные архитектуры глубокого обучения, включая сверточные нейронные сети (СНС) и рекуррентные нейронные сети, демонстрируют высокую эффективность при анализе многомерных данных и временных рядов. [4] В частности, последние работы по данной тематике подтверждают успешное применение СНС для задач детектирования динамических объектов в системах компьютерного зрения, в том числе при обработке многомерных данных с мультиспектральных сенсоров [5]. По сравнению с первоначальными одностадийными методами глубокого обучения, решающими прямые задачи, комбинированные модели, включая гибридные архитектуры, объединяющие различные типы нейросетей и физически обоснованные модели, открывают новые возможности для решения сложных обратных задач в сенсорике. Одним из таких направлений являются оптические системы, основанные на резонансе мод шепчущей галереи (МШГ) [6–8], применяемые в биосенсорике. Здесь обратная задача заключается в определении характеристик биохимических растворов в многокомпонентных гетерогенных системах на основе анализа изменений спектрального сдвига МШГ, зарегистрированного сенсорной системой [9–13].

Особую актуальность представляют методы разработки подходов для определения параметров динамически изменяющихся комбинированных биохимических растворов без нарушения их свойств, реализуемые в мультисенсорных измерительных системах с использованием гибридного глубокого обучения. В статье рассматривается применение гибридного метода глубокого обучения к микрорезонаторному датчику, состоящему из более чем тысячи сферических микрополостей с выраженными спектральными вариациями, сгруппированных в одном чипе, состоящем из чувствительных областей (до десяти) с возможностью параллельного измерения.

При облучении сенсорной платформы лазером с фиксированной длиной волны обеспечивается одновременный сбор динамических откликов от различных групп микрополостей. С учетом спектральной изменчивости выполняется детектирование в реальном времени малых концентраций биохимических растворов гибридным методом глубокого обучения. Разработанный метод объединяет архитектуры СНС, двунаправленные сети долгой краткосрочной памяти (BiLSTM) и модули трансформерного энкодера для детектирования типов и прецизионных концентраций компонент. На примере задачи иммуноанализа показана точность классификации типов растворов на уровне 98 %, определена концентрация с медианной точностью до 2 нг/мл. Это подтверждает высокую эффективность предложенного метода.

Материалы и методика измерений

Оптический сенсор. В качестве сенсорного устройства, формирующего непрерывные потоки многомерных данных, выступает фотонный чип с интегрированными кластерами микрорезонаторов – микросферы размерами 90:120 мкм [14–16]. Выбранные структуры обеспечивают компромисс между сложностью изготовления, компактностью, стабильностью и добротностью резонансных мод. Для формирования фотонного чипа (10×10 мм) микросферы закреплялись на подложке с использованием тонкой плетки с низким показателем преломления. Методика изготовления обеспечивала возможность интеграции тысяч микросфер на единой стеклянной

подложке с обеспечением оптической добротности 10^6 . Кластер микрорезонаторов представляет собой изолированную на подложке группу микросфер со случайным расположением. Была выполнена интеграция до 16 отдельных кластеров в рамках одной подложки, где каждый содержал не менее 100 микрорезонаторов. Исходные кластеры использовались в качестве каналов регистрации объемных изменений физических параметров либо как контрольные каналы. Для обеспечения селективности регистрации растворы функциональных объектов наносили на кластеры микрорезонаторов. Функционализация включала несколько этапов очистки, активацию для формирования –ОН-функциональных групп и связывание с аминогруппами, где агентом был выбран (3-Аминопропил)триметоксисилан (APTMs). Таким образом, с учетом возможности интеграции множества кластеров, каналов при учете экспериментальных, технических повторений и временного фактора и в контексте масштабирования в статье апеллировано к многомерным данным.

Измерительный прибор. Одновременный сбор сигналов с тысяч микрорезонаторов осуществлялся с помощью схемы оптической связи затухающего поля с использованием призмы. Благодаря соотношению размеров призмы (~10 мм) и микрорезонатора (~100 мкм) данный подход обеспечивает масштабируемость. Пространственное разделение сигналов отдельных микрорезонаторов и их одновременная регистрация камерой позволяют выполнять параллельный сбор данных [17, 18]. Фотонный чип управлялся диодным лазером с длиной волны 685 нм и контролируемой линейной поляризацией. Регистрация сигналов осуществлялась как в режиме сканирования длины волны, так и при облучении на фиксированной длине волны. Интенсивность свечения каждого микрорезонатора измерялась монохромной камерой с частотой съемки до 500 кадров/с и глубиной цвета 12 бит. Записанные данные подвергались нормализации для компенсации вариаций внешнего освещения, при этом уровень шума при 12-битной разрядности оказался достаточным для отказа от дополнительного покадрового шумоподавления.

В качестве модельной среды выступали водные растворы с растворенными биохимическими объектами, которые непрерывно прокачивались через измерительный чип со скоростью 100 мкл/мин. Одна фаза измерений длилась 2000 с, в течение которых чип находился в идентичных биохимических условиях. Эксперимент мог включать множество фаз измерений (до 40) и длиться до 24 ч. При анализе сложных сред с растворенными биохимическими объектами необходимо производить регенерацию сенсорной поверхности после каждой фазы измерений. Щелочь гидроксида натрия (NaOH) была определена как наиболее эффективный раствор для регенерации функционализированных кластеров стеклянных микрорезонаторов.

Гибридный метод глубокого обучения

Использование аналитических моделей для идентификации типа и концентрации биохимических соединений в растворах оказалось затруднительным по нескольким причинам. Во-первых, такие модели плохо справляются с описанием сложных, коррелированных характеристик при анализе динамических процессов в сложных биохимических средах. Изучение многокомпонентных растворов, учет температурных нестабильностей, а также перспектива расширения спектра исследуемых объектов потребовали бы постоянного уточнения аналитической модели. Во-вторых, локальные возмущения и пропущенные данные вносят нестационарный шум, который значительно снижает точность интерпретации. Нелинейная природа откликов сенсоров тоже ограничивает масштабируемость таких моделей. В итоге это приводит к невозможности полноценного описания всех совокупностей процессов, происходящих в сложных системах в рамках единой аналитической модели. Поэтому для задачи анализа динамических компонент сложных биохимических растворов предлагается использование гибридных модульных методов глубокого обучения. Подобные методы обладают встроенной способностью к улучшению точности по мере накопления данных. Это делает их более надежным, гибким и масштабируемым решением для мультиплексного анализа биохимических систем.

Предлагаемый гибридный метод решает задачу мультиплексного анализа сложных биологических растворов за счет сочетания классификатора для определения типа раствора и регрессионной модели для оценки отдельных концентраций. В качестве классификатора использовалась комбинированная архитектура, объединявшая сверточные слои CNN и BiLSTM. А именно,

метод включал два последовательных одномерных сверточных модуля с 16 и 32 фильтрами, при этом размер ядра уменьшался с 5 до 3 с сохранением размерности. Каждый сверточный блок дополнялся активационной функцией LeakyReLU, пакетной нормализацией и слоем dropout с вероятностью 0,3 для предотвращения переобучения. Выделенные признаки затем подавались на слой BiLSTM с 32 скрытыми блоками, за которым следовали дополнительный слой dropout (0,3) и финальный выход классификатора. Такой подход к построению модели позволял на первом этапе эффективно выделять локальные пространственные зависимости и фильтровать шум с помощью сверточных операций, а на втором – изучать сложные временные взаимосвязи в обоих направлениях благодаря BiLSTM.

Регрессионная часть метода базировалась на блоках трансформерных энкодеров. Входные отклики каналов сначала проходили через блоки проекции и позиционного кодирования, через модуль кросс-модального внимания, после чего применялась серия блоков трансформерных энкодеров. Проекционный слой выполнял преобразование входных данных в 16-мерное пространство, а позиционное кодирование создавало уникальные 16-мерные векторные представления для каждой временной позиции поканально. Результаты проекции и позиционного кодирования объединялись в модуле внимания с двумя головами для обработки как внутриканальных, так и межканальных корреляционных зависимостей. Сформированные признаки проходили через три последовательных блока трансформера-кодера, каждый из которых содержал модуль внимания с четырьмя головами, двухслойную сеть с активацией GELU и dropout, а также слой нормализации. Между блоками применялись пакетная нормализация и активация LeakyReLU, а также пулинг с ядром размером 2, уменьшающий длину последовательностей. В свою очередь, категориальные выходы классификационной части метода проходили через два линейных слоя размерами 16 и 32, сопровождаемые BatchNorm, LeakyReLU и dropout (0,1). Впоследствии извлеченные признаки из каналов и категориальные объединялись и обрабатывались двумя полносвязными слоями (в дополнение к BatchNorm, LeakyReLU и dropout).

Спрогнозированные результаты концентраций вышеописанного гибридного метода сравнивались с регрессором на базе исключительно блоков СНС. Регрессор на основе СНС состоял из трех модулей СНС с 32, 64 и 128 фильтрами (размеры ядер 5, 5 и 3), за каждым из которых следовали слои BatchNorm, LeakyReLU и MaxPooling, и завершался глобальным усреднением пулинга.

Предложенный гибридный метод обучался и тестировался на базе платформы 14-ядерного процессора Intel Xeon W-2275 и 128 ГБ оперативной памяти и графического процессора NVIDIA Quadro RTX 6000 с 24 ГБ видеопамати. В качестве программных сред разработки применялись Python и CUDA для поддержки вычислений на GPU с фреймворком глубокого обучения PyTorch.

Результаты исследований и анализ многомерных данных

Различия в положении, размерах и локальные неоднородности отдельных микрорезонаторов в кластере приводят к разбросу в динамике их откликов на процессы осаждения биохимических объектов. С использованием откликов микрорезонаторов в качестве признаков для метода главных компонент может быть определен обобщенный отклик кластеров в пространстве адаптированных признаков (АП1) [13, 14]. Однако для корректного многоканального анализа необходимо также обеспечение согласованности сигналов различных кластеров. Данный вопрос исследовался на примере детектирования альбумина (BSA – bovine serum albumin), разведенного в фосфатном буферном растворе (PBS – phosphate buffer solution), с концентрациями от 0,02 до 0,10 %. Измерения проводились двумя функционализированными кластерами, интегрированными на одном чипе, где между циклами измерений выполнялась регенерация кластера.

Приведенные на рис. 1 результаты экспериментальных измерений указывают на высокую степень согласованности обобщенных спектральных откликов для всех стационарных состояний. На рис. 1, а показана согласованность откликов в воде (0), фосфатном буфере PBS (1), в регенерирующем растворе NaOH (2) и в растворе альбумина BSA (для 0,02 % (3), 0,06 % (4) и 0,10 % (5)). Это подтверждает воспроизводимость, а также корректность процедур измерений и адаптации доменов кластеров.

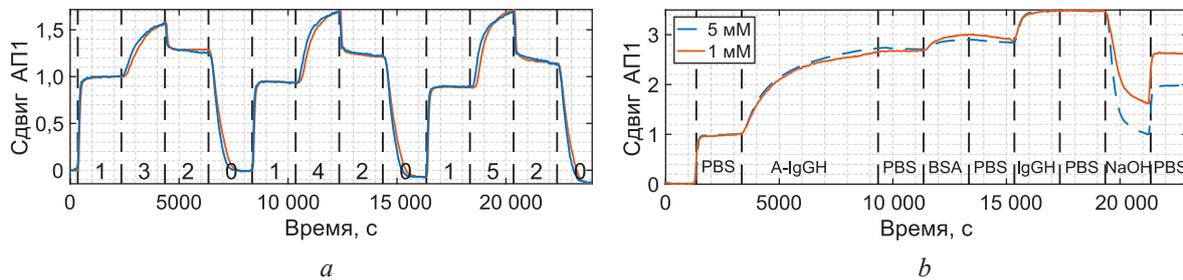


Рис. 1. Полученные результаты: *a* – согласованности откликов в воде (0), в PBS (1), NaOH (2) и в BSA (для 0,02 % (3), 0,06 % (4), 0,10 % (5)); *b* – влияния концентрации регенерационного раствора (1 и 5 мМ NaOH) на определение человеческого иммуноглобулина (IgGH)

Fig. 1. The obtained results: *a* – consistency of responses in water (0), in PBS (1), NaOH (2) and in BSA (for 0.02 % (3), 0.06 % (4), 0.10 % (5)); *b* – the effect of the concentration of the regeneration solution (1 and 5 mM NaOH) on the determination of human immunoglobulin (IgGH)

Динамические отклики при различных концентрациях альбумина согласуются с аналитической моделью осаждения малых молекул, а незначительное (<5 %) уменьшение уровня воды для обоих кластеров в течение 24 000 с связано с температурным фактором. Постоянная разница во времени начала отклика между кластерами в 60 с связана с их различным положением на чипе, где для одного наблюдается ускорение процесса осаждения. Для всех измеренных концентраций различие в величине обобщенного отклика по прошествии 2000 с между кластерами не превышало уровень шума. Таким образом, подтверждена согласованность результатов измерений, полученных с использованием гетерогенных кластеров, что обеспечивает возможность формирования масштабируемых и разнообразных наборов данных с учетом вариативности различных кластерных конфигураций.

Применение кластерной архитектуры позволяет в рамках единого чипа выполнять отдельный анализ множества физических, биохимических реакций, а также неспецифических объемных характеристик, без привлечения внешних эталонных приборов. В качестве характерной и методологически показательной задачи многопараметрического детектирования был выбран иммуноанализ. Исследовали возможность детектирования двух типов иммуноглобулина G, взятого из кроличьей (IgGR) и человеческой (IgGH) сыворотки. Подходящий для данной задачи чип содержал как минимум два кластера. Они были функционализированы комплементарными молекулами (A-IgGR и A-IgGH), которые избирательно взаимодействовали с IgGR и IgGH. Результаты измерений откликов кластеров микрорезонаторов в процессе функционализации, формирования связки A-IgG-IgG и регенерации сенсора для удаления осажденных биохимических объектов представлены на рис. 1, *b*.

Функционализация в течение 4000 с не приводит к достижению уровня насыщения для обобщенного сдвига, где при дальнейшей прокачке 5 мкг/мл IgGH наблюдается схожая динамика (рис. 1, *b*). Полученный результат указывает на присутствие свободных аминогрупп после выполнения функционализации. Регенерация чипа раствором 5 мМ NaOH показала снижение уровня сигнала базового раствора относительно уровня, достигнутого при функционализации, что связано с частичным разрушением функционального слоя. На основании данных результатов предложено увеличить длительность функционализации до 6000 с. Также введена процедура блокировки аминогрупп 0,01%-ным раствором альбумина для связывания со свободными аминогруппами (рис. 1, *b*).

В процессе функционализации достигается стационарное состояние, а в ходе прокачки альбумина регистрируется малый сдвиг, что указывает на его связывание с остаточными аминогруппами. При прокачке 5 мкг/мл IgGH наблюдался динамичный отклик, который достигал уровня насыщения в течение 2000 с и характеризовался многократным ростом кинетического коэффициента связывания по сравнению с ранее полученными результатами. Регенерация 5 мМ NaOH приводит к частичному разрушению функционального слоя. Однако при уменьшении концентрации до 1 мМ достигается восстанавливаемость сигнала в базовой среде. Данная последовательность фаз масштабировалась для других концентраций и типов иммуноглобулинов, что позволило сформировать согласованный набор измерений для растворов IgGR и IgGH с концентрациями в диапазоне 0,1–5,0 мкг/мл.

Набор измеренных данных состоял из более 200 тыс. наблюдений, включая технические повторения, для которых определялись три класса (IgGH, IgGR и Mix). В ходе экспериментов установлено, что классификационные модели с более глубокими сверточными слоями, а также с добавлением дополнительных сверточных слоев или BiLSTM, делали модель более чувствительной к выбору фрагмента для валидации, в конечном счете не улучшая итоговую точность. Особенно это проявлялось при ограничении временного диапазона обработки, когда фиксировалось переобучение. Также отмечалась чувствительность классификационного метода к уровню регуляризации, заданному через слой dropout. Исходя из заранее принятой стратегии в рамках гибридного метода, для обучения и тестирования использовалась легковесная модель. Результаты классификации типов биохимических растворов показали возможность обеспечения точности более 99 %, что приводит к пренебрежимо малой вероятности переноса ошибки на следующую фазу регрессии. Наименьшая точность (98 %) выявлена для смешанных растворов, что в первую очередь связано с ограниченностью повторений всех возможных комбинаций смесей. Матрица точности для классификационного модуля гибридного метода глубокого обучения приведена в табл. 1.

Таблица 1. Матрица точности для классификационного модуля гибридного метода глубокого обучения
Table 1. Confusion matrix for the classification module of the hybrid deep learning method

Целевой класс	IgGH	98,90	0	1,10
	IgGR	0	99,99	0,01
	Mix	1,41	0,01	98,58
	IgGH		IgGR	Mix
	Предсказанный класс			

В рамках задачи определения концентрации биохимических компонент в растворах было установлено шесть ее уровней: 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2 и 5 мкг/мл. Модель обучалась и подтверждалась с использованием адаптивной k -блочной кросс-валидации. В рассматриваемом случае из-за добавления технических повторений были ограничения как в выборе количества k -блоков, так и в возможности перемешивания наблюдений. Поэтому количество блоков жестко привязывалось к числу фаз наблюдений со всеми техническими повторениями. Тестирование модели по каждой фазе, с одной стороны, предотвращало риск утечки данных из обучения в тест, но с другой – результаты валидации были более зависимы от рассматриваемой фазы в рамках блока. Каждая фаза измерений вместе с техническими повторениями рассматривалась как отдельный блок, а все остальные фазы использовались в качестве обучающей выборки. Стратегия обучения предполагала продолжение обучения до тех пор, пока в течение последних 50 эпох не прекращалось улучшение точности. Флуктуации на наблюдаемом валидационном наборе были связаны с некоторым смещением, заложенным в принятой стратегии кросс-валидации и вызванным спецификой обрабатываемых данных.

Предложенный гибридный метод эффективно анализирует коррелированные отклики с кластеров микрорезонаторов, а также учитывает флуктуации внешних параметров в мультиплексном биохимическом анализе, основанном на концепции решения обратной задачи определения концентрации компонент растворов. Модель полностью исключает ошибки определения уровня концентрации при временной выборке динамических откликов менее 5 мин. При этом сеть на основе гибридного метода глубокого обучения показала медианную точность определения концентрации 2 нг/мл для всей совокупности измеренных экспериментальных данных. Таким образом, точность гибридного метода глубокого обучения ограничена фундаментальным пределом детектирования оптического сенсора.

Заключение

1. Представлен гибридный метод глубокого обучения для решения обратной задачи детектирования типа и концентрации компонентов биохимического раствора. Данный метод, интегрированный в биосенсорную систему с более чем тысячей микрополостей, сгруппированных

в чувствительные области на едином чипе, позволяет выполнять высокопроизводительный мультиплексный оптический биосенсорный анализ. Гибридный метод сочетает модули сверточных нейронных сетей, двунаправленные сети долгой краткосрочной памяти и трансформерные энкодеры, таким образом обеспечивая динамический мониторинг сложных комбинированных растворов.

2. В ходе многочисленных циклов зондирования предлагаемый метод на примере многокомпонентной гетерогенной системы из девяти чипов продемонстрировал определение классификационного типа биохимического соединения с точностью более 98 % и концентрации с медианной точностью до 2 нг/мл. Модульность структуры гибридного метода глубокого обучения обеспечивает возможность масштабирования решения на другие типы компонентов биохимических растворов, которые могут быть использованы в режиме реального времени.

Список литературы / References

1. Zou H., Zhou Z., Huang M., Li W., Yang M., Zhao X., et al. (2025) NFC/RFID-Enabled Wearables and Implants for Biomedical Applications. *Microsystems & Nanoengineering*. 11. <https://doi.org/10.1038/s41378-025-01010-5>.
2. Pfeiffer M., Schaeuble M., Nieto J., Siegart R., Cadena C. (2017) From Perception to Decision: A Data-Driven Approach to End-to-End Motion Planning for Autonomous Ground Robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989182. 1527–1533.
3. Han Gr., Goncharov A., Eryilmaz M., Ye S., Palanisamy B., Ghosh R., et al. (2025) Machine Learning in Point-of-Care Testing: Innovations, Challenges, and Opportunities. *Nature Communications*. 16. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-58527-6>.
4. Fei N., Lu Z., Gao Y., Yang G., Huo Y., Wen J., et al. (2022) Towards Artificial General Intelligence Via a Multimodal Foundation Model. *Nature Communications*. 13. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30761-2/>.
5. Saetchnikov I., Tcherniavskaia E., Skakun V. (2021) Object Detection for Unmanned Aerial Vehicle Camera Via Convolutional Neural Networks. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*. 2 (2), 98–103. DOI: 10.1109/JMASS.2020.3040976.
6. Vollmer F., Arnold S. (2008) Whispering-Gallery-Mode Biosensing: Label-Free Detection Down to Single Molecules. *Nature Methods*. 5 (7), 591–596.
7. Foreman M. R., Swaim J. D., Vollmer F. (2015) Whispering Gallery Mode Sensors. *Advances in Optics and Photonics*. 7 (2), 168–240.
8. Jiang X., Qavi A. J., Huang S. H., Yang L. (2020) Whispering-Gallery Sensors. *Matter*. 3 (2), 371–392.
9. Arnold S., Khoshima M., Teraoka I., Holler S., Vollmer F. (2003) Shift of Whispering-Gallery Modes in Microspheres by Protein Adsorption. *Optics Letters*. 28 (4), 272–274.
10. Baaske M. D., Foreman M. R., Vollmer F. (2014) Single-Molecule Nucleic Acid Interactions Monitored on a Label-Free Microcavity Biosensor Platform. *Nature Nanotechnology*. 9 (11), 933–939.
11. Liao J., Yang L. (2021) Optical Whispering-Gallery Mode Barcodes for High-Precision and Wide-Range Temperature Measurements. *Light: Science & Applications*. 10.
12. Bianchetti A., Federico A., Vincent S., Subramanian S., Vollmer F. (2017) Refractometry-Based Air Pressure Sensing Using Glass Microspheres as High-Q Whispering-Gallery Mode Microresonators. *Optics Communications*. 394, 152–156.
13. Eryürek M., Tasdemir Z., Karadag Y., Anand S., Kilinc N., Alaca B. E., et al. (2017) Integrated Humidity Sensor Based on SU-8 Polymer Microdisk Microresonator. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 242 (10), 1115–1120.
14. Saetchnikov A., Tcherniavskaia E., Saetchnikov V., Ostendorf A. (2020) Deep-Learning Powered Whispering Gallery Mode Sensor Based on Multiplexed Imaging at Fixed Frequency. *Opto-Electronic Advances*. 3 (11).
15. Saetchnikov A., Tcherniavskaia E., Saetchnikov V., Ostendorf A. (2021) Intelligent Optical Microresonator Imaging Sensor for Early Stage Classification of Dynamical Variations. *Advanced Photonics Research*. 7.
16. Saetchnikov I., Tcherniavskaia E., Ostendorf A., Saetchnikov A. (2024) Induced Eccentricity Splitting in Disordered Optical Microspheres for Machine Learning Enabled Wavemeter. *Arxiv 2412.08339*.
17. Saetchnikov A., Tcherniavskaia E., Saetchnikov V., Ostendorf A. (2023) Detection of Per- and Polyfluoroalkyl Water Contaminants with a Multiplexed 4D Microcavities Sensor. *Photonics Research*. 11.
18. Saetchnikov A., Tcherniavskaia E., Saetchnikov V., Ostendorf A. (2024) Two-Photon Polymerization of Optical Microresonators for Precise pH Sensing. *Light: Advanced Manufacturing*. 5.

Поступила 12.12.2025

Принята в печать 20.01.2026

Received: 12 December 2025

Accepted: 20 January 2026

Вклад авторов

Саечников И. В. разработал и реализовал гибридный метод глубокого обучения, провел анализ многомерных результатов с оптических сенсоров.

Чернявская Э. А. выполнила теоретический анализ.

Саечников А. В. разработал и реализовал концепцию модульной сенсорной платформы на основе кластеров оптических микрорезонаторов.

Authors' contribution

Saetchnikov I. developed and implemented a hybrid deep learning method and conducted an analysis of multidimensional results from optical sensors.

Tcherniavskaia E. performed the theoretical analysis.

Saetchnikov A. developed and implemented the concept of a modular sensor platform based on clusters of optical microresonators.

Сведения об авторах

Саечников И. В., ст. преп., Белорусский государственный университет (БГУ)

Чернявская Э. А., д-р физ.-мат. наук, проф., БГУ

Саечников А. В., канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., БГУ

Адрес для корреспонденции

220064, Республика Беларусь,
Минск, ул. Курчатова, 1
Белорусский государственный университет
Тел.: +375 17 398-70-42
E-mail: saetchnikovivan@gmail.com
Саечников Иван Владимирович

Information about the authors

Saetchnikov I., Senior Lecturer, Belarusian State University (BSU)

Tcherniavskaia E., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, BSU

Saetchnikov A., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Researcher, BSU

Address for correspondence

220064, Republic of Belarus,
Minsk, Kurchatova St., 1
Belarusian State University
Tel.: +375 17 398-70-42
E-mail: saetchnikovivan@gmail.com
Saetchnikov Ivan



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-21-29>

UDC 621.396.218:614.89.086.5

PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE DOWNLINK RADIO CHANNELS SPECTRAL EFFICIENCY IN MACRO-SITES OF 5G MOBILE COMMUNICATIONS

VLADIMIR MORDACHEV

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

Abstract. Mathematical models for the analysis of probabilistic characteristics of the spectral efficiency of downlink radio channels in macro-sites of mobile (cellular) radio communications have been developed, and estimates of the probability distributions and average values of the potential and real spectral efficiency of downlink radio channels have been made for various variants of the typical IMT-2020 scenarios “Rural-eMBB”, “Urban Macro-mMTC” and “Urban Macro-URLLC”. Obtained models and estimates take into account the randomness of the user’s equipment distribution on the macro-site territory and the possibility of user’s equipment location in areas of both free and interference (multi-ray) propagation of radio waves between the base station and user’s equipment. These results allow us to conclude that the declarations of new generations of mobile communications in terms of increasing the spectral efficiency of radio channels at the 4G→5G→6G evolution are feasible.

Keywords: mobile (cellular) communications, 5G, eMBB, mMTC, URLLC, spectrum efficiency, base station, user’s equipment, downlink radio channel, probability distribution.

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

For citation. Mordachev V. (2026) Probabilistic Characteristics of the Downlink Radio Channels Spectral Efficiency in Macro-Sites of 5G Mobile Communications. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 21–29. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-21-29>.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НИСХОДЯЩИХ РАДИОКАНАЛОВ В МАКРОСАЙТАХ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ РАДИОСВЯЗИ 5G

В. И. МОРДАЧЕВ

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

Аннотация. Разработаны математические модели для анализа вероятностных характеристик спектральной эффективности нисходящих радиоканалов в макросайтах систем мобильной (сотовой) радиосвязи, выполнены оценки вероятностных распределений и средних значений потенциальной и реальной спектральной эффективности нисходящих радиоканалов для различных вариантов типовых сценариев IMT-2020 “Rural-eMBB”, “Urban Macro-mMTC” и “Urban Macro-URLLC”. Полученные модели и оценки учитывают случайность местоположения абонентских терминалов на территории макросайта и возможность присутствия в нем областей как свободного, так и интерференционного (многолучевого) распространения радиоволн между базовой станцией и абонентскими терминалами. Эти результаты позволяют сделать вывод о реализуемости деклараций новых поколений мобильной радиосвязи в части повышения спектральной эффективности радиоканалов в процессе эволюции 4G→5G→6G.

Ключевые слова: мобильная (сотовая) связь, 5G, eMBB, mMTC, URLLC, спектральная эффективность, базовая станция, абонентский терминал, нисходящий радиоканал, распределение вероятности.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев, В. И. Вероятностные характеристики спектральной эффективности нисходящих радиоканалов в макросайтах систем мобильной радиосвязи 5G / В. И. Мордачев // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 21–29. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-21-29>.

Introduction

When analyzing scenarios for the implementation of cellular (mobile) communication (MC) systems and services in areas with large site sizes (base station service areas), it is necessary to take into account a large range of possible values of distances between the base station (BS) and user's equipment (UE), randomly distributed over the BS service area. This circumstance is the reason of the large dynamic range of useful signal levels at the inputs of radio receivers of many UEs, determining the values of the *SNIR* parameter – the signal-to-(noise+interference) ratio in the downlink radio channels. The randomness of the UE location relative to the BS is the reason for the randomness of the *SNIR* values and, as a consequence, the randomness of the spectral efficiency W_R [bit/s/Hz] of the “BS-UE” radio channels and its impact on the average wireless area traffic capacity [bit/s/m²] in the BS service area. The latter determines the relevance of taking into account the randomness of the *SNIR*, W_R values when analyzing the electromagnetic background intensity created by modern and future MC systems, using the methods of [1, 2].

The goal of this paper is to substantiate probabilistic-statistical models and analyze probabilistic-statistical characteristics of the spectral efficiency of “BS-UE” radio channels in macro sites of 5G MC systems when implementing typical IMT-2020 scenarios [3] “Rural-eMBB”, “Urban Macro-mMTC” and “Urban Macro-URLLC”.

Initial models and expressions

When analyzing probabilistic characteristics of the downlink radio channel spectral efficiency in MC systems with macro-sites of a relatively large area, we use the following well-known models.

1. The macro-site model shown in Fig. 1, in which H_{BS} is the height of the BS antenna phase center above the surface; H_{UE} is the UE height above the surface corresponding to human height; R is a random distance between the BS antenna and an arbitrary UE; R_{BP} is the radius of the BS vicinity, in which the free-space model of radio waves propagation (RWP) between BS and UE can be used (“break-point” vicinity); R_m is the distance between the boundary of free-space RWP region and the BS antenna; R_{max} is the radius of BS service area (macro-site). Typical parameters of this model for macro-sites of IMT-2020 (5G) MC, corresponding to [3], are given in Tab. 1.

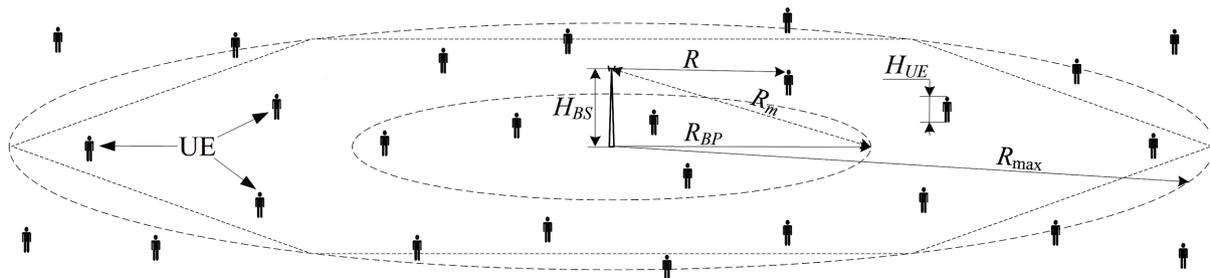


Fig. 1. Macro-site model in the IMT-2020 MC system

Table 1. Macro-site parameters for different options of typical IMT-2020 scenarios

5G Scenario, option No	Configuration	Carrier frequency, GHz/ Wavelength, m	$R_{max}^{1)}$, m	H_{BS} , m	H_{UE} , m	R_{BP} , m
1. Rural-eMBB	A	0.7 / 0.43	1200	35	1.5	490
2. Rural-eMBB	B	4.0 / 0.075	1200	35	1.5	2800
3. Rural-eMBB	C (LMLC)	0.7 / 0.43	4000	35	1.5	490
4. Urban Macro-mMTC	A	0.7 / 0.43	350	25	1.5	350
5. Urban Macro-mMTC	B	0.7 / 0.43	1200	25	1.5	350
6. Urban Macro-URLLC	A	4.0 / 0.075	350	25	1.5	2000
7. Urban Macro-URLLC	B	0.7 / 0.43	1200	25	1.5	350

¹⁾Accepted to be equal to 2/3 of the typical value of “Inter-site distance” proposed in [3].

2. Model [4, formula (2)] of the conditions of RWP between BS and UE in the BS service area as the dependence of the power flux density Z [W/m²] of the electromagnetic field of the BS with the equivalent isotropically radiated power (EIRP) P_e [W] at the point of UE placement, on the distance R from the BS antenna:

$$Z = \begin{cases} \frac{P_e}{4\pi R^2} & R \leq R_{BP}; \\ \frac{R_{BP}^2 P_e}{4\pi R^4} & R > R_{BP}; \end{cases} \quad R_{BP} = \frac{4H_{UE}H_{BS}}{\lambda}, \quad (1)$$

where λ is the wavelength of BS electromagnetic radiation, m.

As the UE moves away from the BS, the nature of RWP between BS and UE changes. If for $R \leq R_{BP}$, the RWP conditions are as in free space, then for $R > R_{BP}$, the conditions of RWP to the UE are determined by the interference of the direct and reflected from the surface rays. The calculated values of R_{BP} radius of the BS “breakpoint vicinity” for various options of macro-sites of typical IMT-2020 scenarios are given in Tab. 1. They allow us to conclude that for options No 2, 4 and 6 $R_{BP} \geq R_{max}$, which make it possible to use the free-space RWP model (the upper branch of the model (1)) for the entire territory of the macro-site, however, for options No 1, 3, 5 and 7 $R_{BP} \ll R_{max}$, and for the large part of the macro-site territory, the interference (multi-ray) model of RWP between BS and UE (the lower branch of the model (1)) must be used. At the same time, for macro-sites, in contrast to 5G micro- and pico-sites, the sizes of which are significantly smaller than the BS “breakpoint vicinity”, the difference between the R_{BP} and R_m values is insignificant (less than 0.3 %), which allows us to consider $R_{BP} \approx R_m$.

3. The model of the “BS-UE” radio channel, the potential capacity C_p [bit/s] of which is related to its bandwidth ΔF [Hz] and the potential “signal-to-noise plus interference” $SNIR_p$ in this radio channel by a relationship similar in appearance to the well-known Shannon – Hartley model for an analog communication channel with Gaussian noise:

$$C_p = \Delta F \log_2(1 + SNIR_p) = \log_2\left(1 + \frac{P_S}{P_{NI}}\right), \quad SNIR_p = \frac{P_S}{P_{NI}}; \quad W_p = \frac{C_p}{\Delta F} = \log_2(1 + SNIR_p), \quad (2)$$

where P_S is the useful signal power in this channel, W; P_{NI} is the total power of noise and intra-system interference in the ΔF band (assuming that the effect of wideband co-channel interference in MC networks on the capacity of their radio channels is similar to the effect of Gaussian noise of the same power), W; W_p is the potential spectral efficiency of data transmission over this radio channel, bit/s/Hz.

The 5G macro-site parameters given in Tab. 1 and model (1) allow us to estimate the expected $SNIR_p$ levels ratio at different UE distances from the BS for the fixed BS EIRP ($P_e = \text{const}$). Estimates of the values of this parameter for R_{BP} and H_{BS} distances, provided that its minimum value $SNIR_{p2min}$ corresponding to the boundary of the BS service area ($R = R_{max}$) is 10, are given in Tab. 2.

Table 2. $SNIR_p$ value boundaries for the H_{BS} , R_{BP} and R_{max} distances between base station and user’s equipment

5G Scenario, option No	Configuration	$SNIR_{p2min}$ ($R = R_{max}$)	$SNIR_{p2max}$ ($R = R_{BP}$)	$SNIR_{p1max}$ ¹⁾ ($R = H_{BS}$)	$SNIR_{p1max}$, dB ($X = 10$)
1. Rural-eMBB	A	$X = 10$	$Y = X \cdot 36$	$Y \cdot 196 = 70\,560$	48.5
2. Rural-eMBB	B	$X = 10$	$R_{max} \leq R_{BP}$	$X \cdot 1176 = 11\,760$	40.7
3. Rural-eMBB	C (LMLC)	$X = 10$	$Y = X \cdot 4440$	$Y \cdot 196 = 8\,700\,000$	69.4
4. Urban Macro–mMTC	A	$X = 10$	$R_{max} \leq R_{BP}$	$X \cdot 196 = 1960$	32.9
5. Urban Macro–mMTC	B	$X = 10$	$Y = X \cdot 138$	$Y \cdot 196 = 271\,000$	54.3
6. Urban Macro–URLLC	A	$X = 10$	$R_{max} \leq R_{BP}$	$X \cdot 196 = 1960$	32.9
7. Urban Macro–URLLC	B	$X = 10$	$Y = X \cdot 138$	$Y \cdot 196 = 271\,000$	54.3

¹⁾ Estimates of the $SNIR_{p1max}$ value for BS with sector antennas are optimistic, since their EIRP in the vertical direction is significantly less than in the main lobe; a similar level of useful signal is possible when using in BS adaptive active phased antenna arrays (APAA) “Massive MIMO” in the “Beamforming” mode.

In a real radio channel, due to the imperfection of the encoding/decoding and modulation/demodulation processes, its spectral efficiency is m times lower than the potential one. In order to ensure a data transfer rate equal to C_p in a real radio channel with a spectral efficiency reduced by m times, it is neces-

sary to increase the value of the logarithmic factor in (2) by m times, which is possible due to a corresponding increase in the signal/(noise+interference) ratio to the really necessary $SNIR_R$ level:

$$\left. \begin{aligned} m \log_2(1 + SNIR_P) &= \log_2(1 + SNIR_R) = \log_2\left((1 + SNIR_P)^m\right); & 1 + SNIR_R &= (1 + SNIR_P)^m; \\ 1 + SNIR_P &= (1 + SNIR_R)^{\frac{1}{m}}; & SNIR_P &= (1 + SNIR_R)^{\frac{1}{m}} - 1 \approx SNIR_R^{1/m}; & SNIR_R &\approx SNIR_P^m. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Thus, the spectral efficiency W_R of a real radio channel is related to the real value of the $SNIR_R$ by the following relationship:

$$W_R = \frac{W_P}{m} = \frac{\log_2(1 + SNIR_P)}{m} = \frac{\log_2(1 + SNIR_R)^{\frac{1}{m}}}{m} = \frac{\log_2(1 + SNIR_R)}{m^2} \approx \frac{\log_2 SNIR_R}{m^2}. \quad (4)$$

Probabilistic characteristics of the “BS-UE” radio channels spectral efficiency for user’s equipment from the base station breakpoint vicinity

With a constant BS EIRP, free space RWP, and a random uniform UE distribution over the BS breakpoint vicinity, the probability distribution density (p.d.d.) $w(P_S)$ of the power of the BS useful signal at the input of the UE radio receivers has the following form [2, 5]:

$$w_1(P_S) = \frac{P_{\min 1} P_{\max 1}}{(P_{\max 1} - P_{\min 1}) P_S^2}, \quad P_{\min 1} < P_S < P_{\max 1}; \quad P_{\min 1} = \frac{\lambda^2 G_{UE} P_e}{16\pi^2 R_{BP}^2}, \quad P_{\max 1} = \frac{\lambda^2 G_{UE} P_e}{16\pi^2 R_{BS}^2}, \quad (5)$$

where G_{UE} is the UE antenna gain.

If the power P_S of useful signal at the inputs of UE radio receivers is random, then the potential spectral efficiency W_{P1} of each of the “BS-UE” radio channels with free-space RWP is also random, changing within the following limits:

$$W_{P1} \in [W_{P1\min}, W_{P1\max}], \quad W_{P1\min} = \log_2\left(1 + \frac{P_{\min 1}}{P_{NI}}\right), \quad W_{P1\max} = \log_2\left(1 + \frac{P_{\max 1}}{P_{NI}}\right); \quad (6)$$

in further analysis, the total noise and interference power in the UE reception band ΔF will be assumed to be constant: $P_{NI} \approx \text{const}$. Due to the monotonic dependence $W_P(P_S)$ in (2), the p.d.d. $w(W_{P1})$ of the potential spectral efficiency of radio channels “BS-UE” of the entire set of UE from BS “breakpoint vicinity” can be determined in the following well-known way:

$$w(W_{P1}) = w(P_S(W_{P1})) \left| \frac{dP_S(W_{P1})}{dW_{P1}} \right|, \quad W_{P1} \in [W_{P1\min 1}, W_{P1\max}], \quad (7)$$

where $P_S(W_P)$ is the inverse function (1) for free-space RWP.

Transformations (7) allows us to obtain the following analytical expression for the p.d.d. of the potential spectral efficiency of the “BS-UE” radio channel for the region $H_{BS} \leq R \leq R_{BP}$:

$$\left. \begin{aligned} w(W_{P1}) &= \frac{(2^{W_{P1\min}} - 1)(2^{W_{P1\max}} - 1) \cdot 2^{W_{P1}} \cdot \ln(2)}{(2^{W_{P1\max}} - 2^{W_{P1\min}})(2^{W_{P1}} - 1)^2}, & W_{P1} &\in [W_{P1\min}, W_{P1\max}]; \\ W_{P1\min} &= \log_2\left(1 + \frac{P_{\min 1}}{P_{NI}}\right) = \log_2(1 + SNIR_{P1\min}); \\ W_{P1\max} &= \log_2\left(1 + \frac{P_{\max 1}}{P_{NI}}\right) = \log_2(1 + SNIR_{P1\max}); \\ SNIR_{P1\max} &= SNIR_{P1\min} \frac{R_{BP}^2}{H_{BS}^2} = SNIR_{P1\min} \frac{16H_{UE}^2}{\lambda^2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Taking into account the relationship (4) between the potential and real spectral efficiency, using a procedure similar to (7), it is possible to determine the p.d.d. $w(W_{R1})$ and the mathematical expect-

tation $m_1(W_{R1})$ of radio channels “BS-UE” real spectral efficiency for the region $H_{BS} \leq R \leq R_{BP}$ under the assumption that (4) is constant and does not depend on the UE distance from the BS:

$$\left. \begin{aligned} w(W_{R1}) &= \frac{(2^{mW_{R1\min}} - 1)(2^{mW_{R1\max}} - 1)2^{mW_{R1}} \cdot m \cdot \ln(2)}{(2^{mW_{R1\max}} - 2^{mW_{R1\min}})(2^{mW_{R1}} - 1)^2}, \quad W_{R1} \in [W_{R1\min}, W_{R1\max}]; \\ W_{R1\min} &= \frac{W_{P1\min}}{m} = \frac{\log_2(1 + SNIR_{R1\min})}{m^2}; \quad W_{R1\max} = \frac{W_{P1\max}}{m} = \frac{\log_2(1 + SNIR_{R1\max})}{m^2}; \\ SNIR_{R1\min} &= (1 + SNIR_{P1\min})^m - 1 \approx SNIR_{P1\min}^m; \quad SNIR_{R1\max} = (1 + SNIR_{P1\max})^m - 1 \approx SNIR_{P1\max}^m; \\ m_{11}(W_{R1}) &= \int_{W_{R1\min}}^{W_{R1\max}} W_{R1} w(W_{R1}) dW_{R1}. \end{aligned} \right\} (9)$$

Relations (8), (9) characterize the randomness of the “BS-UE” radio channels spectral efficiency in 5G scenarios corresponding to the even options of Tab. 1, for which the RWP conditions in free space correspond to the entire BS service area.

Probabilistic characteristics of the “BS-UE” radio channels spectral efficiency for user’s equipment outside the base station breakpoint vicinity

With a constant BS EIRP, multi-ray RWP, and a random uniform UE distribution over the ring area $R_{BP} \leq R \leq R_{\max}$ outside the BS breakpoint vicinity, the p.d.d. $w_2(P_S)$ and $w_2(SNIR_{P2})$ of the BS useful signal power P_S and the potential ratio $SNIR_{P2}$ at the input of the UE radio receivers, has the following form, determined using the lower branch of model (1) and a procedure similar to (7):

$$w_2(P_S) = \frac{\sqrt{P_{\min 2} P_{\max 2}}}{(\sqrt{P_{\max 2}} - \sqrt{P_{\min 2}}) 2P_S^{3/2}}, \quad P_{\min 2} = \frac{R_{BP}^2 P_e}{4\pi R_{\max}^4} < P_S < P_{\max 2} = P_{\min 1} = \frac{P_e}{4\pi R_{BP}^2}. \quad (10)$$

Then, with the use of a procedure similar to (7), for the considered conditions the type of the p.d.d. $w(W_{P2})$ and $w(W_{R2})$ of potential and real spectral efficiency of the “BS-UE” radio channels for the region $R_{BP} \leq R \leq R_{\max}$, and also the mathematical expectation $m_1(W_{R2})$ are determined:

$$\left. \begin{aligned} w(W_{P2}) &= \frac{2^{W_{P2} - 1} \cdot \ln(2) \cdot \sqrt{(2^{W_{P2\min}} - 1)(2^{W_{P2\max}} - 1)}}{(\sqrt{2^{W_{P2\max}} - 1} - \sqrt{2^{W_{P2\min}} - 1})(2^{W_{P2}} - 1)^{3/2}}, \quad W_{P2} \in [W_{P2\min}, W_{P2\max}]; \\ W_{P2\min} &= \log_2(1 + SNIR_{P2\min}); \quad W_{P2\max} = \log_2(1 + SNIR_{P2\max}); \quad SNIR_{P2\max} = SNIR_{P2\min} \frac{R_{\max}^4}{R_{BP}^4}. \end{aligned} \right\} (11)$$

$$\left. \begin{aligned} w(W_{R2}) &= \frac{2^{mW_{R2} - 1} \cdot m \cdot \ln(2) \cdot \sqrt{(2^{mW_{R2\min}} - 1)(2^{mW_{R2\max}} - 1)}}{(\sqrt{2^{mW_{R2\max}} - 1} - \sqrt{2^{mW_{R2\min}} - 1})(2^{mW_{R2}} - 1)^{3/2}}, \quad W_{R2} \in [W_{R2\min}, W_{R2\max}]; \\ W_{R2\min} &= \frac{\log_2(1 + SNIR_{R2\min})}{m^2}; \quad W_{R2\max} = \frac{\log_2(1 + SNIR_{R2\max})}{m^2}; \\ SNIR_{R2\min} &= (1 + SNIR_{P2\min})^m - 1 \approx SNIR_{P2\min}^m; \quad SNIR_{R2\max} = (1 + SNIR_{P2\max})^m - 1 \approx SNIR_{P2\max}^m; \\ SNIR_{P2\min} &= \frac{P_{\min 2}}{P_{NI}} = \frac{\lambda^2 G_{UE} R_{BP}^2 P_e}{16\pi^2 P_{NI} R_{\max}^4}, \quad SNIR_{P2\max} = \frac{\lambda^2 G_{UE} P_e}{16\pi^2 P_{NI} R_{BP}^2}; \quad \frac{SNIR_{P2\max}}{SNIR_{P2\min}} = \frac{R_{\max}^4}{R_{BP}^4}; \\ m_{12}(W_{R2}) &= \int_{W_{R2\min}}^{W_{R2\max}} W_{R2} w(W_{R2}) dW_{R2}. \end{aligned} \right\} (12)$$

Relations (11), (12) describe the randomness of the potential and real spectral efficiency of “BS-UE” radio channels for UEs from the interference RWP region under 5G scenarios corresponding to the odd options of Tab. 1. The form of $w(W_{P1})$ and $w(W_{P2})$ for $SNIR_{P1min} = SNIR_{P2min} = 10$ and $SNIR_{P1max}, SNIR_{P2max} \in [10^3, 10^4, 10^5]$ is shown in Fig. 2. The form of $w(W_{R1})$ and $w(W_{R2})$ for $SNIR_{P1min} = SNIR_{P2min} = 10$; $SNIR_{P1max} = SNIR_{P2max} = 10^3$ and different m are shown in Fig. 3.

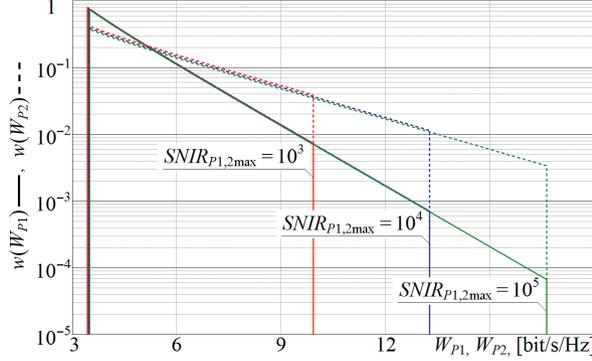


Fig. 2. Curves $w(W_{P1})$ (solid lines) and $w(W_{P2})$ (dashed lines) at $SNIR_{P1min} = SNIR_{P2min} = 10$ and $SNIR_{P1max}, SNIR_{P2max} \in [10^3, 10^4, 10^5]$

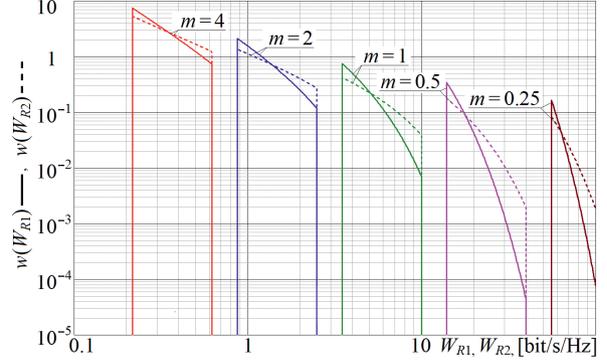


Fig. 3. Curves $w(W_{R1})$ (solid lines) and $w(W_{R2})$ (dashed lines) at $SNIR_{P1min} = SNIR_{P2min} = 10$; $SNIR_{P1max} = SNIR_{P2max} = 10^3$ and $m \in [0.25, 4]$

Probabilistic characteristics of the “BS-AT” radio channels spectral efficiency for the entire base station service area at $R_{BP} < R_{max}$

If in the BS service area $R_{BP} < R_{max}$, and it contains areas with different RWP conditions, then at a uniform random distribution of UEs over its territory with a constant average density ρ_{UE} [UE/m²], the p.d.d. $w(W_P)$ of the potential and $w(W_R)$ of the real spectral efficiency of “BS-UE” radio channels can be obtained using (8), (9), (11) and (12):

$$w(W_P) = w(W_{P1}) \frac{R_{BP}^2}{R_{max}^2} + w(W_{P2}) \frac{R_{max}^2 - R_{BP}^2}{R_{max}^2}; \quad W_{P1} \in [W_{P1min}, W_{P1max}], \quad W_{P2} \in [W_{P2min}, W_{P2max}], \quad (13)$$

where

$$W_{P1min} = \log_2(1 + SNIR_{P1min}), \quad W_{P1max} = \log_2(1 + SNIR_{P1max}); \quad SNIR_{P1max} = SNIR_{P1min} \frac{R_{BP}^2}{H_{BS}^2};$$

$$W_{P2min} = \log_2(1 + SNIR_{P2min}); \quad W_{P2max} = \log_2(1 + SNIR_{P2max}); \quad SNIR_{P2max} = SNIR_{P2min} \frac{R_{max}^4}{R_{BP}^4};$$

$$SNIR_{P2min} = SNIR_{Pmin}, \quad SNIR_{P2max} = SNIR_{Pmin} \frac{R_{max}^4}{R_{BP}^4} = SNIR_{P1min}; \quad SNIR_{P1max} = SNIR_{Pmin} \frac{R_{max}^4}{R_{BP}^2 H_{BS}^2};$$

$$w(W_R) = w(W_{R1}) \frac{R_{BP}^2}{R_{max}^2} + w(W_{R2}) \frac{R_{max}^2 - R_{BP}^2}{R_{max}^2}; \quad W_{R1} \in [W_{R1min}, W_{R1max}], \quad W_{R2} \in [W_{R2min}, W_{R2max}], \quad (14)$$

where

$$SNIR_{R2min} = (1 + SNIR_{P2min})^m - 1; \quad SNIR_{R2max} = (1 + SNIR_{P2max})^m = SNIR_{R1min};$$

$$SNIR_{R1min} = (1 + SNIR_{P1min})^m - 1; \quad SNIR_{R1max} = (1 + SNIR_{P1max})^m - 1;$$

$$W_{R2min} = \frac{\log_2(1 + SNIR_{R2min})}{m^2}; \quad W_{R2max} = W_{R1min} = \frac{\log_2(1 + SNIR_{R2max})}{m^2} = \frac{\log_2(1 + SNIR_{R1min})}{m^2};$$

$$W_{R1max} = \frac{W_{P1max}}{m} = \frac{\log_2(1 + SNIR_{R1max})}{m^2}; \quad m_1(W_R) = \int_{W_{R2min}}^{W_{R1max}} W_R w(W_R) dW_R; \quad P(W_{R0}) = \int_{W_{R2min}}^{W_{R0}} w(W_R) dW_R.$$

Using the data from Tab. 2, we'll perform an analysis for options No 1, 3, 5, 7 of typical IMT-2020 scenarios, which are characterized by the presence of an interference RWP region in the BS service area. Fig. 4–6 contain the curves of the probability distribution function (p.d.f.) $P(W_{R0})$ presented in (14) for these options for different $m \in [0.25, 4]$ under the assumption that for the UEs at the boundary of the BS service area, the actual $SNIR_{R2min} = 10$ (10 dB), and its actual values for UEs at the outer and inner boundaries of the free-space RWP region correspond to the calculated values $SNIR_{P2max}$ and $SNIR_{P1max}$ in Tab. 2. Fig. 7 shows the dependencies of the mathematical expectation $m_1(W_R)$ given in (14), for all options from Tab. 1, 2.

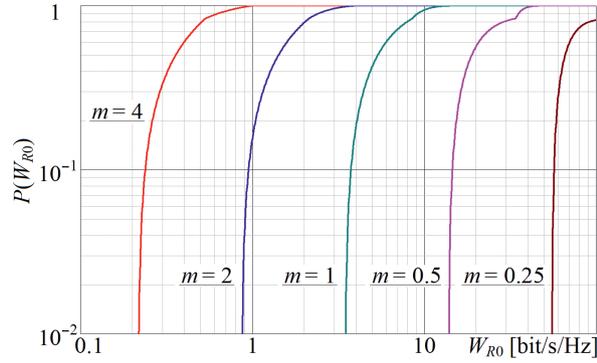


Fig. 4. Curves of p.d.f. $P(W_{R0})$ at different m for macro-sites of option No 1 of typical 5G scenarios

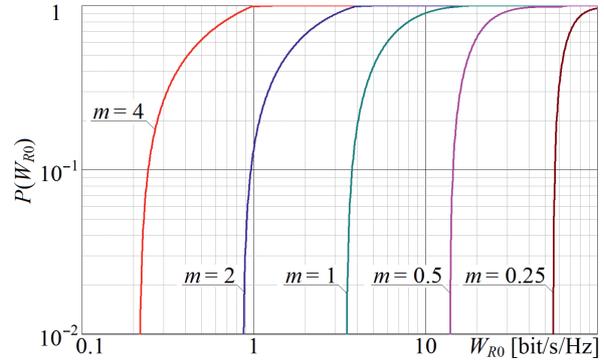


Fig. 5. Curves of p.d.f. $P(W_{R0})$ at different m for macro-sites of option No 3 of typical 5G scenarios

Analysis of the calculated dependencies in Fig. 2–7 indicates the following.

1. The p.d.f. of potential and real spectral efficiency for sets of UE distributed over the freespace RWP region and over the interference RWP region are identical in shape; the difference in the steepness of the decline of their peak is due to the difference in the degree of P_S in (5) and (10).

2. Curves of the p.d.f. $P(W_{R0})$ for different options of typical 5G scenarios at the same values of m , differ relatively little; the kinks in these curves for $m \leq 1$ are due to the limited adequacy of model (1) at distances $R \approx R_{BP}$, where a sudden significant change in the RWP conditions is declared upon transition from the region $R < R_{BP}$ to the region $R > R_{BP}$.

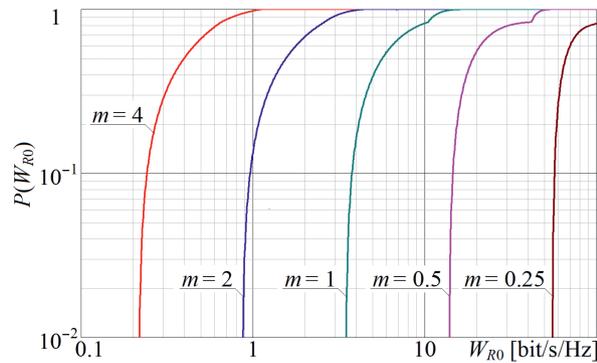


Fig. 6. Curves of p.d.f. $P(W_{R0})$ at different m for macro-sites of options No 5, 7 of typical 5G scenarios

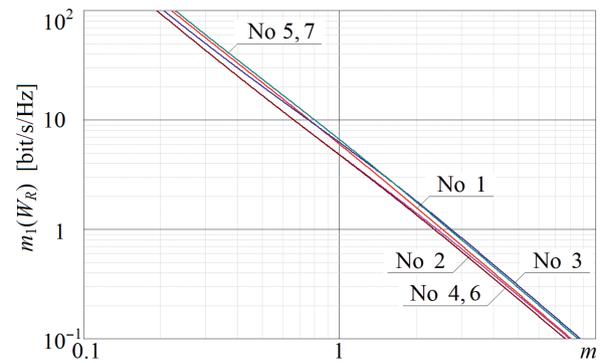


Fig. 7. Dependencies of mathematical expectation $m_1(W_R)$ on m for macro-sites of options No 1–7 of typical IMT-2020 scenarios from Tab. 1, 2

3. Under the adopted conditions of radio reception of BS signal at the boundary of the service area ($SNIR_{R2min} = 10$), the mathematical expectation of real spectral efficiency at $m = \text{const}$ depends relatively little on the scenario option (scattering of values of the “average spectral efficiency per macro-site” $m_1(W_R)$ for different options does not exceed 1.25–1.50), but, as expected, strongly depends on m , which determines the difference in the potential and real spectral efficiency of “BS-UE” radio channels. In Fig. 7, the lower curve for all m corresponds to options 4 and 6, which are characterized by the lowest value of $SNIR_{R1max}$ for UEs located near the BS. For $m \geq 2$, the highest spectral efficiency corresponds to option 3, in which values of signal/(noise + interference) ratio for UEs in the area of free-space RWP

are maximum. For $m < 2$, the highest spectral efficiency corresponds to options 5 and 7, characterized by a large difference in values of R_{\max} and R_{BP} , which, due to dependence (1), determines large levels of the useful signal for UEs in free-space RWP region.

4. Models (8), (9), (11)–(14) presented above allow to obtain only a general introduction of the spectral efficiency probabilistic-statistical characteristics of downlink radio channels of the MC macro-sites, since they are obtained under the assumption of the BS EIRP constancy for all UEs in the BS service area and the BS receiving path operation in the linear mode for any dynamic range of input signals. In real MC radio networks, the BS EIRP cannot be the same for all UEs, at least due to the use of sector antennas with a complex shape of their radiation patterns in the horizontal and vertical planes within the corresponding sector of the BS service area (this difference can be leveled only by the use of the “Massive MIMO” APAA in the “Beamforming” mode [6] or self-focusing APAA [7] in MC BS). In a number of modes of MC radio networks operation, the BS radiation power adjustment in “BS-UE” radio channels is used, which requires the introduction of appropriate changes in models (5), (10) and can significantly affect the form and characteristics of the above probabilistic models. In addition, at very high levels of the useful signal at the UE input, the spectral efficiency of data transmission over the “BS-UE” radio channel can be limited due to nonlinear effects of various nature in the UE receiving path.

Conclusion

1. The models of probabilistic-statistical characteristics of the spectral efficiency of “BS-UE” radio channels in macro sites of the MC systems obtained in this paper, illustrated in relation to the implementation options of the typical 5G scenarios “Rural-eMBB”, “Urban Macro-mMTC” and “Urban Macro-URLLC”, allow us to draw a conclusion about the feasibility of declarations [8, 9] in terms of a multiple increase in spectral efficiency of radio channels at evolution 4G→5G→6G.

2. If in MC radio channels without using MIMO technology $m \approx 2-10$ [10], then in 5G systems MIMO technology provides a gain in spectral efficiency of 2–8 times [11], for 6G systems the growth of radio channels spectral efficiency is declared to be 5–10 times compared to 5G systems [9], and, in general, due to MIMO technology, the spectral efficiency of MC radio channels can be ensured at least at the level of 10–20 bit/s/Hz [12]. Such a level of spectral efficiency on average for 5G macro-sites corresponds to $m \approx 0.5$ (under the conditions adopted above in the analysis), which is quite achievable at the modern technological level.

References

1. Mordachev V. I. (2019) Estimation of Intensity of Electromagnetic Background, Created by Wireless Systems of Public Information Services, on the Base of Forecast of Traffic Terrestrial Density. *Doklady BGUIR*. (2), 39–49. <https://doklady.bsuir.by/jour/article/view/1066> (in Russian).
2. Mordachev V. (2024) Radiofrequency Electromagnetic Pollution of the Habitat Created by Mobile Communications. *Biology Bulletin*. 51 (11), 3481–3495. DOI: 10.1134/S1062359024701863 (Pleiades Publishing, Inc., USA).
3. *Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020* (2017). Report ITU-R M.2412-0.
4. *Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Short-Range Outdoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 300 MHz to 100 GHz*. Rec. ITU-R. 1411–11.
5. Mordachev V. (2009) System Ecology of Cellular Communications. *Belarus State University Publishers*. https://emc.bsuir.by/m/12_116413_0_176480.pdf (in Russian).
6. Asplund H., Astely D., Butovitsch P., Chapman T., Frenne M., Chasemzadeh F., et al. (2020) Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments. Bridging the Gap Between Theory and Practice. *Academic Press*.
7. Loyka S. L., Mordachev V. I. (1998) On Applications of Self-Phased Array Antennas to Mobile Communications. *1998 IEEE Radio and Wireless Conf. (RAWCON'98), Colorado Springs, Colorado, Aug. 9–12*. 233–236.
8. *IMT Vision – Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond*. Rec. ITU-R M.2083-0.
9. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., et al. (2019) 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine*. 14 (3), 28–41.

10. Tikhvinskiy V., Terentiev S., Visochin V. (2014) *LTE/LTE Advanced Mobile Networks: 4G Technologies, Applications Architecture*. Moscow, Media Publ. (in Russian).
11. *LTE-Advanced (3GPP Rel.12). Technology Introduction*. White Paper (2015) 1ma252_wp_lte_rel12_2e.pdf. Available: https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/lte-advanced-3gpp-rel-12-technology-introduction-white-paper-white-paper_230854-108294.html (Accessed 2 July 2025).
12. Oestges C., Clerckx B. (2010) *MIMO Wireless Communications – From Real-World Propagation to Space-Time Code Design*. Claude Academic Press.

Received: 2 July 2025

Accepted: 23 December 2025

Information about the author

Mordachev V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Head of the R&D Laboratory “Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Equipment”,
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 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Mordachev Vladimir



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-30-36>

УДК 621.396.67

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНЕРА БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

А. А. СТАНУЛЬ, В. А. СИМОНЕНКО, А. П. ЮБКО

ООО «СКБ «Радиотехпроект» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье представлены результаты измерения характеристик направленности антенн при помощи сканера ближнего поля. Выполнено сравнение диаграмм направленности изготовленной антенной решетки, полученных при помощи сканера и классическим методом с использованием поворотного стола в безэховой камере. Приведены краткое описание разработанного сканера, алгоритмы и методика, использованные в процессе пересчета измеренного ближнего поля антенны в диаграмму направленности. Отмечены такие достоинства сканера, как оценка дефектных элементов решетки; существенное снижение требований к размерам помещения, в котором проводятся измерения; получение объемной диаграммы направленности в передней полусфере; возможность осуществления первичной калибровки антенной системы.

Ключевые слова: диаграмма направленности антенн, сканер ближнего поля, спектр плоских волн, безэховая камера.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Стануль, А. А. Оценка характеристик направленности антенных решеток с использованием сканера ближнего поля / А. А. Стануль, В. А. Симоненко, А. П. Юбко // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 30–36. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-30-36>.

EVALUATION OF THE DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF ANTENNA ARRAYS USING A NEAR-FIELD SCANNER

ALIAKSANDR STANUL, VIKTAR SIMANENKA, ALEXSANDR JOUBKO

LLC “SDC “Radiotechproject” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of antenna directivity characteristics measurement using a near-field scanner. A comparison is made between the radiation patterns of the manufactured antenna array obtained using the scanner and the classical method using a turntable in an anechoic chamber. A brief description of the scanner developed by the authors, the algorithms and methods used in the process of converting the measured near field of the antenna into a directional pattern are provided. The scanner's advantages include the ability to assess defective array elements; significantly reduce the size requirements for the measurement room; the ability to obtain a three-dimensional radiation pattern in the forward hemisphere; and the ability to perform primary calibration of the antenna system.

Keywords: antenna radiation pattern, near-field scanner, plane wave spectrum, anechoic chamber.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Stanul A., Simanenko V., Joubko A. (2026) Evaluation of the Directional Characteristics of Antenna Arrays Using a Near-Field Scanner. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 30–36. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-30-36> (in Russian).

Введение

Измерение параметров сложной радиотехнической системы обязательно включает этап измерения характеристик направленности антенной системы, будь то одиночный излучатель или активная фазированная антенная решетка. Классический и достоверный (при определенных условиях) метод определения таких характеристик – измерение в дальней зоне в безэховой камере (БЭК) или на открытой местности с использованием поворотного стенда.

Измерение в дальней зоне предполагает работы в БЭК либо выезд на открытую местность. С одной стороны, это сопровождается дополнительными логистическими затратами. С другой – измерения в БЭК классическим методом (без использования коллиматора) могут привести к искажению диаграммы направленности (ДН) из-за ограниченности габаритов камеры, поскольку измерение антенн с размером апертуры от нескольких десятков длин волн сопровождается появлением фазовой ошибки поля на краях апертуры. Измерения на открытой местности хоть и решают вопрос с дальней зоной, но не нивелируют фактор переотражений электромагнитной волны (ЭМВ) от подстилающей поверхности. В результате основная проблема измерений в БЭК, связанная с фазовой ошибкой ввиду сферического фронта волны, вынуждает использовать альтернативные методы измерений ДН. В частности, голографический принцип определения характеристик антенн [1].

В статье представлены разработанный сканер ближнего поля и алгоритм расчета ДН по результатам измерения поля в ближней зоне (БЗ). Выполнено сравнение характеристик антенн, приведены методика и результаты измерений.

Проблема измерений в дальней зоне в безэховой камере

Классическая формула для определения ближней границы дальней зоны (ДЗ), приведенная в [2], соответствует электрической разности фаз (равной $22,5^\circ$) между колебаниями поля в центре антенны и ее крайними точками:

$$D \gg \frac{2L^2}{\lambda}. \quad (1)$$

Ограниченные размеры БЭК не позволяют измерить параметры антенн больших электрических размеров с заданной точностью ввиду искажения фронта волны. В качестве объекта измерений использовалась антенная решетка X-диапазона с апертурой $0,8 \times 0,4$ м (наибольший размер – $L \approx 25\lambda$). На рис. 1 приведено сравнение теоретических ДН в азимутальной плоскости для идеальной решетки тех же геометрических размеров, что и в реальном образце, при расстояниях от решетки до измерительной антенны $D \approx 13$ м ($D \approx 400\lambda$) и $D = \infty$.

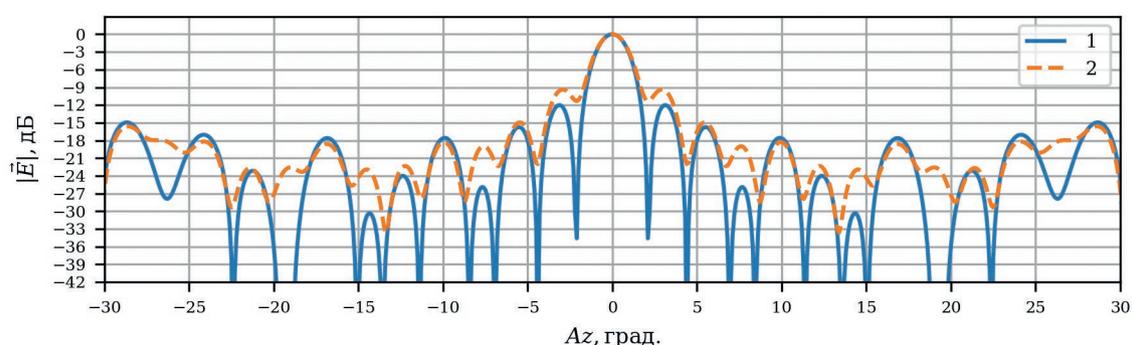


Рис. 1. Диаграмма направленности: 1 – в дальней зоне ($D = \infty$); 2 – при $D \approx 400\lambda$

Fig. 1. Radiation pattern: 1 – in the far zone ($D = \infty$); 2 – at $D \approx 400\lambda$

Как следует из рис. 1, при указанном расстоянии ($D = 13$ м) заметны искажения уровня боковых лепестков и наблюдается так называемое «запыление нулей» ДН. Это объясняется известной фазовой ошибкой, возрастающей к краю апертуры антенны вследствие сферичности фронта волны, распространяющейся от измерительной антенны. На рис. 2 изображены геометрическая (ΔD) и электрическая ($\Delta \varphi$) зависимости разности хода ЭМВ от измерительной антенны до n -го излучателя по отношению к центральному(ым) на исследуемой решетке для расстояния $D \approx 400\lambda$.

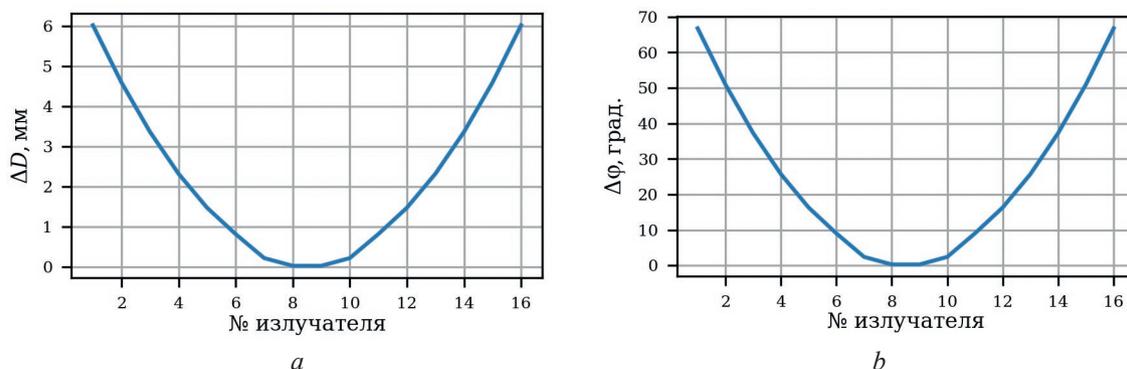


Рис. 2. Зависимость разности хода электромагнитной волны: *a* – геометрическая; *b* – электрическая
Fig. 2. Dependence of the path difference of an electromagnetic wave: *a* – geometric; *b* – electrical

Согласно рис. 2, *b*, фазовая ошибка для используемого образца в БЭК показывает, что расстояние между антеннами меньше, чем общепринятая граница дальней зоны.

Измерения характеристик антенн на планарном сканере в ближней зоне

Несмотря на то что измерение ДН в БЭК в дальней зоне является прямым, менее затратным с точки зрения оборудования и не требует математической постобработки, тем не менее, ввиду искажения фронта волны, определение ДН остронаправленных антенн с большой апертурой целесообразно проводить с применением сканера ближнего поля. Авторами статьи был спроектирован и изготовлен планарный сканер ближнего поля (СБП). Его структурная схема является типовой (с использованием 2D-координатного стола с управляющим блоком, векторного анализатора цепей и ЭВМ), поэтому не приводится. В качестве зонда использовался открытый конец волновода, ориентация зонда изменялась при помощи шагового двигателя. На рис. 3 представлена решетка *X*-диапазона (размер апертуры 0,8×0,4 м), ДН которой измерялась двумя способами: в БЭК (рис. 3, *a*) на поворотном столе и с помощью СБП (рис. 3, *b*).

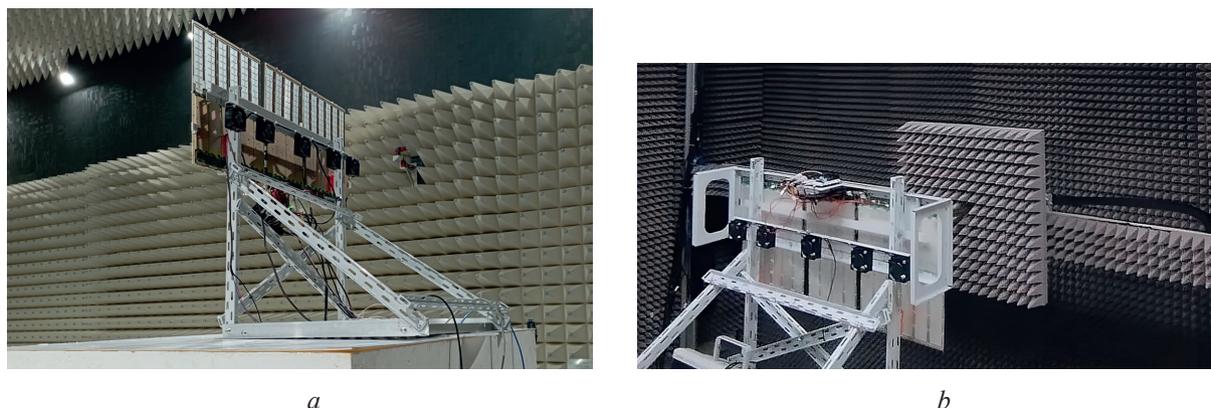


Рис. 3. Измерение диаграммы направленности антенны: *a* – в безэховой камере;
b – с помощью сканера ближнего поля

Fig. 3. Measuring the antenna radiation pattern: *a* – in an anechoic chamber; *b* – using a near-field scanner

Ввиду того, что определение ДН в СБП сводилось к двум этапам (измерение ближнего поля на апертуре антенны и последующая постобработка), по результатам измеренного поля можно судить о работоспособности отдельных фрагментов антенной решетки, что невозможно при измерении в ДЗ с использованием поворотного стола.

На рис. 4 приведены результаты измерения ближнего поля исследуемой антенны. Затраченное время для представленной области сканирования для трех частот составило около 30 мин, шаг сканирования – 10 мм. Картина распределения ближнего поля, приведенная на рис. 4, позволяет быстро оценить работоспособность отдельных частей решетки. В рассматриваемом случае (как на амплитудном, так и на фазовом распределении поля) отчетливо видны участки неэквидистантной решетки, свободные от излучающих элементов.

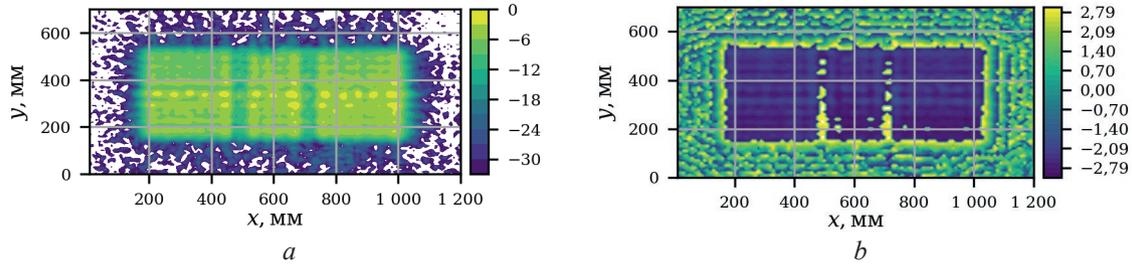


Рис. 4. Результат измерения ближнего поля антенны: *a* – амплитуда; *b* – фаза
Fig. 4. Antenna near field measurement result: *a* – amplitude; *b* – phase

Процесс пересчета измеренного ближнего поля в дальнюю зону описан в [3, 4] формулами:

$$S_{x,y}(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{x,y}(x, y) e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy; \quad (2)$$

$$E_{\theta}(r, \theta, \varphi) \approx j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} (S_x \cos \varphi + S_y \sin \varphi); \quad (3)$$

$$E_{\varphi}(r, \theta, \varphi) \approx j \frac{ke^{-jkr}}{2\pi r} \cos \theta (-S_x \sin \varphi + S_y \cos \varphi), \quad (4)$$

где $S_{x,y}(k_x, k_y)$ – спектр плоских волн (СПВ) в зависимости от проекций волновых векторов k_x, k_y ; $E_{x,y}$ – измеренные компоненты поля в БЗ; $E_{\theta}(r, \theta, \varphi)$, $E_{\varphi}(r, \theta, \varphi)$ – компоненты поля в сферической системе координат (СК) в ДЗ.

Процесс определения ДН в ДЗ по результатам измеренного ближнего поля вблизи апертуры антенны сводится к расчету СПВ (Plane wave spectrum) посредством двумерного преобразования Фурье (ДПФ), которым заменялось двойное интегрирование в (2). Перед операцией ДПФ для улучшения углового разрешения ДН использовался известный в цифровой обработке сигналов прием – исходная матрица коэффициентов ближнего поля $E_{x,y}$ дополнялась нулями на периферии апертуры.

Ввиду того, что зонд, с помощью которого измеряется ближнее поле, также имеет характеристики направленности, целесообразно предусмотреть математическую коррекцию спектра плоских волн исследуемой антенны [5, 6]. В расчетах применялся метод, описанный в [5], использующий СПВ зондовой антенны. Следует отметить, что для коррекции направленности зонда ближнее поле исследуемой антенны должно быть измерено при двух ортогональных положениях зонда:

$$A_x(k_x, k_y) = \frac{A_{mx}(k_x, k_y)A_{px}(k_y, -k_x) - A_{my}(k_x, k_y)A_{py}(k_x, k_y)}{A_{py}(k_x, k_y)A_{py}(k_y, -k_x) + A_{px}(k_x, k_y)A_{px}(k_y, -k_x)}; \quad (5)$$

$$A_y(k_x, k_y) = \frac{A_{mx}(k_x, k_y)A_{py}(k_y, -k_x) - A_{my}(k_x, k_y)A_{px}(k_x, k_y)}{A_{py}(k_x, k_y)A_{py}(k_y, -k_x) + A_{px}(k_x, k_y)A_{px}(k_y, -k_x)}; \quad (6)$$

где $A_x(k_x, k_y)$, $A_y(k_x, k_y)$ – СПВ антенны с учетом коррекции зонда; $A_{px}(k_x, k_y)$, $A_{py}(k_x, k_y)$ – СПВ зонда; $A_{mx}(k_x, k_y)$, $A_{my}(k_x, k_y)$ – СПВ антенны по результатам измерений в БЗ.

Ввиду того, что открытый конец волновода представлял собой относительно простую структуру, его СПВ определялся исходя из ближнего поля вблизи апертуры волновода, полученного посредством электродинамического моделирования. Затем производился расчет СПВ в декартовой СК и пересчитывался в спектр плоских волн в сферической СК. На заключительном этапе по СПВ в сферической СК определялись компоненты поля E_{θ} , E_{φ} в ДЗ. Но поскольку в антенной технике чаще оперируют азимутально-угломестной СК, по результатам E_{θ} , E_{φ} находили компоненты E_{A_z} , E_{El} [7].

На рис. 5, 6 приведены результаты промежуточных этапов расчета ДН по показателям измеренного поля в БЗ исследуемой антенны. На рис. 5 изображен нормированный спектр плоских волн для преобладающей y -компоненты в пространстве волновых векторов k_x, k_y .

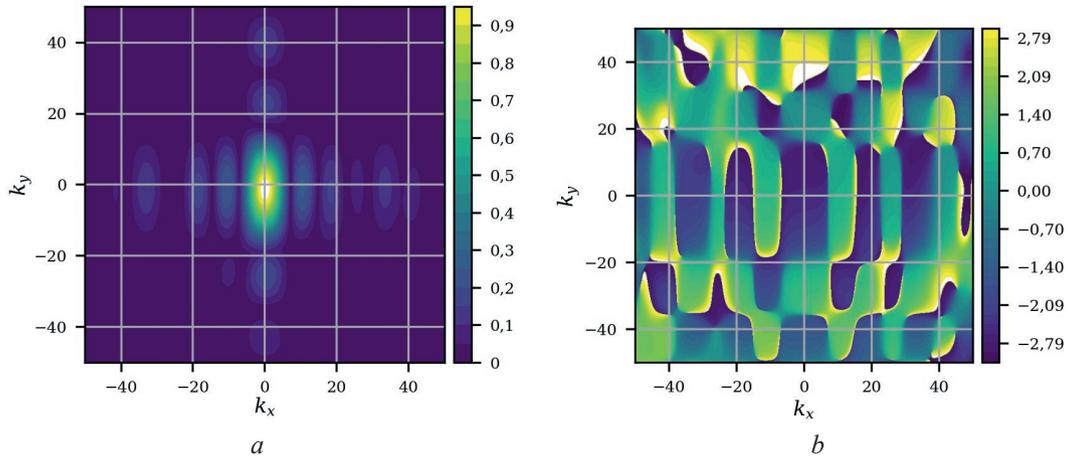


Рис. 5. Нормированный спектр плоских волн: a – амплитудный; b – фазовый
Fig. 5. Normalized spectrum of plane waves: a – amplitude; b – phase

На рис. 6 изображены компоненты поля E_θ , E_φ двумерной ДН (uv -проекция) в дальней зоне в сферической СК, на рис. 7 – компоненты поля E_{Az} , E_{El} двумерной ДН в дальней зоне в азимутально-угломестной СК.

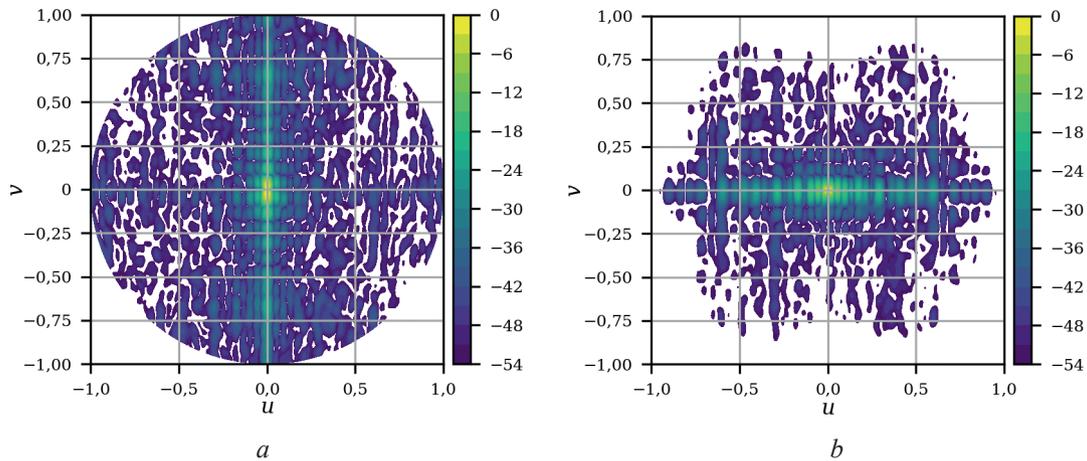


Рис. 6. Компоненты поля диаграммы направленности в дальней зоне в сферической системе координат:
 a – $|E_\theta/E_{\max}|$, дБ; b – $|E_\varphi/E_{\max}|$, дБ

Fig. 6. Far-field radiation pattern components in spherical coordinates: a – $|E_\theta/E_{\max}|$, dB; b – $|E_\varphi/E_{\max}|$, dB

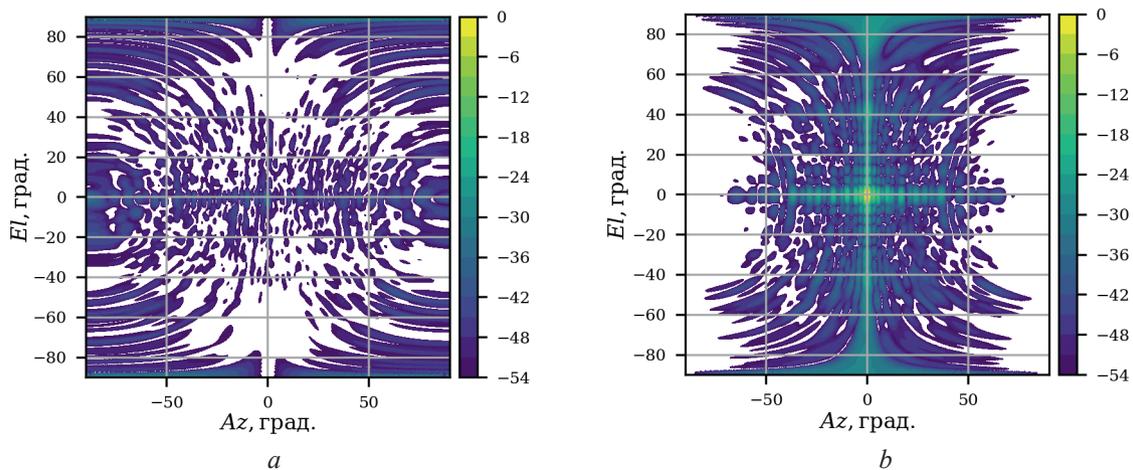


Рис. 7. Компоненты поля диаграммы направленности в дальней зоне в азимутально-угломестной системе координат: a – $|E_{Az}/E_{\max}|$, дБ; b – $|E_{El}/E_{\max}|$, дБ
Fig. 7. Far-field radiation pattern components in the azimuth-elevation coordinate system:
 a – $|E_{Az}/E_{\max}|$, dB; b – $|E_{El}/E_{\max}|$, dB

На рис. 7 отчетливо видна разница между амплитудами двух компонент поля (горизонтальной и вертикальной), так как антенная решетка имеет вертикальную поляризацию.

На рис. 8 приведено сравнение сечений в плоскости главного лепестка ДН (основной у-компоненты поля) исследуемой решетки, полученное посредством измерения в БЭК на поворотном столе (дистанция 13 м) и при помощи сканера (с учетом коррекции антенны-зонда и без), а также посредством электродинамического моделирования методом конечных элементов (FEM). Результаты представлены для у-компоненты ДН (основной, вертикальной). Крестовая компонента ДН довольно низкая (менее -35 дБ) и не отображена.

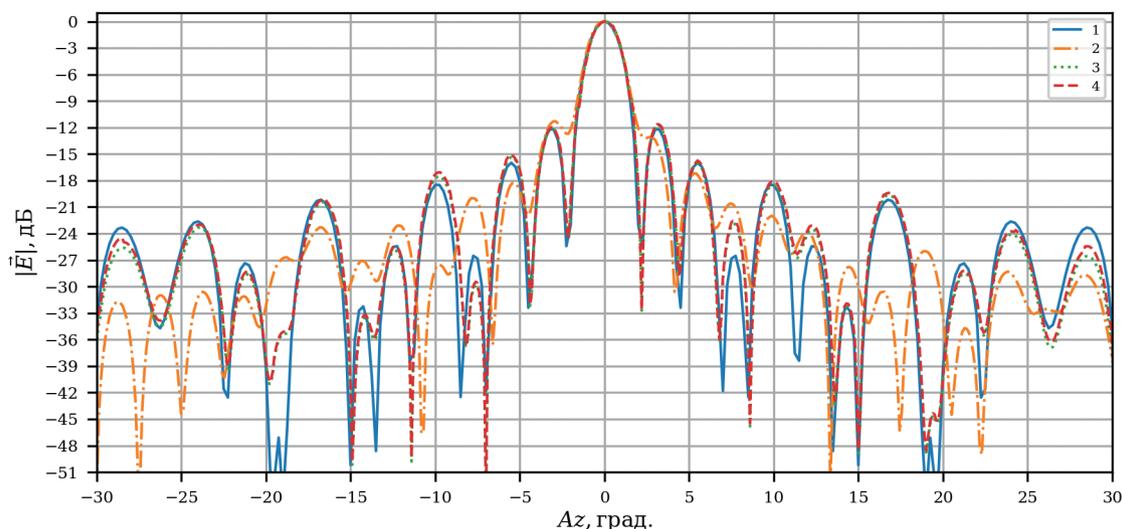


Рис. 8. Сравнение измерений диаграммы направленности: 1 – методом конечных элементов (FEM); 2 – в безэховой камере на поворотном столе (дистанция 13 м);

3, 4 – при помощи сканера с учетом коррекции антенны-зонда и без соответственно

Fig. 8. Comparison of radiation pattern measurements: 1 – using the finite element method (FEM);

2 – in an anechoic chamber on a turntable (distance 13 m);

3, 4 – using scanner with and without correction of the probe antenna, respectively

Согласно рис. 8, полученные кривые свидетельствуют о существенной ошибке в измерении боковых лепестков антенных решеток больших электрических размеров классическим методом на ограниченной дистанции. В то же время в довольно широком диапазоне углов не наблюдается заметно ощутимая разница с и без использования коррекции направленности зондовой антенны.

Заключение

1. Результаты измерений наглядно демонстрируют преимущество использования сканера ближнего поля для измерения диаграммы направленности антенн с размерами апертур порядка десятка и более длин волн по сравнению с классическим методом измерения в дальней зоне при наличии ограничений на расстояние между поворотным столом с измеряемой антенной и расположением измерительной антенны.

2. Отмечено, что для остронаправленных антенн влияние направленности зонда в диапазоне углов от нормали к плоскости апертуры $\pm 30^\circ$ несущественно. Явным преимуществом также является возможность получить 3D-диаграмму направленности и оценить излучение вне главных плоскостей сечения.

Список литературы

1. Joy, E. V. Spatial Sampling and Filtering in Near-Field Measurements / E. V. Joy. USA: Georgia Institute of Technology, 1970.
2. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук, О. А. Юрцев. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2006. Ч. 3. Антенны.
3. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л. Д. Бахрах [и др.]. Л.: Наука, 1985.

4. Balanis, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design* / C. A. Balanis. NJ: Wiley-Interscience, 2005.
5. Joy, E. B. *Spatial Sampling and Filtering in Near-Field Measurements* / E. B. Joy, D. Paris // *Engineering, Physics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1972. Vol. 20, Iss. 3. P. 253–261.
6. Masters, G. F. *Probe-Correction Coefficients Derived from Near-Field Measurements* / G. F. Masters. USA: AMTA, 1991.
7. Gregson, S. *Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements* / S. Gregson, J. McCormick, C. Parini. London: IET, 2007.

Поступила 05.01.2026

Принята в печать 26.01.2026

References

1. Joy E. B. (1970) *Spatial Sampling and Filtering in Near-Field Measurements*. USA, Georgia Institute of Technology.
2. Gololobov D. V., Kirilchuk V. B., Yurtsev O. A. (2006) *Radio Wave Propagation and Antenna-Feeder Devices*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Part. 3. Antennas (in Russian).
3. Bahrah L. D., Kremenetsky S. D., Kurochkin A. P., Usin V. A., Shifrin Y. S. (1985) *Methods for Measuring the Parameters of Radiating Systems in the Near Field*. Leningrad, Nauka Publ. (in Russian).
4. Balanis C. A. (2005) *Antenna Theory: Analysis and Design*. NJ, Wiley-Interscience.
5. Joy E. B., Paris D. (1972) *Spatial Sampling and Filtering in Near-Field Measurements. Engineering, Physics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 20 (3), 253–261.
6. Masters G. F. (1991) *Probe-Correction Coefficients Derived from Near-Field Measurements*. USA, AMTA Publ.
7. Gregson S., McCormick J., Parini C. (2007) *Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements*. London, IET.

Received: 5 January 2026

Accepted: 26 January 2026

Вклад авторов

Стануль А. А. Представил общую концепцию и разработал алгоритм управления сканером.
Симоненко В. А. Разработал программу управления сканером и измерительным оборудованием.
Юбко А. П. Выполнил алгоритмизацию расчета характеристик антенны по данным ближнего поля.

Authors' contribution

Stanul A. Presented the general concept and developed a scanner control algorithm.
Simanenka V. Developed a program to control the scanner and measuring equipment.
Joubko A. Performed algorithmization of antenna characteristics' calculation, based on near-field data.

Сведения об авторах

Стануль А. А., нач. отдела разработки и проектирования, ООО «СКБ «Радиотехпроект» (Радиотехпроект)

Симоненко В. А., магистр техн. наук, инж. отдела разработки и проектирования, Радиотехпроект

Юбко А. П., магистр техн. наук, инж. отдела разработки и проектирования, Радиотехпроект

Information about the authors

Stanul A., Head of Development and Design Department, LLC “SDC “Radiotechproject” (Radiotechproject)

Simanenka V., M. Sci. (Tech.), Engineer of the Development and Design Department, Radiotechproject

Joubko A., M. Sci. (Tech.), Engineer of the Development and Design Department, Radiotechproject

Адрес для корреспонденции

220076, Республика Беларусь,
Минск, ул. Огинского, 6
ООО «СКБ «Радиотехпроект»
Тел.: +375 17 215-04-24
E-mail: A.Stanul@rtp.by
Стануль Александр Александрович

Address for correspondence

220076, Republic of Belarus,
Minsk, Oginskogo St., 6
LLC “SDC “Radiotechproject”
Tel.: +375 17 215-04-24
E-mail: A.Stanul@rtp.by
Stanul Aliaksandr



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-37-44>

УДК 621.398

МЕТОД СЖАТИЯ СПЕКТРА ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХСЯ ИМПУЛЬСОВ

В. П. ДОМЕНИКОВ¹, А. Г. САПЕРОВ, Н. Н. УЛАСЮК², А. С. СТРОГОВА³

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

²Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

³Белорусский государственный университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Разработана аппаратно-программная модель для конструирования параметров сигнала передачи данных в условиях зашумленной среды. Проанализированы подходы к проблеме увеличения пропускной способности информационных каналов, применяемые в специализированных научно-практических исследованиях. Приведена схема идентификации квазигармонических и прямоугольных сигналов для модификации в общий групповой сигнал. Получено экспериментальное подтверждение устойчивости вычислительного процесса при моделировании цифровых потоков с применением перекрывающихся квазигармонических сигналов. Принципиальные положения расчета базисных составляющих канального импульса позволяют проектировать устройства с высокой производительностью обмена.

Ключевые слова: обмен информацией, оценка передачи данных, компрессор, перекрывающиеся импульсы, квазигармонический сигнал.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Метод сжатия спектра широкополосного сигнала с использованием перекрывающихся импульсов / В. П. Домеников [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 37–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-37-44>.

A METHOD FOR COMPRESSING THE SPECTRUM OF A WIDEBAND SIGNAL USING OVERLAPPING PULSES

VITALY DOMENICOF¹, ANATOLY SAPEROV, NIKOLAJ ULASUK²,
ALEXANDRA STROGOVA³

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

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

³Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. A hardware and software model for constructing data transmission signal parameters in a noisy environment has been developed. Approaches to increasing the throughput of information channels, applied in specialized scientific and practical research, are analyzed. A scheme for identifying quasi-harmonic and rectangular signals for modification into a common group signal is presented. Experimental confirmation of the stability of the computational process when modeling digital streams using overlapping quasi-harmonic signals is obtained. The fundamental principles of calculating the basic components of a channel pulse enable the design of devices with high data throughput.

Keywords: information exchange, data transmission evaluation, compressor, overlapping pulses, quasi-harmonic signal.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Domenikof V., Saperov A., Ulasuk N., Strogova A. (2026) A Method for Compressing the Spectrum of a Wideband Signal Using Overlapping Pulses. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 37–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-37-44> (in Russian).

Введение

В системах дистанционного контроля энергоустановками территориальная рассредоточенность пунктов сбора информации налагает жесткие технические требования к средствам передачи данных. Особо выделяются системы эксплуатационного контроля мощных турбогенераторов и устройств возбуждения и охлаждения, включающих подсистемы контроля и регистрации параметров, характеризующие тепловое и электрическое состояния турбогенераторов, а также устройства релейной защиты и автоматики как в установившихся, так и в переходных режимах, и подсистемы виброконтроля. Например, в интегрированной автоматизированной системе технологического контроля [1] контроль за работой турбогенераторов и их систем возбуждения и охлаждения осуществляется системой виброконтроля и защиты «Лукомль», контроллерами сбора аналоговой и цифровой информации, регистраторами РАС-ИТМ, а также системой централизованного контроля А701-03. Обработанная в рабочей станции технологического контроля (РСТК) генератора информация выдается в локальную вычислительную сеть (ЛВС) электроцеха. Скорость передачи и достоверность информации внутри ЛВС предельно высока и достаточна для принятия оперативных действий. Циклический обмен данными между РСТК и первичными системами сбора аналоговой и дискретной информации осуществляется с интервалами времени T , не превышающими 1–2 с. В качестве технических средств для обмена данными между А701-03 и РСТК применяется низкоскоростной последовательный интерфейс RS-232, а функционирование цифровых потоков между системой «Лукомль», контроллерами сбора аналоговой и цифровой информации и РСТК реализовано высокоскоростной многопроводной шиной. Общая скорость передачи данных в сети указанных первичных интерфейсов на порядок меньше скорости в ЛВС и согласуется с помощью специального программного обеспечения.

Для выравнивания скоростных потоков сети первичных интерфейсов и ЛВС предлагается метод повышения пропускной способности каналов низкоскоростной сети до уровня ЛВС. Импульсы передачи данных в каждом канале в статье рассматриваются как перекрывающиеся во времени [2].

Цель исследований заключалась в следующем:

– разработать метод повышения пропускной способности канала связи в зашумленной среде за счет перекрытия импульсов во времени, частоте и амплитуде без расширения полосы пропускания;

– создать и экспериментально подтвердить аппаратно-программную модель для практической реализации метода на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с целью его использования в системах дистанционного мониторинга и других системах с ограниченным спектром.

Методика проведения эксперимента

Традиционная оценка пропускной способности канала $G_{\text{ш}}$ осуществляется по формуле

$$G_{\text{ш}} = \Delta f_{\text{с,к}} \log_2(1 + P_{\text{с}}/P_{\text{ш}}), \quad (1)$$

где $\Delta f_{\text{с,к}}$ – эффективная полоса пропускания канала; $P_{\text{с}}/P_{\text{ш}}$ – отношение мощностей сигнала и шума.

Увеличить пропускную способность канала $G_{\text{ш}}$ при его неизменной полосе пропускания $\Delta f_{\text{с,к}}$ можно за счет перекрытия импульсов во время передачи их по каналу, если их перекрывать одновременно по времени, частоте и амплитуде [3]. Импульсы $Y(t)$ конструируются таким образом, чтобы в каждый наблюдаемый момент времени их сумма давала такую же спектральную полосу, как и спектр одиночного импульса $Y(t)$. Если обозначить спектр одиночного импульса $Y(t)$ через спектральную полосу $\Delta f_{\text{с,у}}$, занимаемую одним конструируемым импульсом $Y(t)$, можно записать требование

$$\Delta f_{\text{с,к}} \equiv \Delta f_{\text{с,у}}. \quad (2)$$

Во избежание роста мощности сигнала в канале $P_{\text{с}}$ импульсы $Y(t)$ рассчитываются так, чтобы при их суммировании до поступления в канал результирующий сигнал $U_{k,i}$ требовал для передачи не более 12-разрядного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Другими словами, динамический диапазон $U_{k,i}$ при перекрытии импульсов должен быть значительно меньше, чем при передаче тех же импульсов последовательно друг за другом.

Реальная полная мощность сигнала P_c при таком методе передачи до поступления в канал растет по закону $e(\varphi_2)$, при этом значение φ_2 определяется числовыми значениями параметров конструируемого импульса $Y(t)$. Определение фазовой составляющей $\varphi(t)$ базисной функции $Y(t)$ приведено в [4]. В результате среднее значение полезной составляющей (обозначим ее $P_{c,п}$) полной мощности сигнала P_c после перекрытия всех Q импульсов $Y(t)$ становится в Q/L раз меньше постоянной составляющей мощности сигнала (спектральной компоненты на нулевой частоте) $P_{c,0}$, то есть

$$P_{c,п} \ll P_{c,0}. \quad (3)$$

Таким образом, не несущая полезной информации постоянная составляющая $P_{c,0}$ до поступления в канал вычитается, и в канале имеет место исключительно $P_{c,п}$. На приеме при восстановлении информации из канала значение постоянной составляющей добавляется к значению $P_{c,п}$. Следовательно, если в (1) значение $(1 + P_c/P_{ш})$ заменить значением $e(\varphi_2)$, то пропускная способность канала $G_{ш}$ оценивается как

$$G_{ш} \approx \Delta f_{c,к} \varphi_2. \quad (4)$$

Формула (4) обладает уникальным свойством. Во-первых, в ней отсутствует знак \log_2 . Во-вторых, удастся передавать информацию с большой скоростью, не расширяя эффективной полосы пропускания канала $\Delta f_{c,к}$. В-третьих, этот же поток информации идет без увеличения отношения $P_c/P_{ш}$, т. е. в том же динамическом диапазоне $U_{k,i}$. Если для простоты обратиться к традиционно «медленному» каналу тональной частоты с его параметрами $P_c = 32$ мВт, $P_{ш} = 100$ ПВт и $\Delta f_{c,к} = 3,4$ кГц, то пропускная способность $G_{ш}$ будет составлять примерно 64,6 кбит/с. В соответствии с (4) верхний предел скорости передачи по тому же каналу оценивается по-новому. Согласно [5], аргумент φ_2 в выражении (4) определяется по формуле

$$\varphi_2 \approx \frac{3,5 \cdot 10 - 2L32 \frac{P_c}{P_{ш}}}{\ln \left(CL \frac{L}{2} + \frac{1}{P_{ош}} \right)}, \quad (5)$$

где L – длина рабочего участка импульса $Y(t)$; $P_{ош}$ – требуемая вероятность ошибки приема кода; $CL \frac{L}{2} + 1$ – число сочетаний из L по $L/2 + 1$.

Используя (5) в выражении (4), формулу пропускной способности канала можно представить следующим образом:

$$G_{ш} \approx \Delta f_{c,к} \frac{3,5 \cdot 10 - 2L32 \frac{P_c}{P_{ш}}}{\ln \left(CL \frac{L}{2} + \frac{1}{P_{ош}} \right)}. \quad (6)$$

В соответствии с теоремой Шеннона о пропускной способности канала в [6] показано, что для устойчивого декодирования скорость v всегда меньше пропускной способности $G_{ш}$, поэтому выражение (6) для количественной оценки пропускной способности канала позволяет по-новому оценивать скорость передачи данных v при ограниченных параметрах канала $\Delta f_{c,к}$ и $P_c/P_{ш}$. Можно показать, что скорость v всегда пропорциональна множителю $L9$ [7], в то время как $G_{ш}$ пропорциональна $L32$ в выражении (6).

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 построена зависимость пропускной способности канала $G_{ш}$ (графики 1, 2, 3) и скорости передачи данных v , бит/с (графики 4, 5, 6) от параметра L (L – безразмерная величина) при следующих исходных данных: $\Delta f_{c,к} = 3,4$ кГц; $P_c/P_{ш} = 10$; 1; 0 и 1 (линии 1 и 4; 2 и 5; 3 и 6 соответственно); $P_{ош} = 10$ –15. Описание процесса декодирования информации (восстановление из смеси «сигнал + шум») рассмотрено в [8].

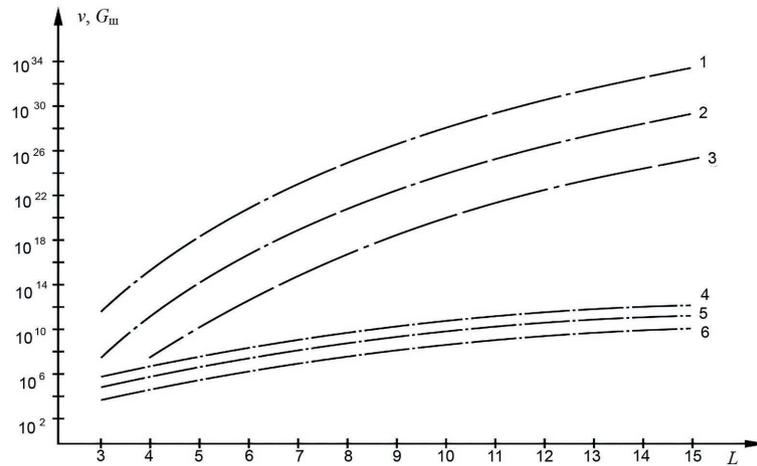


Рис. 1. Зависимость пропускной способности канала $G_{ш}$ (1, 2, 3) и скорости передачи v (4, 5, 6) от параметра L

Fig. 1. Dependence of channel capacity G_{sh} (1, 2, 3) and transmission speed v (4, 5, 6) on parameter L

Для экспериментальной проверки повышения пропускной способности канала без существенного увеличения его полосы пропускания были изготовлены два макета: схемотехнический и программный. Программный макет реализует конструирование, перекрытие и передачу по каналу импульсов $Y(t)$ с заранее заданной скоростью и полосой пропускания $\Delta f_{c,k}$. Декодирование осуществляется с вероятностью ошибки $P_{ош} = 10-15$ при различных значениях L и $P_c/P_{ш}$. Результаты моделирования показали, что в полосе пропускания канала (затухание и дисперсия не моделируются, так как это относится к свойствам каналообразующей аппаратуры) $\Delta f_{c,k} = 3,4$ кГц при отношении мощностей канала и шума $P_c/P_{ш} = 32$ мкВт/100 ПВт возможно передавать информацию со скоростью ~ 100 Мбит/с и принимать на обратной стороне канала с вероятностью ошибки не более 10–15. На рис. 2 представлена структура программного макета для организации моделирования (АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПДК – последовательный двоичный код).

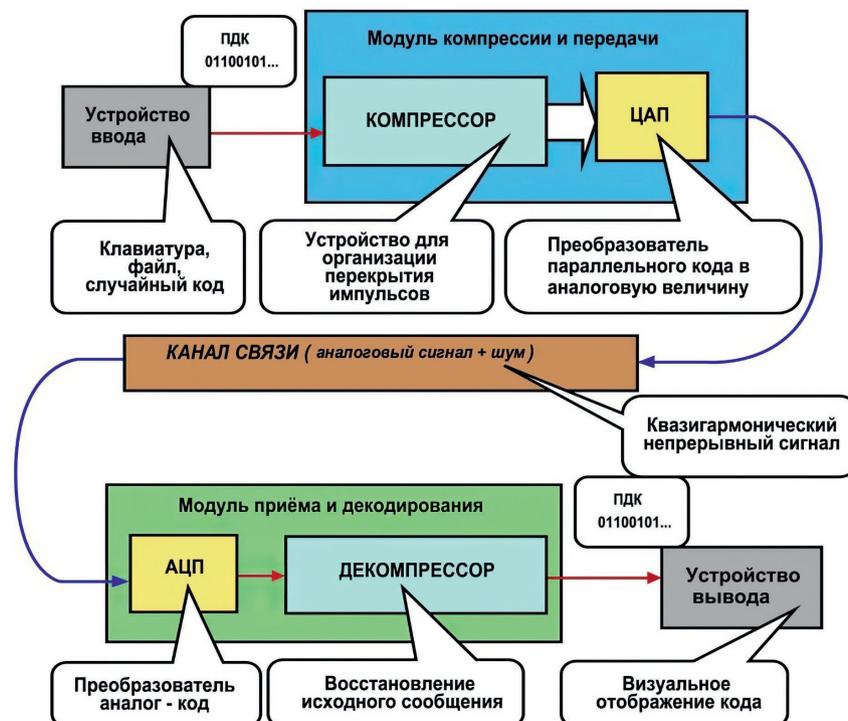


Рис. 2. Программный макет экспериментальной модели «передатчик–канал связи–приемник»
Fig. 2. Software layout of the experimental model “transmitter–communication channel–receiver”

Схемотехнический макет был реализован на модуле Starter Kit, представлявшем собой отладочное устройство для проектирования ПЛИС платформы Spartan-3. Емкость ПЛИС составляла 200 тыс. вентилях на кристалл, к его выходу подключался контроллер MSP430 со встроенными 12-разрядными ЦАП/АЦП. Задача этой проверки – показать принципиальную возможность аппаратной реализации выражения (6). Сконструированный заранее импульс $Y(t)$ через LPT-порт компьютера загружается в ПЛИС и хранится в нем на все время передачи. Перекрытие, передача на вход ЦАП сигнала $U_{k,i}$ реализованы в ПЛИС схемотехническим редактором.

На рис. 3 представлен фрагмент сигнала в канале. Характеристика сигнала носит квазигармонический характер, что позволяет ограничить полосу пропускания применением полосового фильтра. Амплитуды сигнала представлены значениями ЦАП, следующими через интервалы времени T .

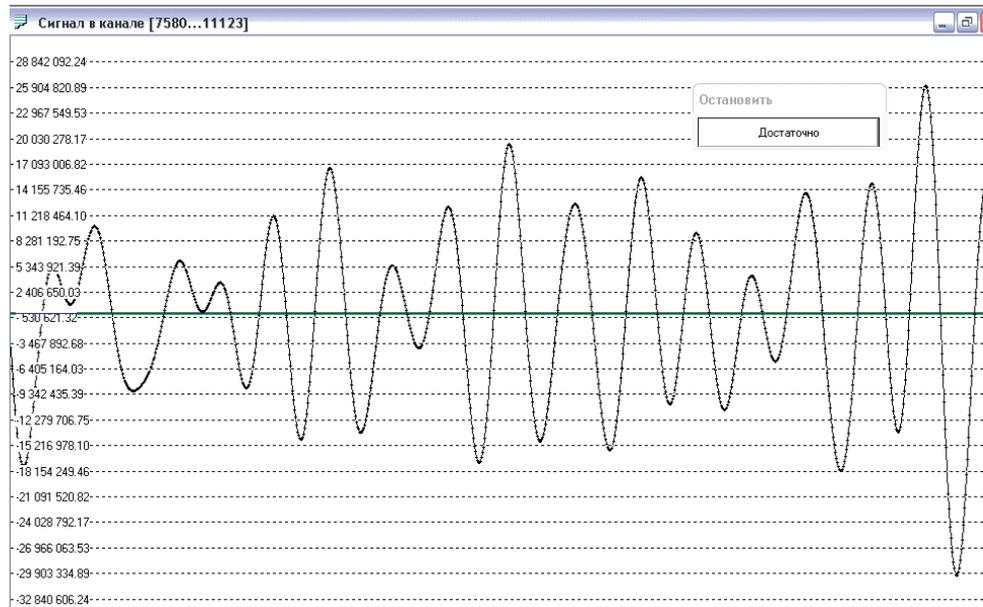


Рис. 3. Зависимость амплитуд квазигармонического сигнала в канале от интервалов времени T
Fig. 3. Dependence of the amplitudes of the quasi-harmonic signal in the channel from time intervals T

Плавный квазигармонический сигнал позволяет сосредоточить основную часть энергии в узкой полосе частот (0,43–3,34 кГц). На рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика сигнала в канале.

Для реализации метода, изложенного в [9], рассмотрим некоторые алгоритмические варианты. Для перекрытия во времени импульсов передачи данных (ИПД) наиболее «классический» стиль – это пирамида сумматоров. Разрядность сумматоров определяется количеством двоичных разрядов максимального отсчета ИПД, конструируемого с помощью математической базисной функции (БФ) по алгоритму [9]. Количество сумматоров в пирамиде Q тождественно равно числу отсчетов БФ и вычисляется по формуле

$$Q \approx \sqrt{\frac{\pi \ln \frac{1}{\psi} \ln^2 C}{22,5e}} \cdot \frac{P_e}{P_{\text{ш}}} \cdot \frac{L^9}{(M-1)^2 \ln(C_L^{L/2+1} / P_{\text{ош}})}, \quad (7)$$

где M – разрядность передаваемого двоичного кода, в рассматриваемом случае $M = 2$; $C = L\sqrt{Q}$; ψ – минимальное значение спектральной плотности сигнала, на котором еще возможно устойчивое декодирование (определено на уровне 0,1).

Число секций S пирамиды сумматоров определяется выражением

$$S = \log_2 \left[\frac{Q+1}{n} \right], \quad (8)$$

где n – число входов сумматора.

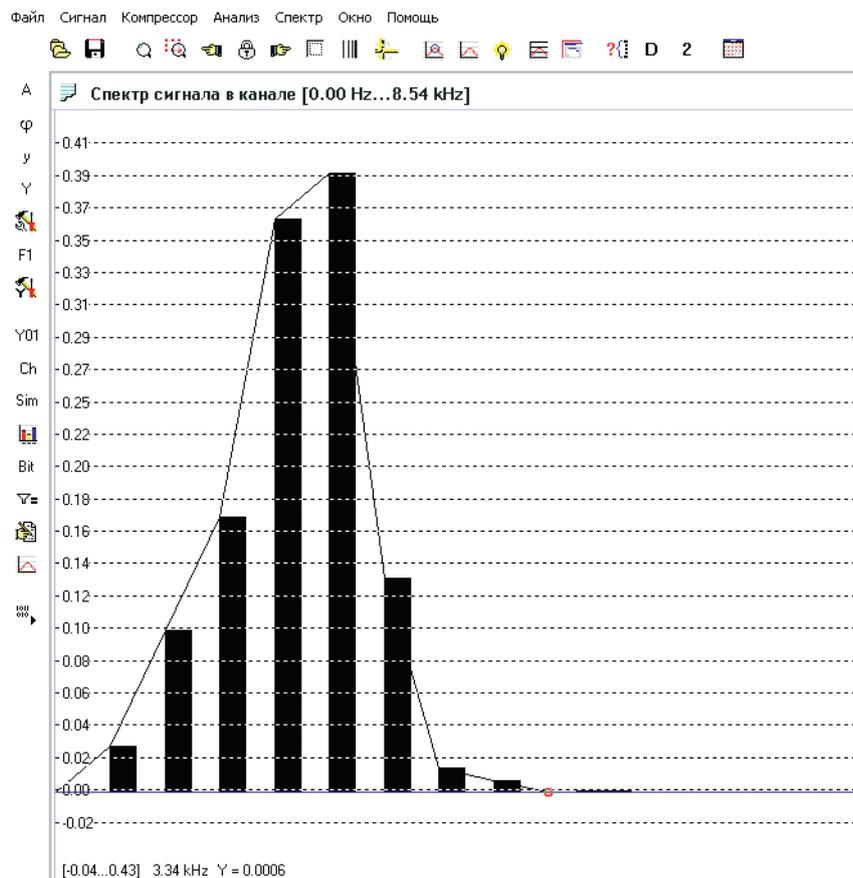


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика сигнала в канале
Fig. 4. Amplitude-frequency response of the signal in the channel

Таким образом, задержка в формировании выходного отсчета сигнала по такой схеме будет равна S . Например, при $Q = 2048$ для реализации указанной пирамиды потребуется 2047 16-рядных сумматоров с максимальной задержкой сигнала на выходе схемы в 11 тактов.

Второй вариант реализации перекрытия с суммированием – последовательный перебор всех Q -регистров БФ и суммирование их в накапливающем сумматоре. Этот вариант предпочтительнее с точки зрения использования процентного заполнения ПЛИС, поскольку необходим всего лишь один сумматор вместо 2047, как в предыдущем варианте. Но проигрыш состоит в пропорциональном увеличении времени формирования выходного отсчета сигнала.

Поскольку речь идет о доказательстве принципиальной возможности технической реализации разрабатываемого устройства, рационально остановиться на втором варианте структуры перекрытия с суммированием, как наиболее простом и наглядном. Выбор схемы осуществлен по заранее оговоренному алгоритму «сдвиг–суммирование» [9]. В процессе исследований было выбрано устройство для организации перекрытия импульсов с помощью компрессора, представленного на рис. 5.

Выбор оборудования и оценка его эффективности проводились методом вычисления времени для получения выходного отсчета $U_{k,i}$. Наиболее гибкая система для многократного проектирования и отладки схем была получена на основе продукции фирмы Xilinx. В эксперименте использовалась ПЛИС типа FPGA емкостью до 10 млн системных вентилях на кристалл и с внутренней тактовой частотой ~ 320 МГц. Даже при максимальной длине БФ $Q = 1024$ (максимальная емкость PROM) на выходе ПЛИС реальная скорость передачи данных v составляла 320 кбит/с.

Следует отметить, что эксперимент обусловлен фактом доказательства принципиальной возможности технической реализации изобретения, поэтому в качестве преобразователей «напряжение–код» применялся контроллер MSP430 со встроенными ЦАП/АЦП и невысокой частотой преобразования (200 кГц). Это позволяет передавать и принимать информацию по каналу связи со скоростью ≤ 200 кбит/с, что почти в три раза больше, чем по формуле (1).

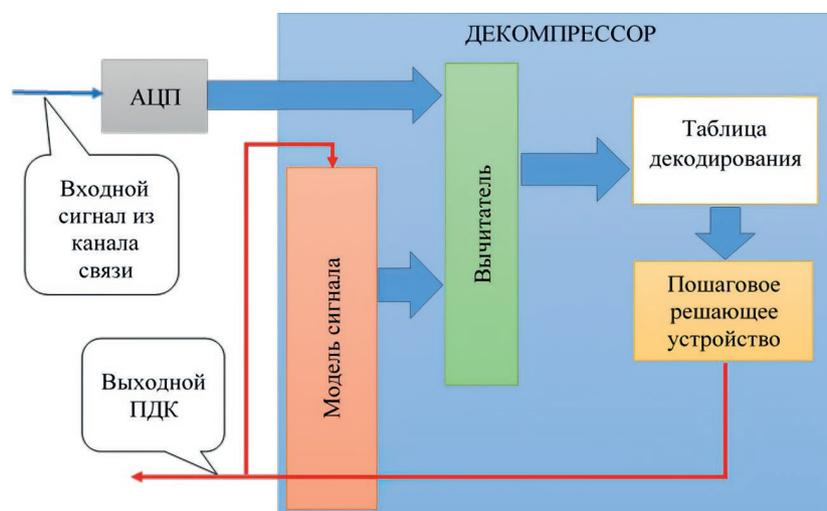


Рис. 5. Структурная схема декодирования сигнала
Fig. 5. Block diagram of signal decoding

Заключение

1. Разработан метод оценки пропускной способности канала за счет применения способа перекрытия импульсов по времени, амплитуде и частоте. Построена новая аппаратно-программная структура для оценки пропускной способности канала в условиях шума.

2. Экспериментально подтверждена устойчивость вычислительного процесса при моделировании цифровых потоков с применением прямоугольных и квазигармонических сигналов. Приведена схемотехническая платформа для проектирования устройств на базе ПЛИС типа FPGA.

3. Разработанный метод сжатия спектра широкополосного сигнала на основе перекрывающихся импульсов обладает научной новизной, заключающейся в новом подходе к повышению пропускной способности канала без расширения его полосы и в предложенной упрощенной формуле для ее оценки, исключающей логарифмическую зависимость. Его практическая значимость подтверждена созданием работоспособной аппаратно-программной модели, демонстрирующей возможность значительного увеличения скорости передачи данных (до ~100 Мбит/с в полосе 3,4 кГц) в условиях шума, что открывает перспективы для эффективной модернизации узкополосных каналов в системах дистанционного контроля, телеметрии и связи.

Список литературы

1. Интегрированная автоматизированная система технологического контроля турбогенераторов / В. Х. Сопьяник [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2002. № 3. С. 27–31.
2. Трубицын, Л. М. Передача аналогового сигнала перекрывающимися импульсами / Л. М. Трубицын // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 1986. № 6.
3. Саперов, А. Г. Расчет формы помехоустойчивого импульса для передачи двухпозиционных сигналов / А. Г. Саперов, Л. М. Трубицын // Известия высших учебных заведений. Энергетика. 1990. № 7.
4. Domenicof, V. P. Software and Mathematical Complex “ARM-Workstation Impulse Designer” 2005 Year / V. P. Domenicof, A. G. Saporau // The National Center of Intellectual Property Republic of Belarus. 2019.
5. Code Compression and Decompression and Parallel Compression and Decompression Processor: Binary United States Patent, US 6, 256, 652 B1. Date of Patent Jul. 3, 2001 / A. G. Saperov, N. F. Krot.
6. Устройство для передачи двоичного кода: а. с. (СССР) 1513628, H03M13/00, 1987 / А. Г. Саперов, Л. М. Трубицын // Бюллетень изобретений № 37, 1989.
7. The Method for Repeated Compressing of Data and the Multiprocessor Converter: WIPO/PCT. Application for Utility Patent, International Publication Number WO 2016/185254 A1. International Publication Date Nov. 24, 2016 / A. G. Saperov.
8. Binary Code Compression and Decompression and Parallel Compression and Decompression Processor: Japanese Patent, Patent No 3313733. Date of Patent May 31, 2002 / A. G. Saperov, N. F. Krot.
9. Binary Code Compression and Decompression and Parallel Compression and Decompression Processor: South Korea Patent, Patent No 0313290. Date of Patent Oct. 18, 2001 / A. G. Saperov, N. F. Krot.

References

1. Sopyanik V. Kh., Grinevich A. M., Zhamoidin A. A., Kakuro A. V. (2002) Integrated Automated System for Technological Control of Turbogenerators. *Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations.* (3), 27–31 (in Russian).
2. Trubitsyn L. M. (1986) Transmission of an Analog Signal by Overlapping Pulses. *News of Higher Education Institutions. Instrumentation Engineering.* (6) (in Russian).
3. Saperov A. G., Trubitsyn L. M. (1990) Calculation of the Shape of an Interference-Resistant Pulse for the Transmission of Two-Position Signals. *News of Higher Education Institutions. Energy.* (7) (in Russian).
4. Domenicof V. P., Sapiorau A. G. (2019) Software and Mathematical Complex “ARM-Workstation Impulse Designer” 2005 Year. *The National Center of intellectual Property Republic of Belarus.*
5. Saperov A. G., Krot N. F. (2001) Binary Code Compression and Decompression and Parallel Compression and Decompression Processor. *United States Patent, US 6, 256, 652 B1, Date of Patent Jul. 3.*
6. Saperov A. G., Trubitsyn L. M. (1989) Device for Transmitting Binary Code. *Copyright Certificate (USSR) 1513628, H03M13/00, 1987. Bulletin of Inventions No 37.*
7. Saperov A. G. (2016) The Method for Repeated Compressing of Data and the Multiprocessor Convertor. *WIPO/PCT. Application for Utility Patent. International Publication Number WO 2016/185254 A1. International Publication Date Nov. 24.*
8. Saperov A. G., Krot N. F. (2002) Binary Code Compression and Decompression and Parallel Compression and Decompression Processor. *Japanese Patent. Patent No 3313733. Date of Patent May 31.*
9. Saperov A. G., Krot N. F. (2001) Binary Code Compression and Decompression and Parallel Compression and Decompression Processor. *South Korea Patent. Patent No 0313290. Date of Patent Oct. 18.*

Received: 15 December 2025

Accepted: 4 February 2026

Вклад авторов

Домеников В. П. выполнил работу в рамках обучения в аспирантуре для написания кандидатской диссертации.

Саперов А. Г. разработал методику, изготовил программную модель, построил графики.

Уласюк Н. Н. выполнил расчеты для вычисления параметров согласно разработанной методике.

Строгова А. С. (научный руководитель) осуществила постановку задачи и сопровождала выполнение исследований в рамках диссертационной работы.

Authors' contribution

Domenikof V. completed this work as part of his postgraduate studies for his candidate's dissertation.

Saperov A. developed a methodology, created a software model, and plotted graphs.

Ulasuk N. performed the calculations for the parameters according to the developed methodology.

Strogoва A. (the research supervisor) formulated the problem and supervised the research as part of the dissertation.

Сведения об авторах

Домеников В. П., асп., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Саперов А. Г., канд. техн. наук, пенсионер

Уласюк Н. Н., нач. управления технического обеспечения и обслуживания оргтехники, Белорусский национальный технический университет

Строгова А. С., канд. техн. наук, доц., зам. нач. главного управления науки – начальник отдела организации и сопровождения инновационной деятельности, Белорусский государственный университет

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 209-54-66
E-mail: domenicoff@gmail.com
Домеников Виталий Петрович

Information about the authors

Domenikof V., Postgraduate, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Saperov A., Cand. Sci. (Tech.), Pensioner

Ulasuk N., Head of the Department of Technical Support and Maintenance of Office Equipment, Belarusian National Technical University

Strogoва A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Deputy Head of the General Directorate of Science-Head of the Department of Organization and Support of Innovative Activities, Belarusian State University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 209-54-66
E-mail: domenicoff@gmail.com
Domenikof Vitaly



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-45-50>

УДК 621.317.335

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ- И КВЧ-ДИАПАЗОНАХ НА ОСНОВЕ БИКОНИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

В. А. ШУТОВИЧ, А. В. ГУСИНСКИЙ, М. В. ТУМИЛОВИЧ

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

Аннотация. Представлена методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов с использованием резонансного метода на основе биконического резонатора. Предложена усовершенствованная конструкция измерительной камеры, обеспечивающая высокую добротность и устойчивость резонансных частот. Разработан алгоритм обработки результатов, включающий идентификацию резонансных мод, вычисление параметров ε' и ε'' , а также коррекцию погрешностей, связанных с геометрией образца и неоднородностью поля. Проведено численное моделирование в CST Microwave Studio. Полученные данные подтверждают точность и воспроизводимость предложенного резонансного метода в СВЧ-диапазоне частот.

Ключевые слова: СВЧ, КВЧ, биконический резонатор, цилиндрический резонатор, КСВ, добротность, резонансная частота.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шутович, В. А. Методика измерения диэлектрической проницаемости материалов в СВЧ- и КВЧ-диапазонах на основе биконического резонатора / В. А. Шутович, А. В. Гусинский, М. В. Тумилович // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 45–50. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-45-50>.

METHOD FOR MEASURING THE DIELECTRIC PERMITTIVITY OF MATERIALS IN THE MICROWAVE AND EHF FREQUENCIES RANGE BASED ON A BICONICAL RESONATOR

VIKTOR SHUTOVICH, ALEXANDR GUSINSKIY, MIROSLAV TUMILOVICH

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

Abstract. A method for measuring the complex dielectric constant of materials using a resonant method based on a biconic resonator is presented. An improved design of the measuring chamber is proposed, which ensures high quality and stability of resonant frequencies. An algorithm for processing the results has been developed, including identification of resonant modes, calculation of the parameters ε' and ε'' , as well as correction of errors related to sample geometry and field inhomogeneity. Numerical simulation was performed in CST Microwave Studio. The data obtained confirm the accuracy and reproducibility of the proposed resonant method in the microwave frequency range.

Keywords: microwave, EHF band, biconical resonator, cylindrical resonator, SWR, quality factor, resonant frequency.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Shutovich V., Gusinskiy A., Tumilovich M. (2026) Method for Measuring the Dielectric Permittivity of Materials in the Microwave and EHF Frequencies Range Based on a Biconical Resonator. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 45–50. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-45-50> (in Russian).

Введение

Освоение коротковолновой части СВЧ-диапазона длин волн требует разработки новых типов материалов с улучшенными электрическими и эксплуатационными характеристиками. Создание радиоматериалов с заданными характеристиками основано на связи между потребительскими свойствами полученных веществ и конструкций из них с параметрами, определяющими технологию синтеза исходных материалов. В связи с этим важным направлением теоретических и экспериментальных исследований является изучение диэлектрических характеристик разрабатываемых материалов: изменение комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты, температуры, давления, напряженности электрического поля и прочих факторов. Эти исследования позволят выявить закономерности строения материала и дадут возможность получить информацию об электромагнитных свойствах новых материалов и о фундаментальных характеристиках, связанных с их электромагнитными параметрами.

Материал классифицируется как диэлектрик, если он способен запасать энергию при приложении внешнего электрического поля. Высокоточное измерение комплексной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$) материалов в миллиметровом диапазоне волн является важной задачей для разработки современной СВЧ-аппаратуры, новых подложек и композиционных материалов. Важно отметить, что диэлектрическая и магнитная проницаемости не являются константами. Они могут изменяться в зависимости от частоты, температуры, ориентации, давления, состава и молекулярной структуры материала. На частотах 27–37 ГГц точность и воспроизводимость измерений усложняются из-за возрастания омических потерь, необходимости работы с малыми объемами образцов и проблем селективного возбуждения рабочей моды [1, 2].

В статье описывается методика проведения исследования комплексной диэлектрической проницаемости при помощи установки на основе векторного анализатора цепей, волноводного тракта и модернизированной биконической резонансной камеры, которая позволяет быстро и точно получить необходимые экспериментальные данные, провести на их основе расчеты и определить значение комплексной диэлектрической проницаемости.

Конструкция биконической резонансной камеры

Существует много различных методов измерения и типов тестовой оснастки. Пакет программ для измерения характеристик материалов Keysight N1500A поддерживает три метода: метод разделенного цилиндра, метод диэлектрического резонатора с разделенным стержнем и метод возмущения емкости ASTM D252010. Управлять анализатором цепей можно с помощью внешнего персонального компьютера, подключенного через GPIB, LAN или USB в зависимости от используемого анализатора. При использовании анализаторов цепей серии ENA или PNA программное обеспечение можно установить прямо на анализатор и обойтись без внешнего компьютера.

Часто для измерения диэлектрической проницаемости материалов используются цилиндрические резонаторы. Однако они имеют ряд недостатков: сдвиг резонансной частоты и уменьшение добротности, вызванные отверстиями для ввода образца в торцевые стенки, необходимость высокой степени ортогональности торцевых стенок относительно продольной оси. Объемные резонаторы обладают высокой добротностью и резонируют на определенных частотах. Помещенный в полость резонатора образец влияет на частоту резонанса f и добротность Q резонатора. По этим параметрам можно рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость материала на одной частоте. Типовая измерительная система состоит из анализатора цепей, тестовой оснастки с объемным резонатором и программного обеспечения для расчетов.

Выбор биконической формы резонатора вместо более распространенного цилиндрического обусловлен отсутствием описанных недостатков и двумя ключевыми преимуществами: повышенная добротность Q и удобство размещения исследуемого образца [3]. Коническая форма обеспечивает плавное изменение импеданса и оптимальное распределение поля, что минимизирует краевые эффекты и омические потери на торцевых стенках в отличие от плоских торцевых стенок у цилиндрических резонаторов. Высокая собственная добротность Q_0 резонатора критически важна для точного измерения малых диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ исследуемых материалов.

Биконическая форма используется в сочетании с центральной цилиндрической частью, формируя резонансную камеру. Цилиндрическая центральная камера разделена на две части, одна из которых плотно вставляется в другую на регулируемое расстояние. Это позволяет варьировать объем резонатора и, соответственно, изменять резонансную частоту. Данное конструктивное решение упрощает ввод исследуемых образцов внутрь резонатора и их позиционирование. Внутренний диаметр одной цилиндрической вставки был выбран равным 25 мм, другой – 27 мм – для удобства работы с объектами. Толщина стенки – 1 мм. Кроме того, данная геометрия позволяет использовать конус как элемент настройки. С помощью него можно влиять на типы мод, распространяющиеся внутри резонатора.

Выбор моды TE_{01n} является ключевым решением для минимизации систематических погрешностей, связанных с неточностью установки образца, нежелательной генерацией паразитных мод и потерями на стыке двух частей цилиндрической вставки [4]. Мода TE_{01n} обладает идеальной азимутальной симметрией поля ($m = 0$): электрическое поле имеет только радиальную компоненту, а магнитное поле H – только азимутальную. По этой причине небольшое смещение образца вдоль оси не приводит к значительным погрешностям в ϵ' , что является частой проблемой для несимметричных мод (например, TE_{11n}) [5].

Из-за концентрации радиального электрического поля по большей части вдоль оси резонатора значительно снижается влияние возможных потерь на стыке двух половин частей цилиндрической вставки. А это важнейший фактор для обеспечения высокой точности устройства.

Благодаря тому, что TE_{01n} является единственной модой с осевой симметрией, ее можно эффективно отфильтровать от всех нежелательных мод (TE_{11} , TM_{11} и т. д.) с помощью азимутально-симметричных дросселей, правильно спроектированного осевого отверстия связи и угла конусной части [6]. Это будет гарантировать использование исключительно рабочей моды при исследовании резонансных явлений.

Таким образом, сочетание биконической геометрии и рабочей моды TE_{01n} позволяет создавать высокочастотную прецизионную измерительную систему, способную обеспечить необходимую точность для определения комплексной диэлектрической проницаемости в миллиметровом диапазоне длин волн. Кроме того, обеспечивается удобство работы с образцами. Изображение конструкции биконического резонатора приведено на рис. 1.

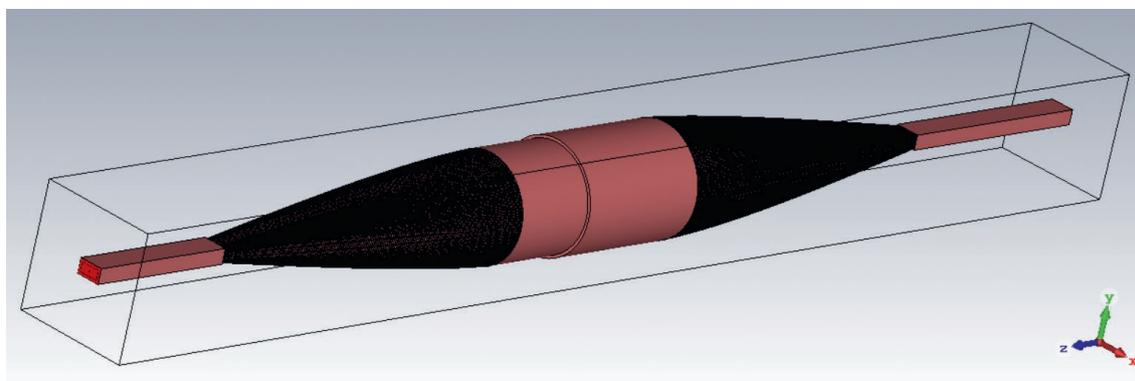


Рис. 1. Биконический резонатор
Fig. 1. Biconical resonator

Методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости

При разработке методики использовался резонансный способ измерения диэлектрической проницаемости материалов. Этот способ базируется на настройке резонатора без образца испытуемого материала на резонансную частоту. В момент резонанса электромагнитных колебаний осуществляется измерение резонансной частоты f и параметров S_{11} и S_{21} . Далее внутрь камеры помещается исследуемый образец, затем повторно происходят настройка резонансного состояния и фиксация резонансной частоты и S -параметров. Структурная схема измерительного устройства представлена на рис. 2.

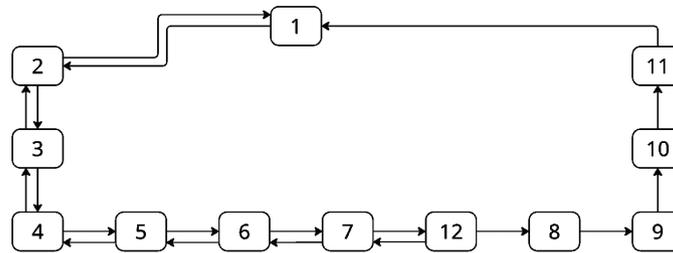


Рис. 2. Конструкция устройства для измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь
Fig. 2. Design of a device for measuring permittivity and dielectric loss tangent

Измерительное устройство работает следующим образом: векторный анализатор цепей 1 генерирует СВЧ-излучение в диапазоне 27–37 ГГц на входе 1, передающееся через коаксиальный кабель 2 к согласующему трансформатору 3, который с минимальными потерями возбуждает электромагнитные колебания внутри прямоугольного волновода 4. Далее волны распространяются вдоль волновода 4 (с поперечными размерами 7,2×3,4 мм). Волновод 4 заканчивается плоской торцевой стенкой, в середине которой проделано отверстие связи. С помощью переходного рупорного устройства 5 происходит фильтрация нежелательных мод. Далее волны типа TE_{01n} попадают в цилиндрическую стационарную часть камеры 6, а из нее – в передвижную цилиндрическую часть камеры 7, затем – в рупорное устройство 8. В камере устанавливается режим стоячей волны. Настройка резонатора на резонансную частоту осуществляется путем продольного перемещения цилиндрической части камеры 7. В некотором узком диапазоне частот (или нескольких диапазонах), зависящих от размера резонатора, устанавливается резонансный режим. В этом режиме волны могут покинуть резонансную камеру через рупорное устройство, отверстие связи и продолжить распространение в прямоугольном волноводе 9. Затем излучение через согласующий трансформатор 10 попадает в коаксиальный кабель 11, который соединен с входом 2 векторного анализатора цепей 1. Измерение параметров S_{11} , S_{21} и резонансной частоты f в объемном резонаторе выполняется с помощью векторного анализатора цепей 1.

В следующем этапе передвижная цилиндрической часть камеры 7 извлекается из стационарной цилиндрической части камеры 6, в часть камеры 7 помещается исследуемый образец 12, затем части камеры задвигаются обратно. Аналогично предыдущему этапу происходит настройка резонатора на резонансную частоту путем продольного перемещения цилиндрической части резонансной камеры 7, а также фиксируются новые измерения параметров S_{11} , S_{21} и резонансной частоты f . Затем осуществляется расчет добротности, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь диэлектрика на основе вышеописанного перечня измеренных величин. Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости определяются по формулам согласно [7]:

$$\varepsilon_r' = \frac{V_c(f_c - f_s)}{2V_s f_s} + 1; \quad (1)$$

$$\varepsilon_r'' = \left(\frac{V_c}{4V_s} \right) \left(\frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_c} \right), \quad (2)$$

где V_c – объем пустого резонатора (известная геометрическая характеристика); V_s – объем образца, вносимого в резонатор (должен быть малым по сравнению с V_c); f_c, f_s – резонансная частота пустого резонатора и с образцом соответственно; Q_c, Q_s – добротность пустого резонатора и с образцом соответственно.

Величина $Q_c(Q_s)$ определяется делением резонансной частоты $f_c(f_s)$ на ширину полосы пропускания резонатора Δf , определяемой по уровню –3 дБ.

Заключение

1. Разработана методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости ε^* , основанная на использовании высокодобротного биконического резонатора, работающего на акси-

ально-симметричной моде TE_{01n} в диапазоне частот 27–37 ГГц. Ключевыми преимуществами данной системы являются конструктивно встроенное устройство модовой селективности, а также обеспечение минимизации погрешностей измерений. Использование моды TE_{01n} с ее радиальным электрическим полем в центре резонатора позволяет применять метод возмущения поля с минимальными систематическими погрешностями. Размещение образца на оси гарантирует, что измеряемый сдвиг резонансной частоты Δf зависит исключительно от ϵ' , а не от неточностей позиционирования или возбуждения паразитных мод.

2. Максимальная точность измерения обеспечивается благодаря конической геометрии, придающей системе чрезвычайно высокую собственную добротность резонатора. Это критически важно для точного определения малых диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$).

3. Представленный биконический резонатор является не просто измерительной камерой, а прецизионным инструментом, способным обеспечить необходимую точность и надежность для исследований диэлектрических свойств современных материалов на частотах 27–37 ГГц. Полученные данные могут быть использованы для точного моделирования и проектирования систем и изделий миллиметрового диапазона волн (например, 5G/6G, радиолокации).

Список литературы

1. Белошицкий, А. П. Измерения в оптическом и микроволновом диапазонах длин волн / А. П. Белошицкий, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлектр., 2016. Ч. 1. Измерения в микроволновом диапазоне.
2. Гусев, Ю. А. Основы диэлектрической спектроскопии [Электронный ресурс] / Ю. А. Гусев. Казань: Казанский гос. ун-т, 2008. Режим доступа: https://kpfu.ru/docs/F312491640/gusev_diel_spectrosc.pdf. Дата доступа: 05.10.2025.
3. Простой метод определения собственных частот биконического резонатора / М. В. Андреев [и др.] // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2017. Т. 60, № 12. С. 717–724.
4. Дробахин, О. О. Учет влияния элементов связи на резонансные явления в биконических резонаторах [Электронный ресурс] / О. О. Дробахин, П. И. Заболотный, Е. Н. Привалов // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2010. Т. 53, № 7. С. 56–63. Режим доступа: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347010070071>. Дата доступа: 05.10.2025.
5. Measurements of Permittivity, Dielectric Loss Tangent, and Resistivity of Float-Zone Silicon at Microwave Frequencies / J. Krupka [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54, No 11. P. 3995–4001.
6. Дробахин, О. О. Резонансные свойства аксиально-симметричных микроволновых резонаторов с коническими элементами / О. О. Дробахин, П. И. Заболотный, Е. Н. Привалов // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 433–441.
7. Фомин, Д. Г. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн [Электронный ресурс] / Д. Г. Фомин, Н. В. Дударев, С. Н. Даровских // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 6. С. 1–12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun21/6/text.pdf>. Дата доступа: 03.10.2025.

Поступила 20.11.2025

Принята в печать 05.02.2026

References

1. Beloshitsky A. P., Gusinsky A. V., Kostykin A. M. (2016) *Measurements in the Optical and Microwave Wavelength Ranges. Part 1: Measurements in the Microwave Range: Study Guide*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
2. Gusev Yu. A. (2008) *Fundamentals of Dielectric Spectroscopy*. Kazan, Kazan State University. Available: https://kpfu.ru/docs/F312491640/gusev_diel_spectrosc.pdf (Accessed 5 October 2025) (in Russian).
3. Andreev M. V., Drobakhin O. O., Saltykov D. Yu., Gorev N. B., Kodzhesspirova I. F. (2017) A Simple Method for Determining the Eigenfrequencies of a Biconical Resonator. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Radioelektronika*. 60 (12), 717–724 (in Russian).
4. Drobakhin O. O., Zabolotny P. I., Privalov E. N. (2010) Considering the Influence of Coupling Elements on Resonant Phenomena in Biconical Resonators. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Radioelektronika*. 53 (7), 56–63. Available: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347010070071> (Accessed 5 October 2025) (in Russian).
5. Krupka J., Breeze J., Centeno A., Alford N., Claussen T., Jensen L. (2006) Measurements of Permittivity, Dielectric Loss Tangent, and Resistivity of Float-Zone Silicon at Microwave Frequencies. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 54 (11), 3995–4001.

6. Drobakhin O. O., Zabolotny P. I., Privalov E. N. (2009) Resonant Properties of Axially Symmetric Microwave Resonators with Conical Elements. *Radiophysics and Radioastronomy*. 14 (4), 433–441 (in Russian).
7. Fomin D. G., Dudarev N. V., Darovskikh S. N. (2021) Analysis of Methods for Measuring Dielectric Properties of Materials in the Microwave Wavelength Range. *Journal of Radio Electronics*. (6), 1–12. Available: <http://jre.cplire.ru/jre/jun21/6/text.pdf> (Accessed 3 October 2025) (in Russian).

Received: 20 November 2025

Accepted: 5 February 2026

Вклад авторов

Шутович В. А. провел анализ научно-технической литературы, сформировал алгоритм измерения диэлектрической проницаемости, выполнил построение модели в программном обеспечении, провел оптимизацию компонентов измерительной установки.

Гусинский А. В. сформулировал цель и задачи исследования, предложил основные составные части измерительной установки.

Тумилович М. В. провел анализ полученных результатов, сформулировал основные научные и практические результаты и выводы.

Authors' contribution

Shutovich V. conducted an analysis of scientific and technical literature, developed an algorithm for measuring dielectric constant, built a model in software, and optimized the components of the measuring setup.

Gusinskiy A. formulated the purpose and objectives of the study and proposed the main components of the measuring setup.

Tumilovich M. analyzed the results, formulated the main scientific and practical results and conclusions.

Сведения об авторах

Шутович В. А., асп., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Гусинский А. В., д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационно-измерительных систем, БГУИР

Тумилович М. В., д-р техн. наук, проф., проф. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Information about the authors

Shutovich V., Postgraduate, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Gusinskiy A., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Information and Measurement Systems, BSUIR

Tumilovich M., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 95-88-997
E-mail: shutovich321@gmail.com
Шутович Виктор Андреевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 95-88-997
E-mail: shutovich321@gmail.com
Shutovich Viktor



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-51-59>

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИЗНАКОВ РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО РЕАЛЬНЫМ ЗАПИСЯМ ИМПУЛЬСНОГО РАДИОЛОКАТОРА S-ДИАПАЗОНА

А. С. ХРАМЕНКОВ, В. Г. ЧИГРЯЙ

Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Разработан и исследован подход к анализу классификационных признаков радиолокационного распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе спектральных радиолокационных портретов, сформированных по реальным записям импульсного радара S-диапазона. Рассмотрена задача выделения и оценки информативности сигнальных признаков, доступных для практической реализации в радиолокаторах обнаружения и сопровождения. Проведена обработка экспериментальных данных и сформирован набор физически интерпретируемых признаков, отражающих свойства планерной составляющей и вторичной микродоплеровской модуляции отраженного сигнала. Для количественной оценки разделяющей способности признаков использованы критерий Фишера, количество информации и нормированные межклассовые расстояния. Установлено, что наибольшей информативностью обладают признаки микродоплеровской природы, обеспечивающие устойчивое разделение мультикоптерных и гибридных типов беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: малоразмерные беспилотные летательные аппараты, радиолокационное распознавание, спектральный радиолокационный портрет, вторичная модуляция, классификационные признаки, критерий Фишера, количество информации, межклассовое расстояние.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Храменков, А. С. Анализ информативности признаков распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов по реальным записям импульсного радиолокатора S-диапазона / А. С. Храменков, В. Г. Чигряй // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 51–59. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-51-59>.

ANALYSIS OF THE INFORMATION CONTENT OF RECOGNITION FEATURES OF SMALL-SIZED UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON REAL S-BAND PULSE RADAR RECORDINGS

ANDREI KHRAMIANKOU, VASIL CHYHRAI

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. An approach to analyzing classification features for radar recognition of small unmanned aerial vehicles based on spectral radar portraits generated from real S-band pulsed radar recordings is developed and studied. The problem of extracting and assessing the information content of signal features available for practical implementation in detection and tracking radars is considered. Experimental data were processed, and a set of physically interpretable features is generated, reflecting the properties of the airframe component and secondary micro-Doppler modulation of the reflected signal. To quantitatively evaluate the separating ability of features, the Fisher criterion, the amount of information and normalized interclass distances were used. It is established that micro-Doppler features possess the greatest information content, ensuring stable separation of multicopter and hybrid types of unmanned aerial vehicles.

Keywords: small unmanned aerial vehicles, radar recognition, spectral radar portrait, secondary modulation, classification features, Fisher criterion, amount of information, interclass distance.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Khramiankou A., Chyhray V. (2026) Analysis of the Information Content of Recognition Features of Small-Sized Unmanned Aerial Vehicles Based on Real S-Band Pulse Radar Recordings. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 51–59. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-51-59> (in Russian).

Введение

Современное развитие малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) привело к их широкому применению в гражданских и военных областях. Компактные габариты, низкая эффективная площадь рассеяния, сложные маневренные траектории и полеты на малых высотах существенно усложняют задачу их радиолокационного обнаружения и распознавания. В связи с этим разработка и анализ устойчивых классификационных признаков МБЛА остаются актуальной научно-технической задачей, связанной с обеспечением безопасности и защитой объектов инфраструктуры.

С практической точки зрения в радиолокаторах обнаружения и сопровождения наибольший интерес представляют признаки, формируемые в стандартных режимах работы без существенного усложнения аппаратной или алгоритмической части. К таким признакам относится спектральный радиолокационный портрет (СРЛП) ξ_s , представляющий собой упорядоченную совокупность комплексных амплитуд отраженного сигнала, распределение квадратов модулей которых по частоте Доплера соответствует распределению мощности отраженного сигнала [1].

Анализ СРЛП МБЛА позволяет выделить совокупность классификационных признаков, связанных с различными физическими механизмами рассеяния. В спектре отраженного сигнала присутствуют компоненты, обусловленные отражениями от основных элементов конструкции (планера), а также спектральные составляющие, возникающие вследствие микродвижений и вращения подвижных элементов (вторичная модуляция, ВМ). Эти особенности проявляются в форме спектра, ширине полосы и распределении энергии, что позволяет формировать физически интерпретируемые признаки распознавания. Наиболее достоверная оценка информативности таких признаков достигается при использовании реальных радиолокационных записей. В этом контексте особый интерес представляет открытый датасет полевых измерений импульсного радиолокатора S-диапазона, описанный в [2].

Цель исследований – анализ сигнальных классификационных признаков радиолокационного распознавания МБЛА на основе реальных записей импульсного радиолокатора S-диапазона. В рамках исследования сформированы СРЛП мультикоптерных и гибридных типов МБЛА, выделены физически интерпретируемые признаки и проведена количественная оценка их разделяющей способности с целью формирования набора признаков, пригодных для последующей разработки алгоритмов автоматической классификации.

Исходные данные

В исследовании использованы данные, опубликованные в [2], полученные при натурных измерениях на площадке аэропорта Лусун (г. Чжучжоу, Китай). Экспериментальные данные были получены с применением восьмиканального цифрового импульсного радиолокатора S-диапазона при измерениях в условиях прямой радиовидимости между радиолокатором и наблюдаемыми объектами.

Объекты наблюдения и условия регистрации. Датасет, описанный в [2], включал 13 файлов с записями радиолокационных наблюдений (Data 1–Data 13), охватывающих пять типов МБЛА: мультикоптерные (DJI Matrice 300, DJI Matrice 30T, DJI Inspire 2, DJI Mavic Air 2) и гибридный (CW-10). В исследовании использовались три типа МБЛА ($M = 3$): мультикоптерные – DJI Matrice 300 (тип 1), DJI Matrice 30T (тип 2) и гибридный – CW-10 (тип 3).

В табл. 1 представлены внешний вид, основные характеристики и параметры полета исследуемых МБЛА.

Радиолокатор и его технические характеристики. Регистрация сигналов осуществлялась импульсным когерентным радиолокатором с линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом со следующими параметрами: несущая частота $f_0 = 3,133$ ГГц (длина волны $\lambda = 9,6$ см); количество каналов антенной системы (передающих/приемных) ($n_r = 1$)/($n_{rc} = 8$); период повторения импульсов $T_r = 1000$ мкс; девиация частоты ЛЧМ-сигнала $\Delta f_0 = 120$ МГц; длительность импульса $T_0 = 2,083$ мкс; частота дискретизации $\Delta f_d = 491,52$ МГц; разрешающая способность по дальности $\Delta r = 1,25$ м; разрешающая способность по доплеровской частоте $\Delta F_{II} = 7,8125$ Гц.

Таблица 1. Внешний вид и характеристики исследуемых малоразмерных беспилотных летательных аппаратов
Table 1. Appearance and characteristics of the small-sized unmanned aerial vehicles under study

Характеристика, тип аппарата	DJI Matrice 300	DJI Matrice 30T	CW-10
Внешний вид			
Масса, кг	6,3	3,77	12
Габариты, м	0,81×0,67×0,43	0,47×0,585×0,215	1,6×2,6
Максимальная скорость, м/с	23	23	30
Частота вращения винтов, Гц	37–70	50–90	33–83
Количество винтов (лопастей)	4 (2)	4 (2)	1 (2) – полет; 4 (2) – взлет/посадка
Длина лопасти, м	0,27	0,21	0,30–0,80
Условия наблюдения			
Скорость полета, м/с	5,8	9,9	21,0
Дальность полета, м	250–451	621–679	3665–3540
Высота полета, м	30	58,81–65,00	329–332
Траектория полета	Удаление по S-образной траектории	Удаление	Приближение
Время суток	Ночь	Утро	Полдень
Среднее отношение сигнал/шум на выходе устройства когерентного накопления, дБ	35	30	18

Формат и структура входных данных. Исходные записи радиолокационных наблюдений были представлены в формате .raw и содержали дискретные отсчеты комплексного принятого сигнала. Каждая запись представляла собой массив данных, организованный по номеру приемного канала антенны, медленному (по номеру импульса) и быстрому (в пределах одного импульса) времени размерами $(n_{rc} = 8) \times (N_{fft} = 128) \times (N_T = 8192)$ соответственно (N_{fft} – количество отсчетов быстрого преобразования Фурье (БПФ)). Для всех типов МБЛА были сформированы выборки из записей принятого сигнала размером $N_i = 90, i = 1 \dots M$. На рис. 1 представлена реализация квадратурной составляющей принятого сигнала МБЛА DJI Matrice 30T, наблюдаемого в первом приемном канале антенной системы.

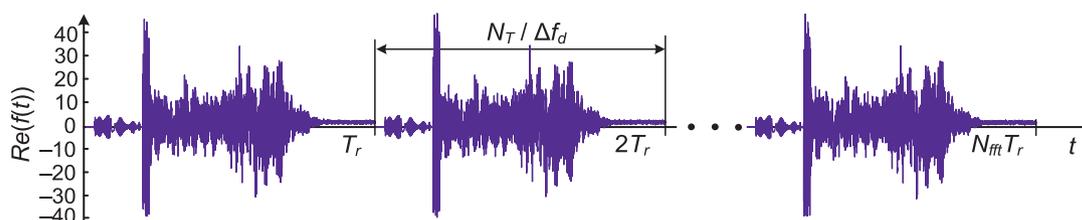


Рис. 1. Реализация квадратурной составляющей принятого сигнала малоразмерного беспилотного летательного аппарата DJI Matrice M30T
Fig. 1. Implementation of the quadrature component of the received signal of the small-sized unmanned aerial vehicle DJI Matrice M30T

Принятый сигнал представлял собой аддитивную смесь отраженного от МБЛА сигнала и радиолокационного фона, включающего внутренний шум и отражения от подстилающей поверхности и стационарных объектов. Для контроля положения цели по дальности использовались файлы с GPS-метками (Truth.txt), где с шагом 1 с указаны координаты цели (время, дальность, азимут, угол места). Полученные временные реализации принятого сигнала служат входными данными для обработки в интересах формирования СРЛП.

Обработка принятого сигнала и формирование спектрального радиолокационного портрета

Обработка принятого сигнала, представленного в формате .raw, выполнялась поэтапно в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 2.

Основной целью обработки являлось формирование СРЛП. Обработка принятого сигнала включала цифровое формирование луча путем взвешенного суммирования сигналов приемных каналов антенны, что обеспечивало пространственную селекцию и подавление боковых лепестков. Для повышения разрешения по дальности и увеличения отношения сигнал/шум выполнялась оптимальная фильтровая внутрипериодная обработка ЛЧМ-сигнала, для подавления боковых лепестков выходного сигнала дополнительно применялась весовая обработка с окном Хэмминга. Далее для каждого дискрета дальности осуществлялось БПФ по последовательности импульсов (по медленному времени) с последующим квадратичным детектированием, что позволяло получить матрицу «дальность–скорость». Формирование СРЛП выполнялось на основе эталонных данных о реальной дальности до МБЛА (файл Truth.txt): в пределах соответствующего диапазонного окна из матрицы «дальность–скорость» выбирался дискрет с максимальной мощностью, характеризующий отражения от планера цели, после чего соответствующий энергетический спектр использовался в качестве СРЛП ($\xi_i = |\xi_{si}|^2$, где $i = 1 \dots N_{fft}$).

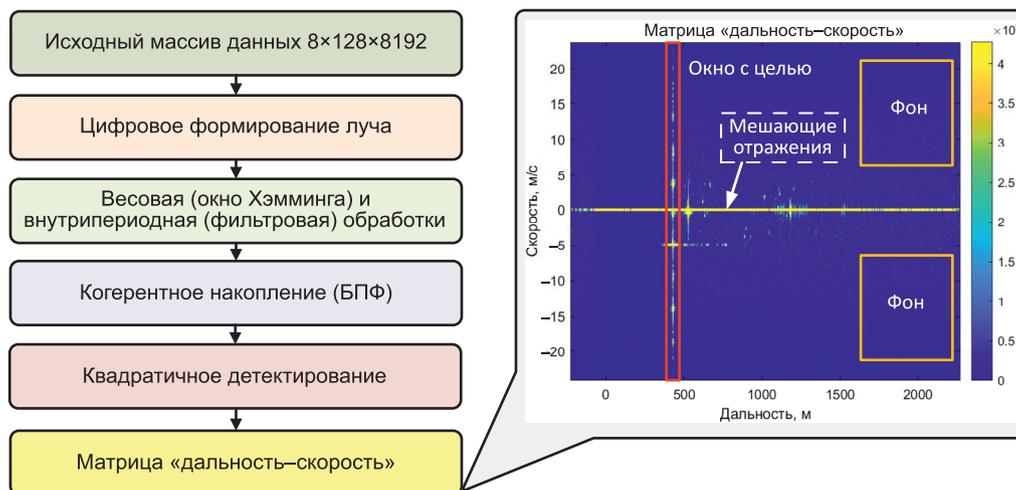


Рис. 2. Структурная схема обработки принятого сигнала
Fig. 2. Block diagram of the received signal processing

На рис. 3 представлены примеры СРЛП для МБЛА DJI Matrice 300 и CW-10.

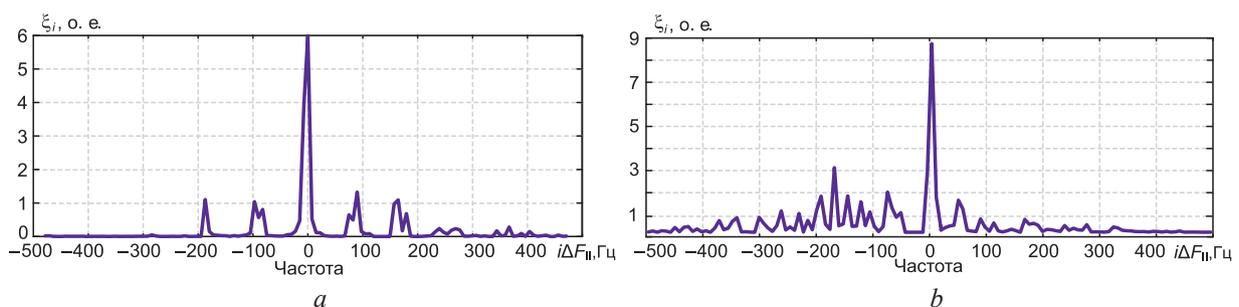


Рис. 3. Спектральный радиолокационный портрет для малоразмерного беспилотного летательного аппарата: *a* – DJI Matrice 300 (мультикоптерный); *b* – CW-10 (гибридный)

Fig. 3. Spectral radar profile for a small unmanned aerial vehicle:
a – DJI Matrice 300 (multicopter); *b* – CW-10 (hybrid)

В СРЛП DJI Matrice 300 (рис. 3, *a*) наблюдаются симметричные боковые компоненты ВМ на частотах ± 90 Гц и кратных им ± 180 Гц, соответствующие частоте вращения пропеллеров (около 45 Гц). В СРЛП CW-10 (рис. 3, *b*) наблюдаются симметричные относительно планера состав-

ляющие на частотах ± 50 Гц и несимметричная гребенчатая структура, отражающая колебания элементов конструкции. Отличительные особенности спектра, зависящие от кинематических и конструктивных характеристик МБЛА, могут быть количественно описаны с помощью классификационных признаков, формируемых на основе анализа СРЛП. Переход к следующему этапу обработки заключается в формализации этих признаков и их анализе в интересах решения задачи классификации.

Выделение классификационных признаков

В результате обзора [1–5] были выбраны классификационные признаки МБЛА, которые могут быть рассчитаны на основе СРЛП (табл. 2).

Таблица 2. Сигнальные классификационные признаки малоразмерных беспилотных летательных аппаратов
Table 2. Signal classification features of a small unmanned aerial vehicles

Название	Формула для расчета	Физический смысл
Ширина спектра планерной составляющей [3]	$\Delta F_{bd} = \sqrt{\frac{1}{P_{norm}} \sum_{i=l_{min}}^{l_{max}} (i\Delta F_{II} - f_{bd})^2 \xi_i},$ <p>где $P_{norm} = \sum_{i=l_{min}}^{l_{max}} \xi_i$ – нормирующий коэффициент; f_{bd} – частота планерной составляющей в СРЛП</p>	Габариты, ракурс МБЛА
Коэффициент асимметрии планерной составляющей [3]	$S_{bd} = \frac{1}{\Delta F_{bd}^3 P_{norm}} \sum_{i=l_{min}}^{l_{max}} [(i\Delta F_{II} - f_{bd})^3 \xi_i]$	Симметричность планерной составляющей
Экцесс планерной составляющей [3]	$Kur = \frac{1}{\Delta F_{bd}^4 P_{norm}} \sum_{i=l_{min}}^{l_{max}} [(i\Delta F_{II} - f_{bd})^4 \xi_i]$	«Островершинность» планерной составляющей
Спектральная энтропия [4]	$H_S = - \sum_{i=0}^{N_{fft}} \bar{\xi}_i \log_2(\bar{\xi}_i),$ <p>где $\bar{\xi}_i = \xi_i / \sum_{i=1}^{N_{fft}} \xi_i$ – i-й отсчет нормированного СРЛП</p>	Степень упорядоченности мощности в спектре
Коэффициент энергии цели [5]	$R_\sigma = \sigma_{bd}^2 / \sigma_{RM1}^2$, где σ_{bd}^2 – мощность планерной составляющей; σ_{RM1}^2 – мощность первой спектральной составляющей ВМ в СРЛП	Вклад ВМ в мощность принятого сигнала
Разность частот планерной составляющей и ближайшей составляющей ВМ [5]	$F_{DFD} = f_{bd} - f_{RM1} $, где f_{RM1} – частота ближайшей к планерной спектральной составляющей ВМ	Скорость вращения пропеллеров
Ширина спектра ВМ [1]	$\Delta F_{RM} = f_{bd} - f_{RM_max} $, где f_{RM_max} – максимальная частота спектральной составляющей ВМ	Длина пропеллеров и скорость вращения пропеллеров
Число модуляционных составляющих [5]	N_{RM} определяется путем подсчета количества областей, превысивших адаптивный порог Z_{CFAR}^*	Интенсивность ВМ и ракурс
Усредненный интервал следования спектральных составляющих ВМ [5]	$\Delta \bar{F}$ определяется путем анализа автокорреляционной функции СРЛП с компенсированной планерной составляющей	Скорость вращения пропеллеров

В соответствии с физическим смыслом сигнальные классификационные признаки могут быть разделены на две группы: признаки планерной составляющей (ΔF_{bd} , S_{bd} , Kur), описывающие спектральную форму отражений от корпуса, и признаки ВМ (H_S , R_σ , F_{DFD} , ΔF_{RM} , N_{RM} , $\Delta \bar{F}$), характеризующие структуру отражений от вращающихся элементов конструкции объекта.

На рис. 4 представлен внешний вид СРЛП МБЛА DJI Matrice 300 с пояснением извлекаемых параметров для расчета сигнальных классификационных признаков.

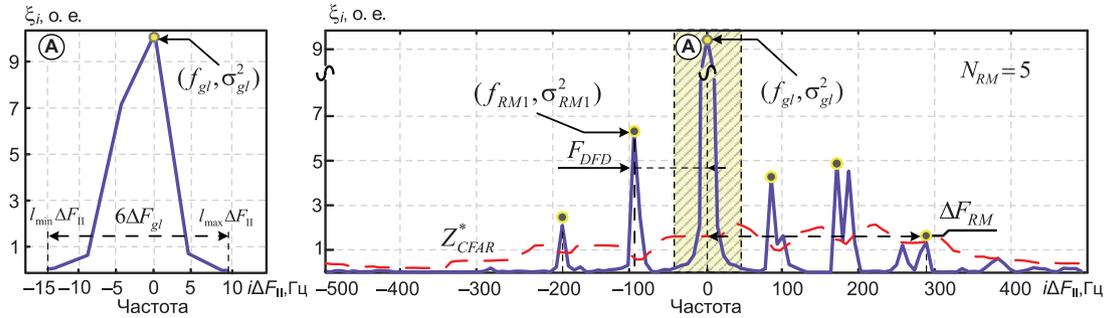


Рис. 4. Внешний вид спектрального радиолокационного портрета малоразмерного беспилотного летательного аппарата DJI Matrice 300 с пояснением классификационных признаков

Fig. 4. Spectral radar profile of the DJI Matrice 300 small unmanned aerial vehicle with an explanation of its classification features

Исходный набор экспериментальных данных после этапов обработки принятого сигнала, формирования СРЛП и выделения признаков представляется в виде совокупности пар

$$\left\{ (\mathbf{x}_n, A_{i,n}) \right\}_{n=1}^N, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_n = \left\| \Delta F_{bd}^{(n)} \ S_{bd}^{(n)} \ Kur^{(n)} \ H_S^{(n)} \ R_\sigma^{(n)} \ F_{DFD}^{(n)} \ \Delta F_{RM}^{(n)} \ N_{RM}^{(n)} \ \Delta \bar{F}^{(n)} \right\|^T$ – вектор значений классификационных признаков, полученный по n -й реализации принятого сигнала; $A_{i,n}$ – тип i -го МБЛА, наблюдаемого в n -й реализации принятого сигнала; $N = \sum_{i=1}^M N_i$ – общее количество реализаций, используемых для последующего анализа; N_i – объем выборки МБЛА i -го типа.

Введенное представление (1) позволяет перейти к анализу информативности выбранных классификационных признаков.

Анализ признаков

Для количественного анализа информативности выделенных радиолокационных признаков и оценки различий между типами МБЛА использовали набор метрик, включающий критерий Фишера, количество информации и нормированные межклассовые расстояния.

Критерий Фишера [6]. Применяется для оценки линейной разделяющей способности признака и определяется как отношение межтиповой дисперсии к внутритиповой

$$F_J(x_k) = \frac{\sum_{i=1}^M N_i (m(x_k | A_i) - m(x_k))^2}{\sum_{i=1}^M N_i \sigma^2(x_k | A_i)}, \quad (2)$$

где $m(x_k | A_i)$, $\sigma^2(x_k | A_i)$ – среднее значение и дисперсия признака x_k объекта типа A_i ; $m(x_k)$ – общее среднее значение признака x_k .

Количество информации [6]. Используется для оценки общей (в том числе нелинейной) статистической зависимости между признаком и меткой типа и определяется как уменьшение энтропии типа после наблюдения признака. При условии, что параметр x_k может принимать J дискретных значений x_{kj} ($j = 1 \dots J$), информативность k -го признака относительно множества объектов различных типов определяется по формуле

$$I(x_k) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J p(x_{kj}, A_i) \log \left(\frac{p(x_{kj}, A_i)}{p(x_{kj}) p(A_i)} \right), \quad (3)$$

где $p(x_{kj}, A_i)$ – совместное распределение вероятностей значений признака x_k для i -го типа A_i ; $p(x_{kj})$ – вероятность появления j -го значения k -го признака объекта i -го типа A_i ; $p(A_i)$ – априорная вероятность объекта i -го типа A_i среди всех M типов.

Нормированное межклассовое расстояние [6]. Для прямой количественной оценки различий между типами МБЛА использовалось нормированное межклассовое расстояние, вычисляемое для каждой пары типов по формуле:

$$D(x_k, A_i, A_m) = |m(x_k | A_i) - m(x_k | A_m)| / \sqrt{\sigma^2(x_k | A_i) + \sigma^2(x_k | A_m)}. \quad (4)$$

Совместное применение изложенных критериев оценки информативности и разделимости признаков (2)–(4) позволяет провести анализ информативности признаков с различных позиций: линейной разделимости, общей статистической зависимости и парных различий между типами. На основании имеющейся совокупности экспериментальных данных (1) для каждого выделенного радиолокационного признака были рассчитаны значения критерия Фишера, количества информации и нормированных межклассовых расстояний между типами МБЛА M300 (DJI Matrice 300), M30T (DJI Matrice 30T) и CW-10 (табл. 3).

Таблица 3. Оценка информативности сигнальных классификационных признаков малоразмерных беспилотных летательных аппаратов

Table 3. Evaluation of the information content of signal classification features of small unmanned aerial vehicles

Признак (x_k)	$F_J(x_k)$	$I(x_k)$	$D(x_k, M300, M30T)$	$D(x_k, M300, CW-10)$	$D(x_k, M30T, CW-10)$
ΔF_{bd}	0,112	0,223	0,64	0,009	0,50
S_{bd}	0,022	0,152	0,04	0,240	0,25
Kur	0,151	0,155	0,01	0,640	0,72
H_S	1,610	0,916	1,38	1,760	1,13
R_σ	0,244	0,174	0,35	0,720	1,65
F_{DFD}	0,049	0,270	0,44	0,210	0,16
ΔF_{RM}	0,015	0,260	0,08	0,130	0,21
N_{RM}	0,064	0,085	0,42	0,340	0,03
$\Delta \bar{F}$	0,290	0,211	0,64	0,810	0,21

Проведенный количественный анализ информативности сигнальных классификационных признаков показал, что наибольшей разделяющей способностью обладают признаки, связанные с проявлением ВМ отраженного сигнала (спектральная энтропия H_S , коэффициент энергии цели R_σ и усредненный интервал следования спектральных составляющих ВМ $\Delta \bar{F}$). В группе признаков, характеризующих планерную составляющую СРЛП, наибольшей информативностью обладает параметр эксцесса Kur .

Для наглядной оценки распределения наиболее информативных признаков и подтверждения полученных численных оценок были построены попарные диаграммы рассеяния для выбранных комбинаций признаков. Каждая точка на диаграммах соответствует оценке признака, полученной по одной реализации СРЛП, при этом типы МБЛА (DJI Matrice 300, Matrice 30T, CW-10) обозначены цветом и формой маркера. На рис. 5 представлены попарные диаграммы рассеяния с использованием признаков H_S , R_σ , $\Delta \bar{F}$ и Kur .

По совокупности метрик наибольшей информативностью обладает признак H_S , для которого получены максимальные значения критерия Фишера $F_J = 1,61$ и информативности $I = 0,916$, существенно превосходящие показатели остальных признаков; межклассовые расстояния для данного признака $D = 1,3–1,8$ подтверждают его высокую дискриминационную способность при разделении мультикоптерных МБЛА (DJI Matrice 300, Matrice 30T) и гибридного аппарата CW-10. Для признаков R_σ и $\Delta \bar{F}$ значения $F_J = 0,24–0,29$ и $I = 0,17–0,21$ обеспечивают уверенное разделение пар «мультикоптер–гибридный беспилотный летательный аппарат» ($D = 0,81–1,65$) при существенно меньших расстояниях между мультикоптерными платформами ($D = 0,64$), что отражает сходство их микродоплеровских характеристик. Для планерного признака Kur получены $F_J = 0,15$ и $I = 0,16$ при межклассовых расстояниях $D = 0,64–0,72$ для мультикоптеров и CW-10 и практически нулевом расстоянии между мультикоптерами ($D = 0,01$).

Таким образом, наибольшую разделяющую способность при радиолокационном распознавании МБЛА обеспечивают признаки, характеризующие микродоплеровскую ВМ отраженного сигнала (H_S , R_σ и $\Delta \bar{F}$), которые позволяют разделять мультикоптерные и гибридные типы МБЛА, тогда как признаки планерной составляющей обладают меньшей информативностью и могут использоваться преимущественно для уточняющей классификации.

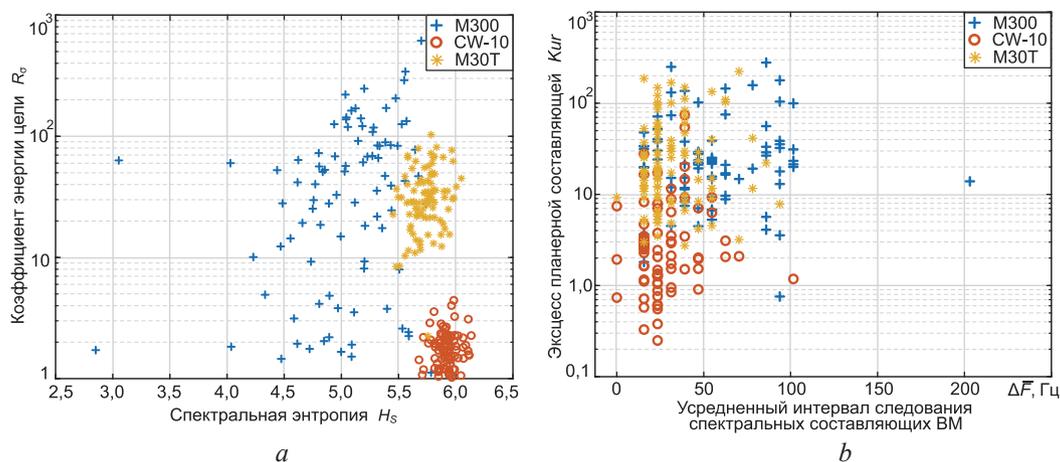


Рис. 5. Внешний вид попарных диаграмм рассеяния малоразмерных беспилотных летательных аппаратов: *a* – признаки R_{σ} и H_S ; *b* – признаки K_{ur} и $\Delta\bar{F}$
Fig. 5. Appearance of pairwise scatterplots of small unmanned aerial vehicles: *a* – features R_{σ} and H_S ; *b* – features K_{ur} and $\Delta\bar{F}$

Заключение

1. Разработан подход к анализу сигнальных классификационных признаков радиолокационного распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе реальных записей импульсного радара S -диапазона. Проведена обработка экспериментальных данных и сформированы спектральные радиолокационные портреты различных типов малоразмерных беспилотных летательных аппаратов, полученные в условиях, приближенных к практической эксплуатации радиолокационных систем обнаружения и сопровождения.

2. Выполнены выделение и формализация набора физически интерпретируемых классификационных признаков, отражающих как планерную составляющую отраженного сигнала, так и эффекты вторичной модуляции. Для оценки информативности выделенных признаков проведен комплексный количественный анализ с использованием критерия Фишера, количества информации и нормированных межклассовых расстояний.

3. Установлено, что наибольшей разделяющей способностью обладают признаки, связанные с микродоплеровскими эффектами, в частности, спектральная энтропия, соотношение энергий планерной и модуляционной составляющих, а также усредненная частота микродоплеровских колебаний. Продемонстрировано, что признаки планерной составляющей обладают меньшей информативностью, однако могут использоваться для уточняющей классификации внутри группы мультикоптерных аппаратов.

4. Представленные результаты определяют направления дальнейших исследований, связанные с анализом сигнальных признаков в других частотных диапазонах, а также расширением признакового пространства за счет включения траекторных характеристик движения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Перспективным направлением развития работы являются синтез и реализация устройства радиолокационного распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе методов машинного обучения с использованием сформированного набора информативных признаков.

Список литературы

1. Гейстер, С. Р. Адаптивное обнаружение-распознавание с селекцией помех по спектральным портретам / С. Р. Гейстер. Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2000.
2. Ground-Based Radar Detection Dataset of “Low Slow Small” Unmanned Aerial Vehicles Under Simple Field Background Conditions / Q. Lin [et al.] // Journal of Signal Processing. 2024. Vol. 40, No 11. P. 2095–2104. <https://doi.org/10.12466/xhcl.2024.11.014>.
3. Kretzschmar, R. A Comparison of Feature Sets and Neural Network Classifiers on a Bird Removal Approach for Wind Profiler Data / R. Kretzschmar, N. B. Karayiannis, H. Richner // Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2000). 2000. Vol. 2. P. 279–284. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2000.857909>.

4. Oh, B.-S. A UAV Classification System Based on FMCW Radar Micro-Doppler Signature Analysis / B.-S. Oh, X. Guo, Z. Lin // *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 132. P. 239–255. [https://doi.org/ 10.1016/j.eswa.2019.05.007](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.007).
5. Exploring Radar Micro-Doppler Signatures for Recognition of Drone Types / J. Yan [et al.] // *Drones*. 2023. Vol. 7, No 4. P. 1–15. [https://doi.org/ 10.3390/drones7040280](https://doi.org/10.3390/drones7040280).
6. Murphy, K. P. *Machine Learning: A Probabilistic Perspective* / K. P. Murphy. Cambridge: MIT Press, 2012.

Поступила 18.01.2026

Принята в печать 10.02.2026

References

1. Heister S. R. (2000) *Adaptive Detection-Recognition with Interference Selection Based on Spectral Portraits*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus Publ. (in Russian).
2. Lin Q., Qin Z., Jiang L., Wang X., Fan H. (2024) Ground-Based Radar Detection Dataset of “Low Slow Small” Unmanned Aerial Vehicles Under Simple Field Background Conditions. *Journal of Signal Processing*. 40 (11), 2095–2104. [https://doi.org/ 10.12466/xhcl.2024.11.014](https://doi.org/10.12466/xhcl.2024.11.014).
3. Kretzschmar R., Karayiannis N. B., Richner H. (2000) A Comparison of Feature Sets and Neural Network Classifiers on a Bird Removal Approach for Wind Profiler Data. *Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2000)*. 2, 279–284. [https://doi.org/ 10.1109/IJCNN.2000.857909](https://doi.org/10.1109/IJCNN.2000.857909).
4. Oh B.-S., Guo X., Lin Z. (2019) A UAV Classification System Based on FMCW Radar Micro-Doppler Signature Analysis. *Expert Systems with Applications*. 2019. 132, 239–255. [https://doi.org/ 10.1016/j.eswa.2019.05.007](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.007).
5. Yan J., Hu H., Gong J., Kong D., Li D. (2023) Exploring Radar Micro-Doppler Signatures for Recognition of Drone Types. *Drones*. 7 (4), 1–15. [https://doi.org/ 10.3390/drones7040280](https://doi.org/10.3390/drones7040280).
6. Murphy K. P. (2012) *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. Cambridge, MIT Press Publ.

Received: 18 January 2026

Accepted: 10 February 2026

Вклад авторов

Храменков А. С. обосновал концепцию исследования, сформулировал идею, цели и задачи исследования, просмотрел подготовленный текст рукописи.

Чиграй В. Г. собрал и систематизировал данные, выполнил моделирование, обобщил и интерпретировал результаты, подготовил текст рукописи и графические материалы.

Authors' contribution

Khramiankou A. substantiated the research concept, formulated the idea, objectives, and tasks of the study, looked at the prepared text of the manuscript.

Chyhrai V. collected and systematized the data, performed the modeling, generalized and interpreted the results, and prepared the manuscript text and graphical materials.

Сведения об авторах

Храменков А. С., канд. техн. наук, доц., зам. нач. каф. автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь

Чиграй В. Г., адъюнкт каф. автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
Минск, просп. Независимости, 220
Военная академия Республики Беларусь
Тел.: +375 17 287-42-46
E-mail: xras.tech@mail.ru
Храменков Андрей Сергеевич

Information about the authors

Khramiankou A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Automatics, Radar-Location and Send-Receive Devices, Military Academy of the Republic of Belarus

Chyhrai V., Adjunct of the Department of Automatics, Radar-Location and Send-Receive Devices, Military Academy of the Republic of Belarus

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220
Military Academy of the Republic of Belarus
Tel.: +375 17 287-42-46
E-mail: xras.tech@mail.ru
Khramiankou Andrei



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-60-67>

УДК 004.056

АНАЛИЗ СОБЫТИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЦИФРОВОЙ ПОДПИСИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В. А. ГЕРАСИМОВ^{1,2}, О. В. БОЙПРАВ², Р. Н. РУСЕЦКИЙ²

¹Научно-исследовательский институт технической защиты информации (Минск, Республика Беларусь)

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

Аннотация. В статье анализируются события информационной безопасности в системе электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры согласно требованиям положения о порядке информационного взаимодействия элементов национальной системы обеспечения кибербезопасности. Рассмотрены ключевые модули системы: модуль аутентификации, модуль выработки электронной цифровой подписи и модуль ее проверки, включая их подмодули для защиты данных, формирования подписей и верификации. Приведены примеры событий для журналирования, такие как аутентификация пользователей, формирование электронных документов, передача хэш-значений, признаки киберинцидентов, включая аномальные действия пользователей. Представлены события информационной безопасности, журналируемые в системах электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры. Выполнена оценка соответствия результатов журналирования этих событий требованиям, представленным в приказе Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 25 июля 2023 г. № 130.

Ключевые слова: событие информационной безопасности, электронная цифровая подпись, сравнительный анализ, виртуальная инфраструктура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Герасимов, В. А. Анализ событий информационной безопасности в системе электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры / В. А. Герасимов, О. В. Бойправ, Р. Н. Русецкий // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 60–67. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-60-67>.

ANALYSIS OF INFORMATION SECURITY EVENTS IN AN ELECTRONIC DIGITAL SIGNATURE SYSTEM BASED ON A VIRTUAL INFRASTRUCTURE

VIACHESLAV GERASIMOV^{1,2}, OLGA BOIPRAV², ROMAN RUSETSKI²

¹Research Institute for Technical Protection of Information (Minsk, Republic of Belarus)

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

Abstract. This article analyzes information security events in a virtual infrastructure-based electronic digital signature system in accordance with the requirements of the regulations on the procedure for information exchange between elements of the national cybersecurity system. Key system modules are considered: the authentication module, the electronic digital signature generation module, and the verification module, including their submodules for data protection, signature generation, and verification. Examples of events for logging are provided, such as user authentication, electronic document generation, hash value transfer, and indicators of cyber incidents, including abnormal user actions. Information security events logged in virtual infrastructure-based electronic digital signature systems are presented. An assessment is made of the compliance of the logging results for these events with the requirements set out in Order No 130 of the Operational and Analytical Center under the President of the Republic of Belarus dated July 25, 2023.

Keywords: information security event, electronic digital signature, comparative analysis, virtual infrastructure.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Gerasimov V., Boiprav O., Rusetski R. (2026) Analysis of Information Security Events in an Electronic Digital Signature System Based on a Virtual Infrastructure. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 60–67. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-60-67> (in Russian).

Введение

С момента введения в жизнь человечества информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) они стали фундаментом современного государственного управления, бизнеса и мировой экономики. Страны мира активно используют преимущества ИКТ, однако их повсеместное распространение привело к экспоненциальному росту объема информации, которая сегодня сравнивается с «новой нефтью». Этот прогресс сопровождается новыми рисками, вызовами и угрозами, поскольку зависимость общества от ИКТ растет, а сами технологии остаются изначально уязвимыми. Конфиденциальность, целостность и доступность информации постоянно подвергаются угрозам от быстро эволюционирующих рисков киберпространства. В критической точке находится доверие населения и организаций к ИКТ, которое подрывается отсутствием адекватной кибербезопасности¹.

Одним из ключевых элементов современной информационной инфраструктуры является технология электронной цифровой подписи (ЭЦП), особенно в форме системы ЭЦП на основе виртуальной инфраструктуры (ЭЦПВИ). Событие информационной безопасности в контексте системы ЭЦПВИ – это идентифицированный случай состояния системы или сети, указывающий на возможное нарушение политики информационной безопасности, отказ средств защиты информации или ранее неизвестную ситуацию, связанную с угрозой [1]. Классификация событий информационной безопасности в системе ЭЦПВИ на основе виртуальной инфраструктуры становится неотъемлемой частью стратегии кибербезопасности. Киберинцидент – событие, которое фактически или потенциально угрожает конфиденциальности, целостности, подлинности, доступности и сохранности информации, а также представляет собой нарушение (угрозу нарушения) политики безопасности². Это более широкое понятие, включающее не только события, но и инциденты, такие как успешные атаки, утечки данных или сбои в работе. Классификация позволяет систематизировать угрозы по типам (например, по степени воздействия, по источнику атаки или уязвимостям инфраструктуры), что облегчает разработку мер реагирования и профилактики [2].

В условиях виртуальной среды, где ресурсы распределены и динамичны, классификация помогает выделить инциденты, связанные с облачными сервисами, виртуализацией или сетевыми протоколами. Это способствует скоординированным действиям государственных органов и организаций, как предусмотрено рекомендациями Национального центра кибербезопасности Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь. В контексте национальной безопасности Беларуси классификация событий информационной безопасности системы ЭЦПВИ напрямую способствует обеспечению безопасного функционирования объектов информационной инфраструктуры. Классификация не только помогает минимизировать последствия кибератак, но и укрепляет доверие к ИКТ как катализаторам экономического роста и социального развития. Введение такой классификации требует интеграции мониторинга, анализа и реагирования в повседневную практику, что позволит своевременно адаптироваться к новым угрозам.

Цель представленных в статье исследований – анализ событий информационной безопасности в системе ЭЦПВИ с учетом требований, изложенных в приказе Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 25 июля 2023 г. № 130. Для достижения цели решались следующие задачи:

¹ Рекомендации государственным органам и иным организациям (в том числе владельцам критически важных объектов информатизации) по выполнению обязательных для исполнения требований законодательства в сфере обеспечения кибербезопасности, в том числе технической и криптографической защиты информации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.oac.gov.by/public/content/files/files/recom.pdf>. Дата доступа: 29.11.2025.

² О кибербезопасности: Указ Президента Республики Беларусь от 14 февраля 2024 г. № 40 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.oac.gov.by/public/content/files/files/law/decrees-rb/2023-40.pdf>. Дата доступа: 29.11.2025.

- определение событий в системе ЭЦПВИ, подлежащих журналированию, с выявлением киберинцидентов в такой системе;
- оценка соответствия результатов журналирования этих событий требованиям, представленным в приказе Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 25 июля 2023 г. № 130.

Анализ событий системы электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры

Система ЭЦПВИ представляет собой программно-аппаратный комплекс для выработки ЭЦП и формирования электронного документа (ЭД). Систему можно разделить на несколько модулей.

- Модуль аутентификации. Предназначен для аутентификации сторон, где одной стороной является клиент системы, который с помощью клиентской программы и прикладной системы аутентифицируется в системе ЭЦПВИ, а второй – сама система ЭЦПВИ. Модуль разделен на подмодули, один из которых обеспечивает защиту канала передачи данных с помощью средства линейного шифрования согласно п. 17 перечня государственных стандартов, взаимосвязанных с техническим регламентом Республики Беларусь ТР 2013/027/ВУ «Информационные технологии. Средства защиты информации. Информационная безопасность» приказа Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 28 декабря 2022 г. № 207 для обеспечения конфиденциальности передаваемых данных. Другой подмодуль, частично соответствующий СТБ 34.101.87–2022 «Информационные технологии и безопасность. Инфраструктуры аутентификации», обеспечивает аутентификацию пользователя³. При этом, если система ЭЦПВИ используется внутри криптографической границы, подмодуль линейного шифрования может быть отключен, а защита передаваемых данных может обеспечиваться с помощью штатных средств, применяемых внутри защищенного периметра.

- Модуль выработки ЭЦП. Предназначен для выработки значения ЭЦП и формирования ЭД. Разделен на подмодули, один из которых обеспечивает формирование подписанных данных с использованием алгоритмов хэширования согласно п. 5 перечня государственных стандартов, взаимосвязанных с ТР 2013/027/ВУ для обеспечения целостности данных перед подписанием. Другой подмодуль, соответствующий СТБ 34.101.45–2013 «Информационные технологии и безопасность. Алгоритмы электронной цифровой подписи и транспорта ключа на основе эллиптических кривых», обеспечивает выработку ЭЦП на основе асимметричных криптографических алгоритмов. Третий подмодуль обеспечивает технологическую проверку значения ЭЦП перед формированием ЭД.

- Модуль проверки ЭЦП. Обеспечивает проверку ЭЦП ЭД на основе асимметричных криптографических алгоритмов, соответствует СТБ 34.101.45–2013.

Событиями, которые подлежат журналированию в каждом модуле системы ЭЦПВИ, являются [1]:

- использование личного ключа пользователя;
 - аутентификация пользователей в системе;
 - получение электронного документа или его хэш-значения;
 - начало и окончание формирования документа пользователем;
 - получение от пользователя подтверждения на подпись документа;
 - передача хэш-значения подписанных данных пользователя между компонентами системы;
 - получение значения ЭЦП;
 - выгрузка и отправка ЭД пользователю.
- Киберинцидентами в системе ЭЦПВИ являются:
- действия пользователя в ночное время;
 - действия пользователя, выполняемые с аномальной скоростью;

³ Герасимов, В. А. Механизмы защиты информации при выработке облачной электронной цифровой подписи / В. А. Герасимов, М. А. Казловский, О. В. Бойправ // Комплексная защита информации: матер. XXVIII науч.-практ. конф., г. Гомель, 23–25 мая 2023 г. Гомель: Белор. гос. ун-т трансп., 2023. С. 257–261. <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/52449>.

– действия пользователя, пропускающие стандартные действия в рамках определенных процессов;

– дублирование пользовательских сеансов.

Для организации процессов анализа, обнаружения и реагирования на киберинциденты [3] необходимо обеспечить централизованный сбор и обработку событий с использованием SIEM-системы. Способ сбора событий определяется исходя из функциональных возможностей системы ЭЦПВИ. SIEM-система обеспечивает как активный, так и пассивный сбор событий с источников данных. При пассивном сборе событий SIEM-система ожидает событий от удаленного сервера [4], что является более предпочтительным с точки зрения экономии вычислительных ресурсов и трудозатрат на настройку, при активном – инициирует подключение к источнику событий [5].

Средством для организации активного сбора событий выступает агент либо коннектор SIEM-системы. После организации получения событий в SIEM-систему реализуются такие этапы обработки, как парсинг, фильтрация, агрегация, обогащение и корреляция. Для нормализации входящих потоков данных используются базовые парсеры [6], работающие с распространенными форматами данных [7] (syslog, json, CEF). При необходимости может потребоваться дополнительная разработка регулярных выражений.

Система ЭЦПВИ протоколирует события в виде строки или JSON-объекта. Первый вариант удобен для прочтения человеком и ручного анализа киберинцидентов [8]. Вариант протоколирования событий в виде JSON-объекта подходит для передачи этих событий в SIEM-систему, так как написание парсера для JSON-объекта проще, чем для строки. Примерами протоколируемых событий в виде строки являются:

```
13.11.2025 14:56:16.442 [INFO] session_code = REQUEST STARTED from address: 10.233.105.222, [NameService] /api/vn/name"
```

```
13.11.2025 14:56:16.442 [INFO] session_code = empty, [NameService] start auth
```

```
13.11.2025 14:56:16.442 [INFO] session_code = 248d1303, [NameService] user with ID=5 auth success in system!
```

```
13.11.2025 14:56:16.442 [INFO] session_code = 248d1303, [NameService] user with ID=5 auth success in system!
```

```
13.11.2025 14:56:16.442 [WARNING] session_code = 248d1303, [NameService] user with ID=5 incorrect OTP!
```

```
13.11.2025 11:16:15.101 [ERROR] session_code = 248d1303, [NameService] user with ID=5 enter incorrect OTP 3 times!
```

```
13.11.2025 11:16:15.123 [INFO] session_code=248d1303, [NameService] finish auth
```

```
13.11.2025 14:36:23.433 [INFO] session_code = REQUEST FINISHED from address: 10.233.105.222, [NameService] /api/vn/name"
```

В виде JSON-объекта событие выглядит следующим образом:

```
{“message”: “REQUEST STARTED from address: 10.233.105.222, [NameService] /api/vn/name”, “service”: “NameService”, “session_code”: “REQUEST STARTED”, “timestamp”: “13.11.2025 14:56:16.442”, “type”: “INFO”}
```

```
{“message”: “start auth”, “service”: “NameService”, “session_code”: “empty”, “timestamp”: “13.11.2025 14:56:16.442”, “type”: “INFO”}
```

```
{“message”: “user with ID=5 auth success in system!”, “service”: “NameService”, “session_code”: “248d1303”, “timestamp”: “13.11.2025 14:56:16.442”, “type”: “INFO”}
```

```
{“message”: “user with ID=5 auth success in system!”, “service”: “NameService”, “session_code”: “248d1303”, “timestamp”: “13.11.2025 14:56:16.442”, “type”: “INFO”}
```

```
{“message”: “user with ID=5 incorrect OTP!”, “service”: “NameService”, “session_code”: “248d1303”, “timestamp”: “13.11.2025 14:56:16.442”, “type”: “WARNING”}
```

```
{“message”: “user with ID=5 enter incorrect OTP 3 times!”, “service”: “NameService”, “session_code”: “248d1303”, “timestamp”: “13.11.2025 11:16:15”, “type”: “ERROR”}
```

```
{“message”: “finish auth”, “service”: “NameService”, “session_code”: “248d1303”, “timestamp”: “13.11.2025 11:16:15.11”, “type”: “INFO”}
```

```
{“message”: “REQUEST FINISHED from address: 10.233.105.222, [NameService] /api/vn/name”, “service”: “NameService”, “session_code”: “REQUEST FINISHED”, “timestamp”: “13.11.2025 14:36:23.433”, “type”: “INFO”}
```

Под расширенными методами определения киберинцидентов будет пониматься метод, при котором происходят сбор и предобработка критических данных системы, а после на основе расчета статистических показателей и определения пороговых значений будет дан вердикт о том, что событие является киберинцидентом или же нет. Данный метод описан в [1]. По результатам работы метода система ЭЦПВИ также сгенерирует событие, описанное выше.

Результаты исследований и их обсуждение

С целью анализа событий, подлежащих журналированию [9, 10], были рассмотрены требования к информационным системам приказа Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 25 июля 2023 г. № 130. На основе требований построена табл. 1 по журналированию событий в системе ЭЦПВИ.

Таблица 1. Выполнение требований для прикладного программного обеспечения
Table 1. Fulfilment of requirements for application software

Требование	Требование выполняется	Обоснование
Аутентификация (вход и (или) выход) пользователей	Да	Журналируются сведения о событиях типа «аутентификация пользователей в системе» (сведения о неуспешных попытках аутентификации и выходе из системы)
Успешные и неуспешные попытки аутентификации	Да	Журналируются сведения о событиях типов «ввод данных аутентификации в системе», «доступ к личному ключу»
Создание, копирование, перемещение, удаление, модификация учетных записей пользователей и конфигурационных файлов	Частично	В системе ЭЦПВИ за создание, копирование, перемещение, удаление, модификацию учетных записей пользователей отвечает отдельный компонент, протоколирование работы с конфигурационным файлом осуществляется средствами операционной системы
Неудавшиеся или отмененные действия пользователей	Да	Журналируются сведения о событиях, связанных с неудавшимися или отмененными действиями пользователей (создание ЭД, закрытие сессии (не выполнив процесс до конца))
Действия пользователей (доступ к объекту (данным), изменения объекта (данных), удаление объекта (данных))	Да	Журналируются сведения о событиях, связанных с получением доступа к объекту (данным), изменением объекта (данных), удалением объекта (данных)

Как следует из табл. 1, практически все требования к протоколированию событий соблюдаются. Среди выполняемых частично – управление учетными записями пользователей и модификация конфигурационных файлов. Они осуществляются другими компонентами, не рассмотренными в данной статье.

Был проведен анализ состава записи события информационной безопасности прикладного программного обеспечения, включающей поля на основе выполнения требований к записи события в системе ЭЦПВИ (табл. 2).

Таблица 2. Выполнение требований к записи события
Table 2. Meeting the event recording requirements

Требование	Требование выполняется	Обоснование
Дата и время возникновения события	Да	Все записи логов начинаются с даты и времени события
Наименование источника события (сервис и (или) служба)	Да	В каждой записи присутствует наименование источника (сервиса или службы)
Наименование учетных записей пользователей	Частично	Наименование учетных записей пользователя можно получить по полю <code>session_code</code>
IP-адрес источника	Да	В записи при первичном вызове контроллера присутствует IP-адрес источника

Окончание табл. 2
Ending of Tab. 2

Требование	Требование выполняется	Обоснование
IP-адрес хоста (устройств)	Частично	В записях сервиса нет данных об IP-адресе хоста. Его можно получить из логов модуля линейного шифрования
Время начала операции	Да	При первичном вызове контроллера присутствует запись с временем начала операции
Время окончания операции	Да	При завершении действий в контроллере присутствует запись с временем окончания операции
Описание события информационной безопасности	Да	Каждая запись содержит описание события

На основании проведенного анализа установлено, что большая часть требований к составу записей информационной безопасности в системе ЭЦПВИ соблюдается. Такие поля, как «Наименование учетных записей пользователей» и «IP-адрес хоста (устройств)», не указаны в записи явно, однако при включении в записи возможно наличие необходимой информации.

Заключение

1. Проведен сравнительный анализ событий информационной безопасности в системе электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры с требованиями приказа Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь от 25 июля 2023 г. № 130. Определены события для журналирования, а также форматы протоколирования (строковое представление и JSON-объект). Установлено, что журналирование сведений о событиях информационной безопасности в системе электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры практически в полной мере соответствует указанным требованиям. В частности, в записях о событиях информационной безопасности такой системы присутствуют следующие поля: дата и время возникновения события; наименование источника события; IP-адрес источника; время начала операции; время окончания операции; описание события информационной безопасности.

2. Расхождение журналирования сведений о событиях информационной безопасности в системе электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры с требованиями указанного приказа обусловлено тем, что в записях об указанных событиях отсутствуют такие поля, как наименование учетных записей пользователей и IP-адрес хоста (устройств). Для устранения расхождения целесообразно реализовать следующие решения в системе электронной цифровой подписи на основе виртуальной инфраструктуры:

- внедрить механизм автоматического извлечения и записи наименований учетных записей пользователей в запись события информационной безопасности, используя существующее поле `session_code`, чтобы обеспечить полное соответствие требованиям;
- реализовать сбор событий информационной безопасности с модуля линейного шифрования для протоколирования IP-адреса хоста (устройства), дополняя записи, где это поле отсутствует;
- обновить схему журналирования и форматы протоколирования в соответствии с требованиями, добавив указанные поля в обязательные атрибуты записей событий.

Список литературы

1. Герасимов, В. А. Метод обнаружения событий информационной безопасности в системах облачной подписи / В. А. Герасимов, О. В. Бойправ // Цифровая трансформация. 2024. Т. 30, № 2. С. 77–84. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-2-77-84>.
2. Микрюков, А. А. Классификация событий в системах обеспечения информационной безопасности на основе нейросетевых технологий / А. А. Микрюков, А. В. Бабаш, В. А. Сизов // Открытое образование. 2019. Т. 23, № 1. С. 57–63. <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2019-23-1-57-63>.
3. Бойправ, В. А. Методика и программное средство для проведения аудита систем управления информационной безопасности / В. А. Бойправ, Л. Л. Утин // Информатика. 2022. Т. 19, № 4. С. 42–52. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-4-42-52>.

4. Критерии и показатели оценивания качества проведения расследования инцидента информационной безопасности при целевой кибератаке / С. И. Смирнов [и др.] // Российский технологический журнал. 2024. Т. 12, № 3. С. 25–36. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-25-36>.
5. Михайлова, В. Д. Описание инцидента при тестировании информационной безопасности киберфизических систем / В. Д. Михайлова // Инженерный вестник Дона. 2025. № 6.
6. Konchitchki, Y. Event Study Methodologies in Information Systems Research / Y. Konchitchki, D. E. O’Leary // International Journal of Accounting Information Systems. 2011. Vol. 12, Iss. 2. P. 99–115.
7. González-Granadillo, G. Security Information and Event Management (SIEM): Analysis, Trends, and Usage in Critical Infrastructures / G. González-Granadillo, S. González-Zarzosa, R. Diaz // Sensors. 2021. Vol. 21, No 14. <https://doi.org/10.3390/s21144759>.
8. Macaneata, C. Overview of Security Information and Event Management Systems / C. Macaneata // Informatica Economica, Academy of Economic Studies. 2024. Vol. 28, Iss. 1. P. 15–24.
9. Sayankar, V. N. A Review on Information Systems Audit / V. N. Sayankar // Research Journal of Engineering and Technology. 2024. Vol. 4, Iss. 3.
10. Vandapuye, S. An Overview of Information Systems in Auditing: Insights from Bibliometric Research / S. Vandapuye, S. Jabraoui // Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias. 2024. Vol. 3. DOI: 10.56294/sctconf20241013.

Поступила 10.12.2025

Принята в печать 05.01.2026

References

1. Gerasimov V. A., Boyprav O. V. (2024) Method for Information Security Events Detection in a Cloud Signature Systems. *Digital Transformation*. 30 (2), 77–84. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2024-30-2-77-84> (in Russian).
2. Mikryukov A. A., Babash A. V., Sizov V. A. (2019) Classification of Events in Information Security Systems Based on Neural Networks. *Open Education*. 23 (1), 57–63. <https://doi.org/10.21686/1818-4243-2019-23-1-57-63> (in Russian).
3. Boiprav V. A., Utin L. L. (2022) Methodology and Software Development for Auditing Information Security Management Systems. *Informatics*. 19 (4), 42–52. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2022-19-4-42-52> (in Russian).
4. Smirnov S. I., Ereemeev M. A., Magomedov Sh. G., Izerkin D. A. (2024) Criteria and Indicators for Assessing the Quality of the Investigation of an Information Security Incident as Part of a Targeted Cyberattack. *Russian Technological Journal*. 12 (3), 25–36. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-3-25-36> (in Russian).
5. Mikhailova V. D. (2025) Description of an Incident During Testing of Information Security of Cyber-Physical Systems. *Engineering Bulletin of the Don*. (6) (in Russian).
6. Konchitchki Y., O’Leary D. E. (2011) Event Study Methodologies in Information Systems Research. *International Journal of Accounting Information Systems*. 12 (2), 99–115.
7. González-Granadillo G., González-Zarzosa S., Diaz R. (2021) Security Information and Event Management (SIEM): Analysis, Trends, and Usage in Critical Infrastructures. *Sensors*. 21 (14). <https://doi.org/10.3390/s21144759>.
8. Macaneata C. (2024) Overview of Security Information and Event Management Systems. *Informatica Economica, Academy of Economic Studies*. 28 (1), 15–24.
9. Sayankar V. N. (2024) A Review on Information Systems Audit. *Research Journal of Engineering and Technology*. 4 (3).
10. Vandapuye S., Jabraoui S. (2024) An Overview of Information Systems in Auditing: Insights from Bibliometric Research. *Salud, Ciencia y Tecnología – Serie de Conferencias*. 3. DOI: 10.56294/sctconf20241013.

Received: 10 December 2025

Accepted: 5 January 2026

Вклад авторов

Герасимов В. А. провел исследование, выполнил анализ полученных результатов, связанных с событиями информационной безопасности.

Бойправ О. В. осуществила постановку задачи исследования.

Русецкий Р. Н. провел исследование в рамках сбора событий информационной безопасности SIEM-системой.

Authors' contribution

Gerasimov V. conducted a study and performed an analysis of the obtained results related to information security events.

Voiprav O. carried out the formulation of the research task.

Rusetski R. conducted a study as part of the collection of information security events by the SIEM system.

Сведения об авторах

Герасимов В. А., магистр, сотр. Научно-исследовательского института технической защиты информации, асп. каф. защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Бойправ О. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. защиты информации, БГУИР

Русецкий Р. Н., магистрант каф. защиты информации, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220088, Республика Беларусь,
Минск, ул. Первомайская, 26, корп. 2
Научно-исследовательский институт
технической защиты информации
Тел.: +375 17 302-81-71
E-mail: vger@niitzi.by
Герасимов Вячеслав Александрович

Information about the authors

Gerasimov V., M. Sci., Researcher at the Research Institute for Technical Protection of Information, Post-graduate at the Department of Information Protection, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Voiprav O., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Information Security, BSUIR

Rusetski R., Master's Student at the Department of Information Security, BSUIR

Address for correspondence

220088, Republic of Belarus,
Minsk, Pervomayskaya St., 26, Bld. 2
Research Institute
for Technical Protection of Information
Tel.: +375 17 302-81-71
E-mail: vger@niitzi.by
Gerasimov Viacheslau



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-68-74>

УДК 004.42; 004.5

АЛГОРИТМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ НА СТОРОНЕ КЛИЕНТА

А. А. СТРУКОВА, Л. Ю. ШИЛИН

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

Аннотация. В статье рассматривается проблема организации эффективного взаимодействия компонентов в клиентских веб-приложениях, построенных на основе компонентных архитектур. Показано, что при увеличении масштаба интерфейсных систем традиционные подходы к обмену данными между компонентами приводят к избыточным вычислениям, усложнению поддержки и снижению производительности. На примере фреймворков проанализированы существующие механизмы синхронизации состояния и обновления пользовательского интерфейса, выявлены их ограничения, связанные с глобальным отслеживанием изменений и отсутствием встроенной поддержки двусторонней передачи данных между компонентами. Предложена двухсвязная модель взаимодействия компонентов (BCLM), основанная на прямом обмене релевантными изменениями состояния между логически связанными компонентами. Формализован механизм синхронизации через отображения публикации и применения данных, обеспечивающий адаптивное обновление интерфейса без участия централизованных хранилищ. Показано, что предложенный подход позволяет уменьшить количество перерендерингов и упростить архитектуру приложения при сохранении реактивности.

Ключевые слова: веб-приложения, состояние компонента, синхронизация данных, реактивность, Angular, React, виртуальный DOM, модель BCLM, оптимизация производительности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Струкова, А. А. Алгоритм взаимодействия компонентов на стороне клиента / А. А. Струкова, Л. Ю. Шилин // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 68–74. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-68-74>.

ALGORITHM OF COMPONENTS INTERACTION ON THE CLIENT SIDE

ALINA STRUKOVA, LEONID SHILIN

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

Abstract. The article discusses the problem of organizing effective component interaction in client web applications based on component architectures. It is shown that as the scale of interface systems increases, traditional approaches to data exchange between components lead to redundant calculations, more complicated support, and lower performance. Using the example of frameworks, the existing mechanisms for synchronizing the state and updating the user interface are analyzed, their limitations related to global change tracking and the lack of built-in support for two-way data transfer between components are identified. A Bidirectional Component Linking Model (BCLM) is proposed, based on the direct exchange of relevant state changes between logically connected components. A synchronization mechanism has been formalized through the display of publication and application of data, providing adaptive interface updates without the involvement of centralized repositories. It is shown that the proposed approach makes it possible to reduce the number of re-renderings and simplify the application architecture while maintaining reactivity.

Keywords: web applications, component state, data synchronization, reactivity, Angular, React, virtual DOM, BCLM model, performance optimization.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Strukova A., Shilin L. (2026) Algorithm of Components Interaction on the Client Side. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 68–74. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-68-74> (in Russian).

Введение

В последние годы наблюдается устойчивый рост популярности компонентных архитектур при создании клиентских веб-приложений. Данный подход предполагает разделение пользовательского интерфейса на независимые логические модули – компоненты, каждый из которых инкапсулирует собственное состояние, логику и представление. Это значительно упрощает разработку, сопровождение и тестирование программных систем, поскольку позволяет повторно использовать элементы интерфейса и локализовать изменения в пределах отдельных блоков.

Существующие фреймворки, наиболее широко применяемые в индустрии (Angular и React), предлагают различные модели обмена данными и обновления интерфейса. Несмотря на их практическую эффективность, в условиях роста масштаба приложения проявляются архитектурные ограничения, связанные с избыточными вычислениями и усложнением синхронизации состояний.

В связи с этим актуальной задачей является разработка подхода к взаимодействию компонентов, обеспечивающего согласованность данных и оптимальное использование вычислительных ресурсов. Перспективным направлением выступает применение моделей, позволяющих организовать прямой обмен состояниями между связанными компонентами без привлечения глобальных механизмов обновления. Одно из перспективных решений – двухсвязная модель взаимодействия компонентов (Bidirectional Component Linking Model, BCLM), обеспечивающая прямую реактивную синхронизацию только между логически зависимыми частями интерфейса, без вмешательства глобальных механизмов обновления.

Архитектурные принципы

Angular реализует архитектурную модель MVVM (Model – View – View Model), в которой каждый компонент C_i содержит локальное состояние S_i , отображаемое в шаблон V_i . Связывание данных может быть представлено как отображение

$$V_i = R(S_i), \quad (1)$$

где R – функция рендеринга.

Передача данных между компонентами осуществляется тремя основными способами. Первый представляет собой входные параметры (input binding), которые направляют поток данных сверху вниз. Связь осуществляется через декоратор `@Input()`. Это означает, что дочерний компонент получает значения, определяемые родителем. Такое взаимодействие компонентов можно представить формулой

$$S_{child}(t) = F(S_{parent}(t)). \quad (2)$$

Выходные параметры (output binding) – поток снизу вверх – являются вторым способом передачи данных между компонентами. Взаимодействие осуществляется через декоратор `@Output()`, что позволяет дочернему компоненту сообщать родителю о том, что его состояние изменилось (например, пользователь нажал кнопку). Этот способ описывается формулой

$$E_{parent}(t+1) = g(E_{child}(t)). \quad (3)$$

Одним из способов взаимодействия компонентов являются реактивные потоки RxJS, описываемые через подписки. Фактически это означает, что компонент обновляется, когда происходит определенное событие. Взаимодействие можно описать следующим выражением:

$$S_i(t+1) = S_i(t) + \delta S. \quad (4)$$

Каждое изменение состояния инициирует механизм Change Detection, проходящий по дереву компонентов и проверяющий, произошло ли изменение значений, используемых в шаблоне.

Change Detection представляет собой процесс выявления изменений в состоянии приложения и последующего обновления элементов пользовательского интерфейса, зависящих от этих данных.

Angular использует стратегию итеративного обхода дерева компонентов. При возникновении любого события, способного изменить состояние (обработчик событий, завершение HTTP-запроса, таймер и др.), Angular инициирует глобальный цикл Change Detection. В ходе этого цикла фреймворк последовательно проверяет все компоненты, сравнивая их текущее состояние с предыдущим. Это обеспечивает предсказуемость поведения, однако в крупных приложениях вызывает значительные накладные расходы при рендеринге и синхронизации состояний.

React использует концепцию однонаправленного потока данных, где родительский компонент передает значения свойств дочерним. Родитель передает свойства дочерним компонентам, а те реагируют на изменения состояния с помощью хуков (useState, useEffect, useMemo). Это взаимодействие можно описать формулой

$$Props_{child}(t) = h(State_{parent}(t)). \quad (5)$$

Изменение состояния через хуки вызывает пересчет виртуального дерева элементов – Virtual DOM. Текущее дерево интерфейса и новое состояние дерева элементов после изменения можно обозначить как DOM_{old} и DOM_{new} соответственно. React вычисляет разницу как разность между ними

$$\Delta DOM = DOM_{new} - DOM_{old}. \quad (6)$$

Это делает React более производительным, особенно при частых обновлениях интерфейса. Для сложных взаимодействий между множеством компонентов часто требуются дополнительные библиотеки для глобального управления состоянием (Redux, MobX, Zustand), что увеличивает когнитивную сложность системы.

Проблемы существующих решений

Сопоставление архитектурных принципов Angular и React позволяет выявить ряд характерных ограничений, оказывающих влияние на производительность и масштабируемость крупных клиентских приложений. Оба фреймворка эффективно решают задачу разделения интерфейса на независимые компоненты, но их механизмы синхронизации данных и обновления пользовательского интерфейса демонстрируют принципиальные различия.

Во-первых, в Angular основная проблема связана с высокой нагрузкой на систему обнаружения изменений. Поскольку механизм Change Detection инициируется при любом событии, потенциально влияющем на состояние данных, в крупных приложениях происходит повторяющийся обход обширного дерева компонентов. Даже при отсутствии фактических изменений во многих узлах компоненты все равно подвергаются проверке, что приводит к значительным вычислительным накладным расходам и увеличивает время отклика интерфейса. Таким образом, модель гарантированной синхронизации состояния и представления достигается ценой снижения эффективности при масштабировании.

Во-вторых, в React рендеринг оптимизирован благодаря сравнению виртуальных представлений интерфейса, однако отсутствует встроенный механизм двухсторонней синхронизации данных между компонентами. Передача данных осуществляется строго сверху вниз, что усложняет реализацию взаимодействия между компонентами, находящимися на разных уровнях иерархии. Для решения этой проблемы обычно применяются внешние хранилища состояния (Redux, MobX, Zustand), что увеличивает архитектурную сложность, расширяет количество связей в системе и требует дополнительных усилий по поддержке.

В-третьих, для обеих архитектур характерна проблема избыточной передачи данных по цепочкам компонентов. Даже если изменение состояния затрагивает лишь локальный участок интерфейса, данные часто приходится прокидывать через промежуточные компоненты, которые сами в изменении не участвуют. Это не только увеличивает связность системы, но и усложняет сопровождение и рефакторинг кода, поскольку локальные обновления могут непредсказуемо влиять на поведение различных частей приложения.

Указанные ограничения показывают, что в современных фреймворках отсутствует универсальный механизм, который одновременно обеспечивал бы производительное обновление интерфейса, сохранение реактивности данных и упрощенное взаимодействие между зависимыми компонентами без посредников. Следовательно, актуальной представляется задача разработки алгоритма взаимодействия компонентов, который бы минимизировал число перерендерингов, поддерживал прямую синхронизацию зависимых представлений и устранял необходимость избыточной передачи данных через цепочки компонентов. Такой подход позволил бы объединить сильные стороны существующих моделей, одновременно снижая их архитектурные и вычислительные издержки.

Двухсвязная модель взаимодействия компонентов

В рамках данной работы предлагается двухсвязная модель взаимодействия компонентов BCLM, на основе которой формализуется алгоритм синхронизации состояний между компонентами. В отличие от классического однонаправленного потока данных, в рамках BCLM каждый компонент не только обладает собственным локальным состоянием, но и способен публиковать изменения своих данных, а также подписываться на изменения состояния других компонентов без участия промежуточных элементов и глобального хранилища. Это обеспечивает прямую семантическую зависимость между компонентами, расположенными как на соседних, так и на удаленных уровнях иерархии.

Пусть C_i и C_j – два компонента системы с локальными состояниями $S_i(t)$ и $S_j(t)$, определяемыми в момент времени t . Тогда отношение двунаправленной связи между ними представляется следующим образом:

$$L_{i,j} = (C_i \leftrightarrow C_j). \quad (7)$$

Данное отношение не накладывает иерархических ограничений: компоненты могут находиться в любой конфигурации структуры представления. Пусть в компоненте C_i произошло изменение состояния

$$S_i(t+1) = S_i(t) + \delta S_i(t). \quad (8)$$

Не каждое изменение состояния является значимым для других компонентов, поэтому вводится отображение $h()$, выделяющее релевантную часть состояния:

$$\tau_i(t) = h(\delta S_i(t)), \quad (9)$$

где $\tau_{i,j}(t)$ – публикуемое изменение, предназначенное для доставки к подписчику C_j .

Соответственно, обновление состояния подписывающегося компонента C_j описывается функцией применения полученных данных

$$S_j(t+1) = f(S_j(t), \tau_{i,j}(t)). \quad (10)$$

Таким образом, итерация синхронизации между компонентами задается следующим отображением:

$$F_{i \rightarrow j} : S_j(t) \mapsto S_j(t+1). \quad (11)$$

Для того чтобы обновления состояний не приводили к бесконечным циклам (например, при $C_i \leftrightarrow C_j$), требуется условие сходимости синхронизационного процесса. Введем оператор глобального состояния для системы из n компонентов

$$S(t) = (S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)). \quad (12)$$

Тогда процесс двунаправленных синхронизаций представляет собой итеративное отображение

$$S(t+1) = \Phi(S(t)). \quad (13)$$

Чтобы модель была корректной, отображение Φ должно удовлетворять нескольким критериям. Отображение должно быть стабильным, чтобы при фиксированных входных данных не изменять состояние бесконечно. Изменение одного состояния не должно инициировать обновление тех компонентов, которые не находятся в зависимости, поэтому Φ должно быть локализованным. Также отображение должно быть монотонным относительно применения обновлений. Эти условия выполняются, если:

- h выделяет только семантически релевантные изменения;
- f является поглощающим оператором, т. е. не генерирует новое состояние, если изменений нет;
- циклы синхронизаций разрешаются приоритетным порядком применений (например, через очередь событий).

В общем случае взаимодействие компонентов на стороне клиента с помощью двухсвязного алгоритма можно представить схемой на рис. 1.

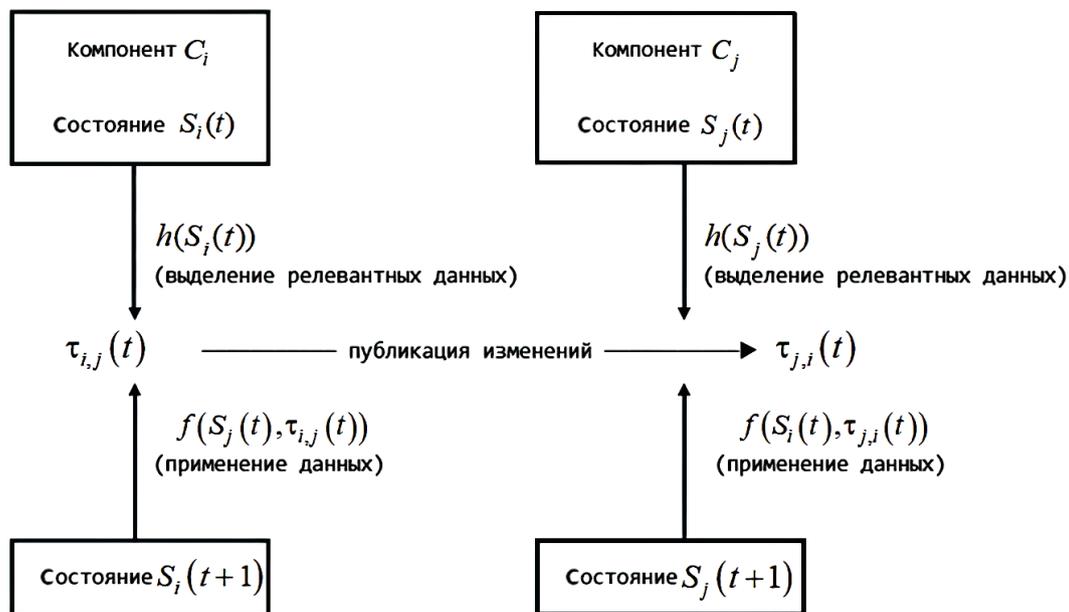


Рис. 1. Взаимодействие компонентов
Fig. 1. Components interaction

Предложенная модель BCLM, в которой распространение изменений ограничено только теми элементами интерфейса, действительно находящимися в логической зависимости. Это позволяет отказаться от глобального обхода дерева компонентов (характерного для Angular) и от централизованных хранилищ состояния (широко используемых в экосистеме React).

Процесс обновления пользовательского интерфейса становится локализованным: изменение состояния компонента приводит к перерасчету и перерисовке только тех элементов, которые непосредственно подписаны на данное состояние. Таким образом, достигается снижение количества избыточных вычислений и сокращается объем обновлений в DOM-дереве.

Важным следствием двунаправленности модели является возможность естественного распространения изменений в обе стороны зависимости, когда каждый компонент одновременно выступает и источником, и приемником данных. Это позволяет отказаться от каскадной передачи свойств через цепочки промежуточных компонентов, что существенно уменьшает связность кода и снижает когнитивную нагрузку.

С точки зрения временной сложности предложенный подход переводит операцию обновления состояния из класса $O(|T|)$ (где $|T|$ – размер дерева компонентов) в $O(|L|)$ (где $|L|$ – число логических связей между компонентами). Первый класс характерен для механизмов глобального Change Detection. Поскольку на практике $|L| \ll |T|$, особенно в масштабируемых приложениях, это приводит к существенному улучшению производительности интерфейса.

Кроме того, модель сохраняет реактивность обновлений: состояние интерфейса остается согласованным при любых последовательностях изменений, так как каждое обновление транслируется по строго определенным зависимостям. Это гарантирует детерминированность поведения системы, что является ключевым условием для обеспечения корректности работы многокомпонентных SPA-приложений.

Заключение

1. Проведенный анализ современных подходов к организации взаимодействия компонентов в клиентских веб-приложениях показал, что существующие архитектурные решения, такие как однонаправленный поток данных и централизованное управление состоянием, обладают как существенными преимуществами, так и рядом ограничений, проявляющихся при масштабировании сложных интерфейсных систем. В рамках таких моделей наблюдается либо избыточная вычислительная нагрузка, обусловленная глобальными механизмами отслеживания изменений, либо повышенная когнитивная сложность разработки, возникающая вследствие необходимости явного управления потоками данных между компонентами.

2. Предложенная двухсвязная модель взаимодействия компонентов (Bidirectional Component Linking Model, BCLM) обеспечивает более гибкий и локализованный механизм синхронизации состояний. За счет прямого обмена релевантными изменениями между логически зависимыми компонентами достигается уменьшение числа избыточных обновлений, сокращается глубина цепочек передачи данных и обеспечивается адаптивность интерфейсной системы. Формализация процесса синхронизации в виде отображений $h()$ и $f()$ позволяет четко определить границы релевантности изменений и способы их применения на стороне подписчика, а введенные условия сходимости исключают возможность формирования бесконечных циклов обновления.

3. Предлагаемая модель объединяет преимущества реактивного обновления интерфейса и структурированного управления состоянием, минимизируя вычислительные затраты и сохраняя ясность архитектуры. Дальнейшее направление работы включает разработку экспериментального прототипа, проведение сравнительного анализа производительности относительно существующих фреймворков и исследование оптимальных стратегий выбора функций преобразования состояний для различных типов приложений.

Список литературы

1. Herman, D. *Effective JavaScript: 68 Specific Ways to Harness the Power of JavaScript* / D. Herman. Boston: Addison-Wesley, 2013
2. Флэнаган, Д. *JavaScript. Подробное руководство* / Д. Флэнаган. СПб.: Символ-Плюс, 2021.
3. Vampakos, A. *Learning Angular: A No-Nonsense Guide to Building Web Applications with Angular 15* / A. Vampakos, P. Deeleman. Birmingham: Packt Publishing, 2023.
4. Freeman, A. *Pro React 16* / A. Freeman. Berkeley, California: Apress, 2019
5. Elliott, E. *Programming JavaScript Applications: Robust Web Architecture with Node, HTML5, and Modern JS Libraries* / E. Elliott. Sebastopol: O'Reilly Media, 2014.
6. Blokdyk, G. *Comparison of JavaScript Frameworks: Standard Requirements* / G. Blokdyk. Canada: 5STARCOoks, 2021.

Поступила 01.12.2025

Принята в печать 08.01.2026

References

1. Herman D. (2013) *Effective JavaScript: 68 Specific Ways to Harness the Power of JavaScript*. Boston, Addison-Wesley Publ.
2. Flanagan D. (2021) *JavaScript. The Definitive Guide*. Saint Petersburg, Simvol-Plyus Publ. (in Russian).
3. Vampakos A. (2023) *Learning Angular: A No-Nonsense Guide to Building Web Applications with Angular 15*. Birmingham, Packt Publishing.
4. Freeman A. (2019) *Pro React 16*. Berkeley, California, Apress Publ.
5. Elliott E. (2014) *Programming JavaScript Applications: Robust Web Architecture with Node, HTML5, and Modern JS Libraries*. Sebastopol, O'Reilly Media Publ.
6. Blokdyk G. (2021) *Comparison of JavaScript Frameworks: Standard Requirements*. Canada, 5STARCOoks Publ.

Received: 1 December 2025

Accepted: 8 January 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Струкова А. А., магистрант, ассист. каф. информационных технологий автоматизированных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Шилин Л. Ю., д-р техн. наук, проф. каф. информационных технологий автоматизированных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. Платонова, 39
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 44 747-22-03
E-mail: al-strukova@mail.ru
Струкова Алина Александровна

Information about the authors

Strukova A., Master's Student, Assistant at the Department of Information Technologies of Automated Systems, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Shilin L., Dr. Sci. (Tech.), Professor at the Department of Information Technology of Automated Systems, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, Platonova St., 39
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 44 747-22-03
E-mail: al-strukova@mail.ru
Strukova Alina



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-75-82>

УДК 004.934

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ, РЕКУРРЕНТНЫХ СЛОЕВ И МЕХАНИЗМА ВНИМАНИЯ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

Д. А. МАКАР, М. И. ВАШКЕВИЧ

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

Аннотация. Визуальное распознавание речи представляет собой задачу классификации произносимых слов или букв по видеопотоку, фиксирующему движения губ. В статье представлены синтез и исследование нейросетевой архитектуры для визуального распознавания речи на основе комбинации сверточных и рекуррентных нейронных сетей с механизмом внимания. Обучение и оценка модели проводились на базе данных AVLetters2 в наиболее сложном дикторонезависимом режиме. Архитектура модели включает кодировщик на основе сверточных слоев для извлечения пространственных признаков, рекуррентные слои на основе блоков GRU для моделирования временных зависимостей и механизм внимания для выделения информативных фрагментов речевой последовательности. Для оценки точности модели проведена пятикратная перекрестная проверка. Подбор гиперпараметров модели осуществлялся на основе байесовской оптимизации, позволившей определить оптимальную конфигурацию параметров модели и процесса обучения. В результате проведенных экспериментов достигнута средняя точность распознавания 14,3 %. Анализ результатов выявил значительную вариативность качества распознавания в зависимости от характеристик дикторов (точность составила от 3,9 до 31,9 %), что указывает на необходимость дальнейшего повышения инвариантности модели к междикторским различиям.

Ключевые слова: визуальное распознавание речи, AVLetters2, сверточная нейронная сеть, рекуррентная нейронная сеть, механизм внимания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Макара, Д. А. Нейронная сеть на основе сверточных, рекуррентных слоев и механизма внимания для визуального распознавания речи / Д. А. Макара, М. И. Вашкевич // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 75–82. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-75-82>.

NEURAL NETWORK BASED ON CONVOLUTIONAL, RECURRENT LAYERS AND AN ATTENTION MECHANISM FOR VISUAL SPEECH RECOGNITION

DARYA MAKAR, MAXIM VASHKEVICH

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

Abstract. Visual speech recognition is the task of classifying spoken words or letters from a video stream capturing lip movements. This paper presents the synthesis and study of a neural network architecture for visual speech recognition based on a combination of convolutional and recurrent neural networks with an attention mechanism. The model was trained and evaluated on the AVLetters2 dataset in the most challenging speaker-independent mode. The model architecture includes an encoder based on convolutional layers for extracting spatial features, recurrent layers based on GRU units for modeling temporal dependencies, and an attention mechanism for highlighting informative fragments of the speech sequence. To assess the accuracy of the model, five-fold cross-validation was performed. Model hyperparameters were selected using Bayesian optimization, which allowed us to determine the optimal configuration of the model parameters and the training process. As a result of the experiments, an average recognition accuracy of 14.3 % was achieved. Analysis of the results revealed significant variability in recognition quality depending on the characteristics of the speakers (accuracy ranged from 3.9 to 31.9 %), which indicates the need to further improve the invariance of the model to inter-speaker differences.

Keywords: visual speech recognition, AVLetters2, convolutional neural network, recurrent neural network, attention mechanism.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Makar D., Vashkevich M. (2026) Neural Network Based on Convolutional, Recurrent Layers and an Attention Mechanism for Visual Speech Recognition. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 75–82. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-75-82> (in Russian).

Введение

Визуальное распознавание речи – это задача классификации произносимых слов или букв по видеопотоку, отображающему движение губ. Данная область актуальна для разработки бесшумных интерфейсов, помощи людям с нарушением речи (приобретенной потерей речи) и для мультимодальных систем распознавания речи. Важной подзадачей в этой области является классификация произносимых на видеоизображении букв исключительно на основе анализа артикуляции губ. Традиционный подход к решению такой задачи основывался на инженерном проектировании визуальных признаков (контуры губ и проч.), извлекаемых из последовательности кадров на видеоизображении [1, 2]. Однако с развитием методов глубокого обучения [3] произошел сдвиг парадигм в сторону сквозного (англ. end-to-end) обучения [4], при котором модель автоматически учится извлекать релевантные признаки из исходных данных и затем выполнять классификацию.

Основная сложность в задаче визуальных классификаций произносимых букв – необходимость одновременного учета двух аспектов:

- пространственной информации (каждый отдельный кадр содержит статистическую информацию о форме, об открытии и о конфигурации губ);
- временной информации (процесс артикуляции и жестикуляции речевого аппарата представляет собой последовательность плавно изменяющихся положений губ).

Основная информация для различения букв часто содержится именно в динамике их произношения.

В статье рассмотрена задача разработки и сквозного обучения нейронной сети на основе сверточных и рекуррентных слоев для распознавания букв, произносимых на видеоизображениях. Сверточные нейронные сети (СНС) эффективны в извлечении пространственных признаков из изображений, а рекуррентные нейронные сети (РНС) – в моделировании и классификации последовательностей. Таким образом, в модели классификации букв, произносимых на видеоизображении, СНС будет отвечать за извлечение набора визуальных признаков, которые затем будут подаваться на РНС, отвечающую за классификацию видеоизображения.

Описание базы данных

В исследовании использовался набор данных AVLetters2 [1]. Это набор коротких видео, где пять дикторов на камеру произносят одну из 26 букв английского алфавита от А до Z (каждый диктор произносит каждую букву семь раз). Общее число произношений – 910, видеозаписи имели разрешение 1920×1080 пикселей. На рис. 1 показан пример первых восьми фреймов видеозаписи, на которой диктор произносит букву А.

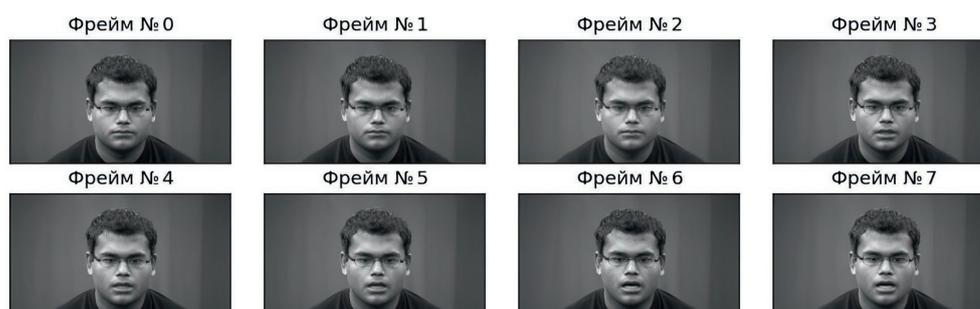


Рис. 1. Пример кадров видеоизображения из базы AVLetters2 (буква А)
Fig. 1. Example of video frames from the AVLetters2 database (letter A)

Структура системы чтения по губам

Рассмотрим автоматизированную систему чтения по губам, обработку информации в которой можно разбить на четыре этапа:

- 1) предобработка видео (детектирование региона губ);
- 2) извлечение визуальных признаков;
- 3) моделирование временных зависимостей;
- 4) классификация.

На первом этапе предобработки видео происходит обнаружение лица и области губ. Выполнение этапов обработки со второго по четвертый предлагается объединить и выполнять в рамках одной нейросетевой модели. Для извлечения признаков из видеокadres рекомендуется использовать СНС, поскольку сети данного типа успешно применяются для детектирования объектов на изображениях [3]. А для моделирования временных зависимостей движения губ следует использовать РНС типа GRU (англ. Gated Recurrent Unit). Модели на основе GRU способны запоминать информацию из предыдущих кадров и формировать информативный вектор контекста, позволяющий выполнить классификацию слова, произносимого диктором.

Кодировщик на основе сверточной нейронной сети

Входом нейросетевой модели являлось изображение области губ, выделенное на каждом кадре видеопотока. Далее изображение масштабировалось до размеров 64×96 пикселей. Для выделения релевантных визуальных признаков использовалась СНС, структура которой представлена на рис. 2.

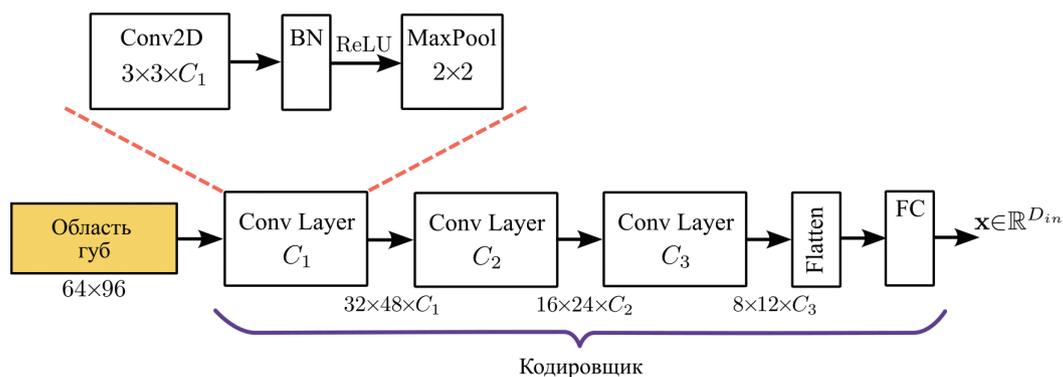


Рис. 2. Структура кодировщика на основе сверточной нейронной сети
Fig. 2. Structure of an encoder based on a convolutional neural network

Модель на рис. 2 называют кодировщиком, поскольку она выполняет роль формирования векторного представления (англ. embedding) изображения области губ с уменьшенной, по сравнению с начальной, размерностью. Кодировщик состоит из трех сверточных блоков, обозначенных на схеме как Conv Layer. Каждый блок включает вычисление двумерной свертки, нормализацию по минибатчам (англ. batch normalization, BN), вычисление активационной функции ReLU и субдискретизацию (англ. maxpooling). Сверточный блок также имеет настраиваемый гиперпараметр C , который определяет число ядер свертки (т. е. число обучаемых двумерных фильтров). В дальнейшем данный гиперпараметр выбирался в процессе оптимизации. После прохождения входного изображения через сверточные блоки получившийся тензор размерами $8 \times 12 \times C_3$ «вытягивается» (англ. flatten) в одномерный вектор и подается на полносвязный слой (англ. fullyconnected layer, FC), который выполняет его проецирование в векторное пространство пониженной размерности D_{in} .

Рекуррентная нейронная сеть для классификации

Кодировщик преобразует входную последовательность кадров в последовательность векторных представлений $\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{N-1}$, которые затем подаются на двунаправленную рекуррентную сеть типа GRU. Структура ячейки GRU представлена на рис. 3, она является усовершенствованной архитектурой простой РНС и предназначена для эффективной обработки последовательных данных [3].

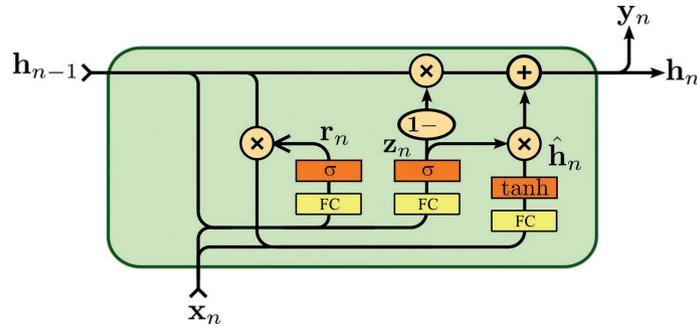


Рис. 3. Структура ячейки рекуррентной сети типа GRU
Fig. 3. The structure of the GRU cell

Входными данными для ячейки являются текущий входной вектор последовательности x_n и предыдущее скрытое состояние h_{n-1} . Внутри блока GRU формируется несколько векторных переменных, которые имеют общее название «гейт» (от англ. gate). Гейты определяют процессы обработки информации (забывание и обновление), происходящие внутри ячейки.

Гейт забывания (англ. reset gate) r_n определяет, какая часть информации о предыдущем состоянии должна быть «забыта»:

$$r_n = \sigma \left(\mathbf{W}_r \begin{bmatrix} h_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \mathbf{b}_r \right), \quad (1)$$

где \mathbf{W}_r – матрица весов; \mathbf{b}_r – вектор смещений; $\sigma()$ – функция логистического сигмоида.

Гейт обновления (англ. update gate) определяет часть информации, которая должна сохраниться о предыдущем состоянии:

$$z_n = \sigma \left(\mathbf{W}_z \begin{bmatrix} h_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \mathbf{b}_z \right), \quad (2)$$

где \mathbf{W}_z – матрица весов; \mathbf{b}_z – вектор смещений.

Внутри ячейки также происходит вычисление вектора-кандидата на новое состояние

$$\hat{h}_n = \tanh \left(\mathbf{W}_h \begin{bmatrix} r_n \odot h_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \mathbf{b}_h \right). \quad (3)$$

где \mathbf{W}_h – матрица весов; \mathbf{b}_h – вектор смещений; \odot – операция поэлементного перемножения векторов.

На заключительном этапе формируется выходное текущее скрытое состояние как комбинация вектора-кандидата и предыдущего состояния

$$h_n = (1 - z_n) \odot h_{n-1} + z_n \odot \hat{h}_n. \quad (4)$$

Для того чтобы нейронная сеть лучше формировала контекст для каждого обрабатываемого кадра, используется двунаправленная рекуррентная сеть GRU. При этом один блок GRU пропускает последовательность в прямом порядке, а второй – в обратном. Получающиеся на каждом временном шаге n выходные векторы блоков конкатенируются и подаются на блок внутреннего внимания.

В [4] указывалось, что без использования механизма внимания модель очень быстро «забывает» входную последовательность и в результате имеет очень низкую производительность. Механизм внимания принимает на вход последовательность векторов h_0, h_1, \dots, h_{N-1} , сформированных рекуррентной сетью, и вычисляет для каждого из них весовые коэффициенты $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{N-1}$, которые затем используются для формирования единого вектора контекста c , имеющего фиксированную длину. Вектор контекста далее подается на классифицирующий полносвязный слой с активационной функцией softmax. Общая структура описанной модели представлена на рис. 4.

Математическая модель нейронной сети имеет следующее описание:

$$h_n = \text{biGRU}(x_n), \quad (5)$$

где \mathbf{h}_n – выходной вектор состояния двунаправленного блока GRU, получается в результате конкатенации двух векторов, полученных от блоков GRU, выполняющих прямой и обратный проход по последовательности.

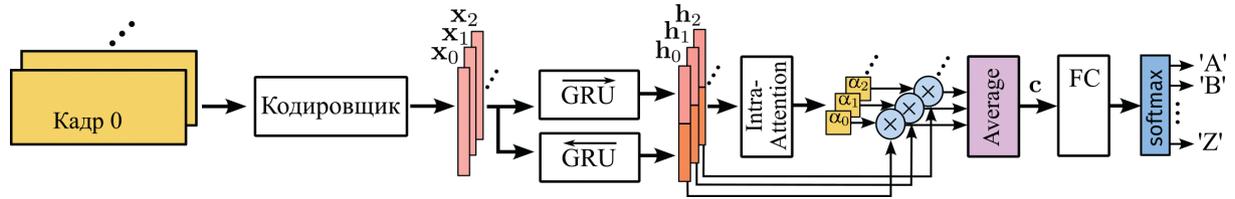


Рис. 4. Структура нейронной сети с механизмом внутреннего внимания для классификации произносимых букв

Fig. 4. The structure of a neural network with an intra-attention mechanism for classifying pronounced letters

На следующем этапе происходит вычисление вектора коэффициентов внимания

$$[\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{N-1}] = \text{IntraAttention}([\mathbf{h}_0, \mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_{N-1}]). \quad (6)$$

Полученные коэффициенты используются в модели для формирования вектора контекста как взвешенной суммы выходов двунаправленного блока GRU

$$\mathbf{c} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n \mathbf{h}_n. \quad (7)$$

Распределение вероятности для выходной буквы генерируется при помощи полносвязного слоя с функцией активации softmax

$$\mathbf{y} = \text{softmax}(\text{FC}(\mathbf{c})), \quad (8)$$

где $\text{FC}()$ – функция, описывающая работу полносвязного слоя.

Механизм внимания в предлагаемой модели реализовывался как внутреннее внимание, выполненное по принципу, предложенному в [5]. На первом этапе вычисляется оценка (англ. score) внимания при помощи следующего выражения:

$$s_n = \mathbf{v}^T \text{GeLU}(\mathbf{W}_{att} \mathbf{h}_n), \quad (9)$$

где $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^{D_m}$ – обучаемый вектор параметров блока внимания; $\text{GeLU}(\cdot)$ – функция активации; $\mathbf{W}_{att} \in \mathbb{R}^{D_m \times 2D_m}$ – матрица линейного преобразования, выполняющая проецирование векторов \mathbf{h}_i в пространство меньшей размерности.

На втором этапе выполняется нормализация оценок внимания при помощи функции softmax

$$\alpha_n = \text{softmax}(s_n). \quad (10)$$

Получаемые в (10) весовые коэффициенты α_n применяются в (7) для формирования вектора контекста. Коэффициенты α_n имеют большую величину для тех векторов \mathbf{h}_n , у которых большее значение с позиции последующей классификации.

Экспериментальные исследования

Для оценки обобщающей способности модели в условиях, приближенных к реальным, был применен наиболее сложный режим тестирования – дикторнезависимый (англ. speaker-independent). В этом режиме модель обучается на одних дикторах и тестируется на других, что максимально приближено к практическому сценарию, когда система должна распознавать речь ранее не встречавшихся людей.

База AVLetters2 содержит записи пяти дикторов, поэтому для объективной оценки применялась схема пятикратной перекрестной проверки (англ. 5-fold cross-validation), где на каждой итерации данные трех дикторов использовались для обучения, данные одного диктора – для валидации, данные оставшегося диктора – для тестирования. Такая организация эксперимента обеспечивает проверку способности модели к обобщению, поскольку тестирование всегда проводится на дикторах, не представленных в обучающей выборке. Это исключает возможность «запоминания» моделью индивидуальных особенностей артикуляции конкретных дикторов и гарантиру-

ет оценку истинной способности модели распознавать визуальные паттерны речи. Описанный подход является наиболее сложным для систем визуального распознавания речи, так как требует от модели абстрагирования от индивидуальных особенностей дикторов и выделения инвариантных признаков артикуляции.

Для количественной оценки эффективности модели использовался показатель правильности (англ. accuracy), рассчитываемый как процент верно классифицированных образцов. В рамках пятикратной перекрестной проверки правильность вычислялась отдельно для каждого тестового блока данных, соответствующего разным дикторам. Результирующая метрика качества модели вычислялась как среднее значение правильности по всем тестовым блокам данных. Для оценки стабильности работы модели и вариативности результатов относительно разных дикторов рассчитывалось стандартное отклонение точности.

Поскольку задачей, которую решает модель, является классификация букв, произносимых на видеоизображении, в качестве функции потерь использовался отрицательный логарифм функции правдоподобия (англ. NLLLoss – negative log-likelihood loss). Для оптимизации параметров модели применялся метод Adam – один из самых эффективных алгоритмов градиентного спуска с адаптивным шагом [3]. С целью предотвращения переобучения и улучшения обобщающей способности модели была применена L2-регуляризация, которая заключается в добавлении к функции потерь члена $\lambda \sum_i w_i^2$, где w_i – веса модели; λ – коэффициент регуляризации (англ. weight decay). Значение λ подбиралось в процессе оптимизации гиперпараметров.

Для регулировки скорости обучения η модели в процессе градиентного спуска использовался планировщик скорости обучения по методу косинусного отжига с перезапуском (англ. cosine annealing with warm up restart). В данном планировщике предполагается, что скорость обучения плавно изменяется от значения η_{\max} по косинусному закону до η_{\min} в течение периода T_0 , после чего процесс повторяется. Общее число циклов повторения определяется как N_{epochs}/T_0 , где N_{epochs} – общее число эпох обучения модели. В процессе обучения число эпох N_{epochs} выбиралось равным 180, а параметр $\eta_{\min} = 10^{-6}$. Показатели T_0 и η_{\max} существенным образом влияют на качество обучения модели, поэтому их значения выбирались в процессе оптимизации гиперпараметров.

Поиск гиперпараметров осуществлялся методом TPE (англ. tree-structured Parzen estimator), который является вариантом байесовской оптимизации, реализованным в библиотеке Optuna языка Python. Особенность метода TPE в том, что в нем выполняется вероятностное моделирование пространства гиперпараметров модели и происходит целенаправленный поиск точек данного пространства, для которых ожидается максимальное значение метрики качества модели. При помощи метода TPE были найдены оптимальные значения гиперпараметров: $\eta_{\max} = 4,63 \cdot 10^{-4}$, $\lambda = 4,12 \cdot 10^{-4}$, $T_0 = 10$, $C_1 = C_2 = C_3 = 16$ (число ядер сверток в слоях кодировщика); $D_{in} = 96$ (размерность выхода кодировщика); $D_h = 192$ (размерность скрытого состояния блока GRU); $p_{\text{drop}} = 0,40$ (дропаут-регуляризация для полносвязных слоев модели); размер батча – 32.

В результате проведения кросс-валидации было получено, что средняя точность работы модели составляет 14,3 %. Результаты по отдельным тестовым блокам данных представлены на рис. 5.

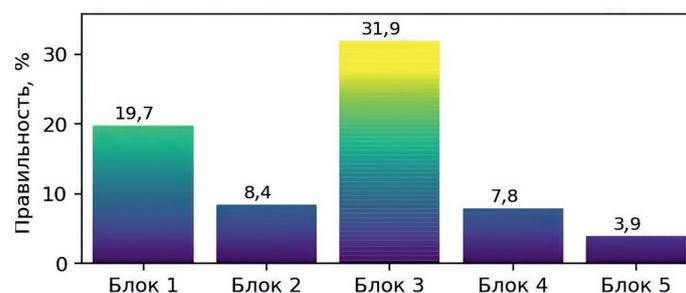


Рис. 5. Результат перекрестной проверки по тестовым блокам данных
Fig. 5. Cross-validation result on test data blocs

Минимальная точность модели была зафиксирована на пятом тестовом блоке данных и составила 3,9 %, что статистически не отличается от случайного выбора при 26 классах (ожидаемая точность случайного классификатора $\approx 3,85$ %). Детальный анализ показал, что низкая точность на последнем блоке данных связана с тем, что дикторы в обучающем наборе имели светлый тип

кожи, а диктор в тестовом наборе был темнокожим. Таким образом, плохой результат объясняется тем, что модель не смогла корректно выделить признаки для диктора с цветом кожи, отличающимся от дикторов в тренировочной выборке.

Тем не менее предложенный подход демонстрирует значительное улучшение по сравнению с методом, представленным в [1]. При использовании активной модели внешнего вида (англ. Active Appearance Model, АММ) для извлечения признаков и скрытых марковских моделей для временного моделирования в [1] была достигнута точность 8,0 %, в то время как разработанная в данном исследовании модель показывает среднюю точность 14,3 %, что соответствует относительному улучшению на 6,3 %.

Достижение высокой точности распознавания на базе данных AVLetters2 в условиях дикторонезависимого тестирования представляет значительную сложность, что подтверждается ограниченным количеством публикаций с соответствующими результатами. Показательно, что в исследовании [6], посвященном сравнительному анализу методов визуального распознавания речи, авторы приводят оценки точности для дикторозависимого сценария, но не включают результаты для дикторонезависимого режима тестирования.

Также существуют подходы, которые демонстрируют более высокую точность распознавания для базы AVLetters2, чем полученную в настоящем исследовании. Так, в [7] предложена модель на основе полносвязных слоев и двунаправленных рекуррентных сетей типа LSTM, которая позволила получить среднюю точность, равную 36,8 %. Особенностью модели [7] является то, что в нее явным образом подаются как текущий кадр видеоизображения, так и разностный кадр. Поэтому можно сделать вывод, что предварительная обработка видеок кадров может иметь существенное влияние на результативность работы модели.

Заключение

1. Получена и исследована архитектура нейронной сети для визуального распознавания речи, объединяющая сверточные слои для извлечения пространственных признаков из области рта, рекуррентные слои типа GRU для моделирования временных зависимостей и механизм внимания для выделения информативных фрагментов в речевых последовательностях.

2. Экспериментальная оценка модели проводилась на базе данных AVLetters2 в наиболее сложном дикторонезависимом режиме с использованием пятикратной перекрестной проверки. Проведенный анализ показал, что предложенная архитектура обеспечивает среднюю точность распознавания 14,3 %. Исследование выявило значительную вариативность качества распознавания в зависимости от характеристик диктора (от 3,9 до 31,9 %), что указывает на чувствительность модели к индивидуальным особенностям артикуляции и внешнего вида. Такой почти восьмикратный разброс результатов свидетельствует о том, что модель хорошо адаптируется к «легким» дикторам, но терпит затруднения на «сложных».

3. Оптимизация гиперпараметров с использованием байесовского подхода позволила определить оптимальную конфигурацию модели, включая размерность признакового пространства, параметры регуляризации и архитектурные характеристики. Несмотря на это, абсолютное значение точности остается низким для практического применения, тем не менее является сопоставимым с результатами, достигаемыми на ранних этапах разработки в данной области.

4. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования комбинированных архитектур «сверточные нейронные сети – рекуррентные нейронные сети» с механизмами внимания для задач визуального распознавания речи, однако также подчеркивают необходимость дальнейшего повышения инвариантности моделей к междикторской вариативности для обеспечения устойчивой работы в реальных условиях. В качестве перспективных направлений для повышения устойчивости модели можно выделить: аугментацию данных, направленную на симуляцию различных артикуляционных паттернов; применение методов адаптации к диктору; исследование более сложных механизмов внимания, способных выделять и игнорировать второстепенные и индивидуальные особенности; использование предобученных моделей для извлечения визуальных признаков.

Список литературы

1. The Challenge of Multispeaker Lip-Reading / S. Cox [et al.] // International Conference on Auditory-Visual Speech Processing. 2008. P. 179–184.

2. Extraction of Visual Features for Lipreading / I. Matthews [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. Vol. 24, No 2. P. 198–213.
3. Николенко, С. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадури, Е. Архангельская. СПб.: Питер, 2020.
4. Lip Reading Sentences in the Wild / S. J. Chung [et al.] // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.05358>.
5. Cheng, J. Long Short-Term Memory-Networks for Machine Reading / J. Cheng, L. Dong, M. Lapata // EMNLP 2016 Conference. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1601.06733>.
6. Pei, Y. Unsupervised Random Forest Manifold Alignment for Lipreading / Y. Pei, T.-K. Kim, H. Zha // IEEE International Conference on Computer Vision. 2013. P. 129–136.
7. End-to-End Visual Speech Recognition for Small-Scale Datasets / S. Petridis [et al.] // Pattern Recognition Letters. 2020. P. 131, 421–427. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.01954>.

Поступила 12.10.2025

Принята в печать 23.12.2025

References

1. Cox S., Harvey R., Lan Y., Newman J. L., Theobald B.-J. (2008) The Challenge of Multispeaker Lip-Reading. *International Conference on Auditory-Visual Speech Processing*. 179–184.
2. Matthews I., Cootes T. F., Bangham J. A., Cox S., Harvey R. (2002) Extraction of Visual Features for Lipreading. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 24 (2). 198–213.
3. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. (2020) *Deep Learning: A Dive into the World of Neural Networks*. St. Petersburg, Piter Publ. (in Russian).
4. Chung S. J., Senior A., Vinyals O., Zisserman A. (2017) Lip Reading Sentences in the Wild. *Computer Vision and Pattern Recognition*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.05358>.
5. Cheng J., Dong L., Lapata M. (2016) Long Short-Term Memory-Networks for Machine Reading. *EMNLP 2016 Conference*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1601.06733>.
6. Pei Y., Kim T.-K., Zha H. (2013) Unsupervised Random Forest Manifold Alignment for Lipreading. *IEEE International Conference on Computer Vision*. 129–136.
7. Petridis S., Wang Y., Ma P., Li Z., Pantic M. (2020) End-to-End Visual Speech Recognition for Small-Scale Datasets. *Pattern Recognition Letters*. 131, 421–427. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.01954>.

Received: 12 October 2025

Accepted: 23 December 2025

Вклад авторов

Макар Д. А. выполнила анализ результатов и подготовила рукопись статьи.

Вашкевич М. И. поставил научную задачу, определил методологию исследования, курировал проектирование архитектуры модели, участвовал в интерпретации результатов и подготовке текста статьи.

Authors' contribution

Makar D. performed the analysis of the results and prepared the manuscript of the article.

Vashkevich M. formulated the scientific problem, defined the research methodology, supervised the model architecture design, participated in the interpretation of the results, and the preparation of the text of the article.

Сведения об авторах

Макар Д. А., асп. каф. электронных вычислительных средств, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Вашкевич М. И., д-р техн. наук, проф. каф. электронных вычислительных средств, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-20
E-mail: vashkevich@bsuir.by
Вашкевич Максим Иосифович

Information about the authors

Makar D., Postgraduate of the Electronic Computing Facilities Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Vashkevich M., Dr. Sci. (Tech.), Professor at the Electronic Computing Facilities 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 17 293-84-20
E-mail: vashkevich@bsuir.by
Vashkevich Maxim



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-83-90>

УДК 004.738

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАНИЧНЫХ УСТРОЙСТВ В СЕТИ IoT

А. О. АНДРЕЙЧУК

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

Аннотация. В статье рассматриваются методы повышения энергетической эффективности граничных устройств IoT, включая аппаратные решения, беспроводное питание устройств через Wi-Fi, протоколы связи, алгоритмы управления энергопотреблением и использование возобновляемых источников энергии. Предложена архитектура гибридной системы питания, разработан в виде диаграммы алгоритм последовательности работы адаптивного управления. Это в совокупности позволило обеспечить эффективное энергоснабжение датчиков системы IoT. Основной проблемой была идентификация высокой нелинейности импеданса выпрямительной системы, зависящей от входной мощности, частоты и параметров DC-DC-преобразователя, что делает традиционные подходы к согласованию цепей неэффективными в широкой полосе частот Wi-Fi.

Ключевые слова: IoT, энергоэффективность, Wi-Fi Energy Harvesting, гибридная система, ESP32.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Андрейчук, А. О. Методы повышения энергетической эффективности граничных устройств в сети IoT / А. О. Андрейчук // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 83–90. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-83-90>.

METHODS FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF EDGE DEVICES IN IoT NETWORKS

ALIAKSANDR ANDREICHUK

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

Abstract. This article examines methods for improving the energy efficiency of IoT edge devices, including hardware solutions, wireless powering via Wi-Fi, communication protocols, energy management algorithms, and the use of renewable energy sources. A hybrid power system architecture is proposed, and an adaptive control sequence algorithm is developed as a diagram. Together, these factors ensure efficient power supply to IoT system sensors. The main challenge was identifying the high nonlinearity of the rectifier system impedance, which depends on the input power, frequency, and DC-DC converter parameters, making traditional approaches to matching circuits ineffective over the wide Wi-Fi frequency band.

Keywords: IoT, energy efficiency, Wi-Fi Energy Harvesting, hybrid system, ESP32.

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

For citation. Andreichuk A. O. (2026) Methods for Increasing the Energy Efficiency of Edge Devices in IoT Networks. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 83–90. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-83-90> (in Russian).

Введение

Актуальность темы обусловлена стремительным развитием технологий интернета вещей (IoT), которые находят применение в промышленности, умных городах, здравоохранении и многих других сферах. Однако ограниченная энергоэффективность граничных устройств (Edge Devices) остается серьезным вызовом, влияющим на их долговечность, производительность и стоимость эксплуатации. Цель исследования – разработка и анализ методов повышения энергетической эффективности граничных устройств в сети IoT.

Беспроводное питание устройств через Wi-Fi представляет собой инновационную технологию, позволяющую использовать энергию электромагнитных сигналов для обеспечения работы маломощных электронных устройств [1]. Wi-Fi-роутеры и точки доступа генерируют электромагнитные сигналы для передачи данных. Эти сигналы могут быть уловлены ректеннами, которые преобразуют переменное электромагнитное поле в постоянный ток. Ректенны, как правило, состоят из антенны, которая улавливает радиоволны, и выпрямителя, преобразующего их в электрическую энергию. Полученная в результате энергия может использоваться для питания маломощных устройств, например, датчиков IoT, гаджетов или сенсоров.

Одним из основных преимуществ беспроводного питания через Wi-Fi является его универсальность. С учетом того, что Wi-Fi-сети уже развернуты повсеместно, эта технология достаточно легко интегрируется в существующую инфраструктуру. Данный подход актуален для устройств, размещенных в труднодоступных местах, например, где замена батареи или прокладка проводов затруднены. Эта технология способствует снижению экологической нагрузки за счет уменьшения использования одноразовых батарей. Несмотря на перспективность, технология имеет ряд ограничений. Основное из них – низкая плотность энергии Wi-Fi-сигналов, что делает ее применимой только для устройств с достаточно малым энергопотреблением. Эффективность преобразования энергии также остается относительно низкой, что ограничивает ее использование. Кроме того, существует риск снижения качества передачи данных при интенсивном использовании энергии сигналов [1].

Выбор подходящих протоколов связи также оказывает значительное влияние на энергопотребление IoT-устройств. Среди наиболее перспективных технологий выделяются LPWAN (Low Power Wide Area Network), включая LoRaWAN и NB-IoT, которые обеспечивают большую дальность связи при низком энергопотреблении, но имеют ограниченную пропускную способность [2]. Также есть технология BLE (Bluetooth Low Energy), отличающаяся низким энергопотреблением, но малой дальностью действия, что может быть недостатком для распределенных систем. Протоколы энергосберегающей маршрутизации, такие как RPL для 6LoWPAN, требуют тщательной настройки для оптимальной работы в зависимости от топологии сети и типов передаваемых данных. Оптимизация времени пробуждения и передачи данных тоже способствует снижению энергопотребления. Однако каждый протокол имеет свои ограничения, и выбор зависит от конкретных требований проектируемой системы.

Использование интеллектуальных алгоритмов для обеспечения функционирования системы позволяет существенно снизить энергопотребление IoT-устройств. Среди таких алгоритмов выделяются машинное обучение для прогнозирования нагрузки и адаптации режима работы устройств, автоматическое управление питанием, включая переход в спящий режим при отсутствии активности, и оптимизация маршрутизации данных для минимизации энергозатрат на передачу [3]. В качестве примеров успешного применения данных алгоритмов можно рассмотреть системы управления освещением в умных городах, которые адаптируют яркость на основе анализа трафика, а также IoT-устройства в сельском хозяйстве, использующие машинное обучение для оптимизации работы датчиков влажности почвы и автоматического полива [3].

Для увеличения автономности IoT-устройств важную роль играют методы энергоснабжения и рекуперации энергии. Среди них – использование солнечных панелей и других возобновляемых источников энергии, технологии Energy Harvesting, позволяющие собирать энергию из окружающей среды (например, вибрации, тепло, свет), и повышение эффективности батарей и систем их управления [1].

Первоначальные затраты на внедрение описанных выше решений могут быть значительными. Долгосрочные выгоды включают снижение эксплуатационных расходов и уменьшение зависимости от традиционных источников питания. Рентабельность использования возобновляемых

источников энергии зависит от условий эксплуатации, таких как доступность солнечного света или кинетической энергии, и требований к мощности и продолжительности работы устройств.

Результаты исследований и их обсуждение

Для достижения поставленной цели использовались Wi-Fi-роутеры для передачи энергии без существенного снижения производительности сети. В отличие от телевизионных и сотовых сетей, Wi-Fi широко распространен в помещениях и функционирует в нелицензируемом ISM-диапазоне, что позволяет легально модифицировать передачи для доставки энергии. Перепрофилирование существующих Wi-Fi-сетей под функцию энергопитания может существенно упростить внедрение устройств с RF-питанием, не требуя дополнительной энергетической инфраструктуры.

Wi-Fi использует метод модуляции OFDM, который обладает высокой эффективностью для передачи энергии за счет большого отношения пиковой мощности к средней. Современные сенсоры и мобильные устройства зачастую оснащаются антеннами на 2,4 ГГц для работы с Wi-Fi, Bluetooth или ZigBee. Таким образом, одна и та же антенна может использоваться как для передачи данных, так и для сбора энергии, что минимально влияет на размеры устройства.

Несмотря на успехи исследований в области радиочастотной идентификации (RFID), которые продемонстрировали эффективность сборщиков энергии на 2,4 ГГц, до настоящего времени не было представлено успешное получение энергии с использованием сигналов существующих Wi-Fi-устройств. Однако при практической реализации выявились определенные проблемы.

Для оценки возможностей подачи энергии Wi-Fi-роутером был проведен эксперимент с использованием роутера (2,437 ГГц, мощность 23 дБм, антенны 4,04 дБи) и датчиком температуры. RF-сборщик энергии должен обеспечивать минимальное напряжение для работы сенсора или микроконтроллера. Для этого применяются выпрямитель, преобразующий несущий сигнал в постоянный ток, и DC-DC-преобразователь, повышающий напряжение. При этом каждый DC-DC-преобразователь имеет минимальный порог входного напряжения; в экспериментах использовался преобразователь с минимальным порогом 300 мВ.

Основная причина заключается в несоответствии требований к подаче энергии и особенностей протокола Wi-Fi. На рис. 1 представлено напряжение на выходе приемника энергии в условиях Wi-Fi-трансляций. График показывает, что сбор энергии осуществляется только в то время, когда происходит передача пакетов, тогда как в «тихие» периоды энергия рассеивается, и минимальное напряжение не достигается. Данные паузы являются неизбежной особенностью распределенного протокола доступа, при котором несколько устройств совместно используют один канал. Непрерывная трансляция роутером трафика может устранить данные паузы, однако это приведет к значительному ухудшению качества обслуживания клиентов и соседних сетей.

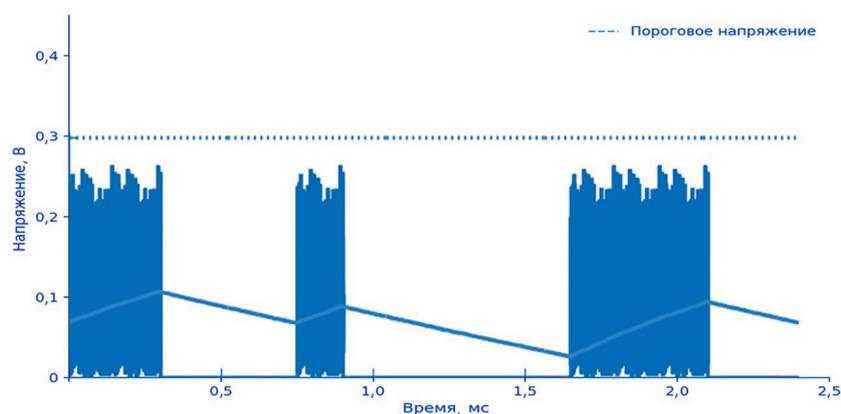


Рис. 1. Проблема беспроводного энергоснабжения с использованием Wi-Fi
Fig. 1. The problem of wireless power supply using Wi-Fi

Наблюдаемая степень загрузки беспроводного канала маршрутизатора находилась в диапазоне 10–40 %. Учитывая, что мощность передачи смартфонов на порядок ниже (0–2 дБм), можно сделать вывод, что основным драйвером процесса сбора энергии является трафик, генерируемый непосредственно точкой доступа. Следовательно, достижение порога эффективного энергоснабжения возможно лишь при условии высокой загруженности канала со стороны маршрутизатора.

Задачей разработки устройства для сбора энергии является эффективное энергоснабжение в пределах множества каналов Wi-Fi-диапазона 2,4 ГГц. Также в качестве одной из задач выступает достижение высокой чувствительности устройства на всех этих каналах. В данном случае чувствительность определяется как минимальный уровень мощности, при котором устройство способно инициализировать и обеспечить питание сенсоров и микроконтроллера. Теоретически возможно накопление энергии в течение продолжительного времени для последующей инициализации. Однако на практике из-за наличия токов утечки функционирование устройства невозможно ниже определенного порога мощности. Данный параметр является критически важным, поскольку мощность, доступная на стороне сенсора, уменьшается с увеличением расстояния до Wi-Fi-роутера; таким образом, чувствительность устройства определяет его максимальный операционный диапазон.

Рис. 2 демонстрирует архитектуру типичного RF-устройства сбора энергии. Принятый антенной сигнал поступает на выпрямитель, преобразующий сигнал 2,4 ГГц в постоянный ток. Затем повышающий DC-DC-преобразователь увеличивает напряжение до уровня, требуемого для питания сенсора и микроконтроллера (МК). Проблема заключается в выраженной нелинейности характеристик выпрямителя, зависящих от входной мощности, рабочей частоты и параметров DC-DC-преобразователя. Эта нелинейность осложняет достижение высокой чувствительности и эффективности устройства в полосе частот шириной 72 МГц, покрывающей три канала Wi-Fi.



Рис. 2. Архитектура RF-устройства сбора энергии
Fig. 2. Architecture of RF energy harvesting device

На рис. 2 в состав устройства включена согласующая цепь для трансформации импеданса выпрямителя и его согласования с антенным импедансом. Основная сложность проектирования согласующей цепи заключается в том, что импеданс выпрямителя сильно зависит от частоты и характеристик DC-DC-преобразователя.

В рамках проведенного исследования была разработана комплексная архитектура гибридной системы питания для граничных IoT-устройств, представленная на рис. 3. Данная архитектура интегрирует несколько взаимосвязанных модулей, образующих единую энергетическую систему. Основным компонентом системы стал RF-энергетический сборщик, состоящий из широкополосной антенны диапазоном 2,4 ГГц и трехкаскадной схемы удвоения напряжения на высокоэффективных диодах Шоттки марки HSMS-2860. Данный преобразовательный блок выполняет ключевую функцию трансформации переменного электромагнитного поля Wi-Fi-сигналов в постоянное напряжение.

Накопительный блок системы представлен электролитическим конденсатором емкостью 1000 мкФ, который служит энергетическим буфером, аккумулируя полученную энергию между циклами передачи данных. Особое внимание было уделено разработке интеллектуального модуля управления питанием на базе программируемого микроконтроллера ESP32. Данный выбор обусловлен наличием встроенного высокоточного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с разрешением 12 бит, который используется для замены аппаратного компаратора. Микроконтроллер работает в режиме глубокого сна (Deep Sleep) с ультранизким энергопотреблением, периодически пробуждаясь для измерения напряжения [4].

Литий-ионный аккумулятор напряжением 3,7 В был интегрирован в систему в качестве надежного резервного источника, гарантирующего бесперебойную работу устройства. Замыкал архитектуру сенсорный узел на основе датчика температуры и влажности DHT22.

Принцип работы системы, детализированный на рис. 4, реализован через циклический алгоритм, начинающийся с фазы накопления энергии, когда устройство переходит в состояние глубокого сна. В этот период RF-сборщик преобразует электромагнитное излучение в электрическую энергию, заряжая накопительный конденсатор. Периодически (например, каждые несколько секунд) таймер реального времени (RTC) ESP32 выводит микроконтроллер из режима сна.

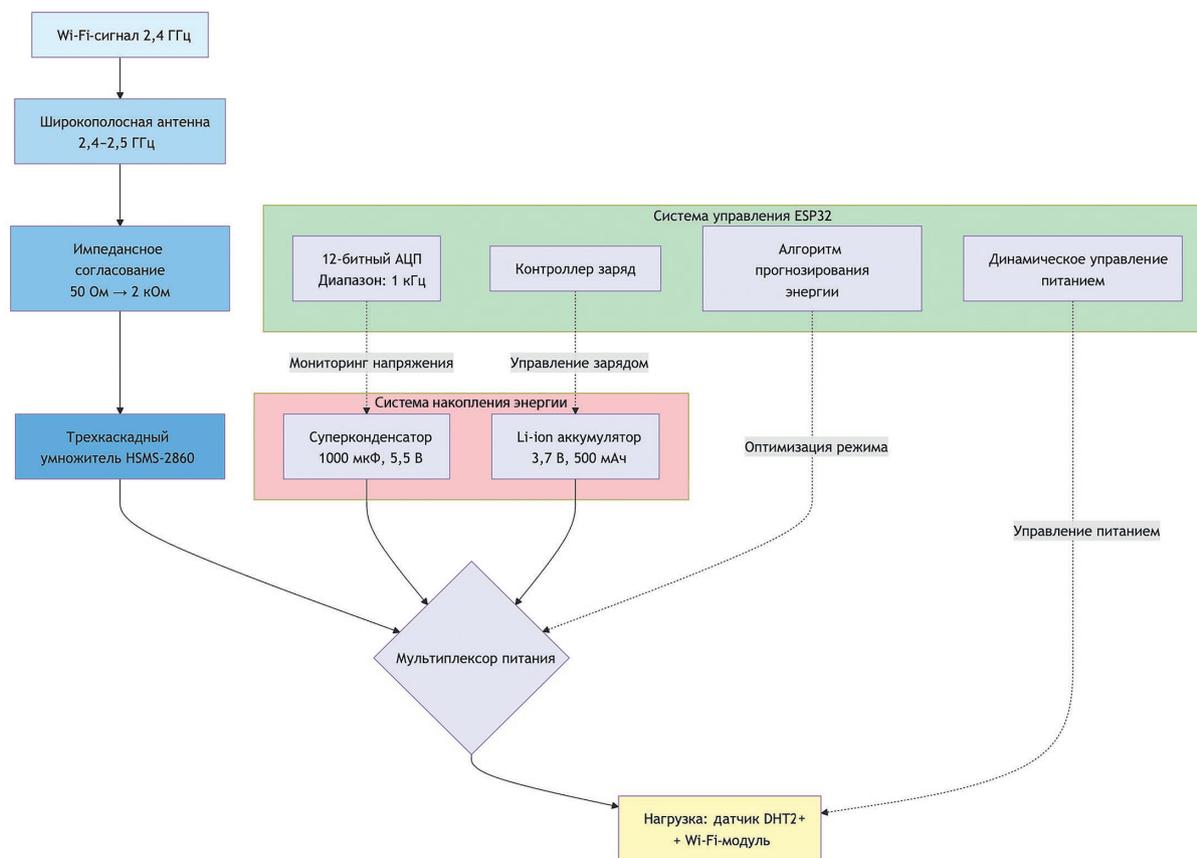


Рис. 3. Архитектура гибридной системы питания
Fig. 3. Hybrid power system architecture

После пробуждения встроенный АЦП микроконтроллера ESP32 выполняет измерение напряжения на накопительном конденсаторе через делитель напряжения. Полученное цифровое значение сравнивается с программно заданным пороговым уровнем (эквивалентным ~3,0 В) в коде алгоритма. При достаточной энергии, когда значение с АЦП превышает порог, система отключает батарею через цифровой вывод управления ключом (MOSFET) и переводит сенсорный узел на питание исключительно от harvested энергии для выполнения рабочего цикла, включающего измерение и передачу данных. В случае недостаточной энергии, когда значение с АЦП ниже порога, система немедленно возвращается в режим глубокого сна для дальнейшего накопления энергии. Если после нескольких попыток напряжение так и не достигает порога, алгоритм инициирует переход на питание от литий-ионного аккумулятора для выполнения критически важных задач.

Использование АЦП ESP32 предоставляет ключевое преимущество – гибкость. Пороговое напряжение, интервалы измерения и логика принятия решений могут быть легко изменены программно, что позволяет адаптировать систему к различным условиям окружающей RF-среды без изменения схемы.

Экспериментальная часть исследования проводилась с использованием специализированного IoT-датчика, оснащенного разработанной гибридной системой питания на базе ESP32 [4]. В качестве источника RF-энергии использовался стандартный Wi-Fi-роутер TP-Link Archer C7. Для мониторинга энергетических параметров был задействован осциллограф Rigol DS1054Z, а сбор и анализ данных осуществлялись через специализированное программное обеспечение. Методология эксперимента предусматривала размещение датчика на различных расстояниях от роутера с генерацией контролируемой нагрузки для создания стабильного электромагнитного поля. Каждый тестовый сценарий продолжительностью 24 ч позволял получить статистически значимые результаты.

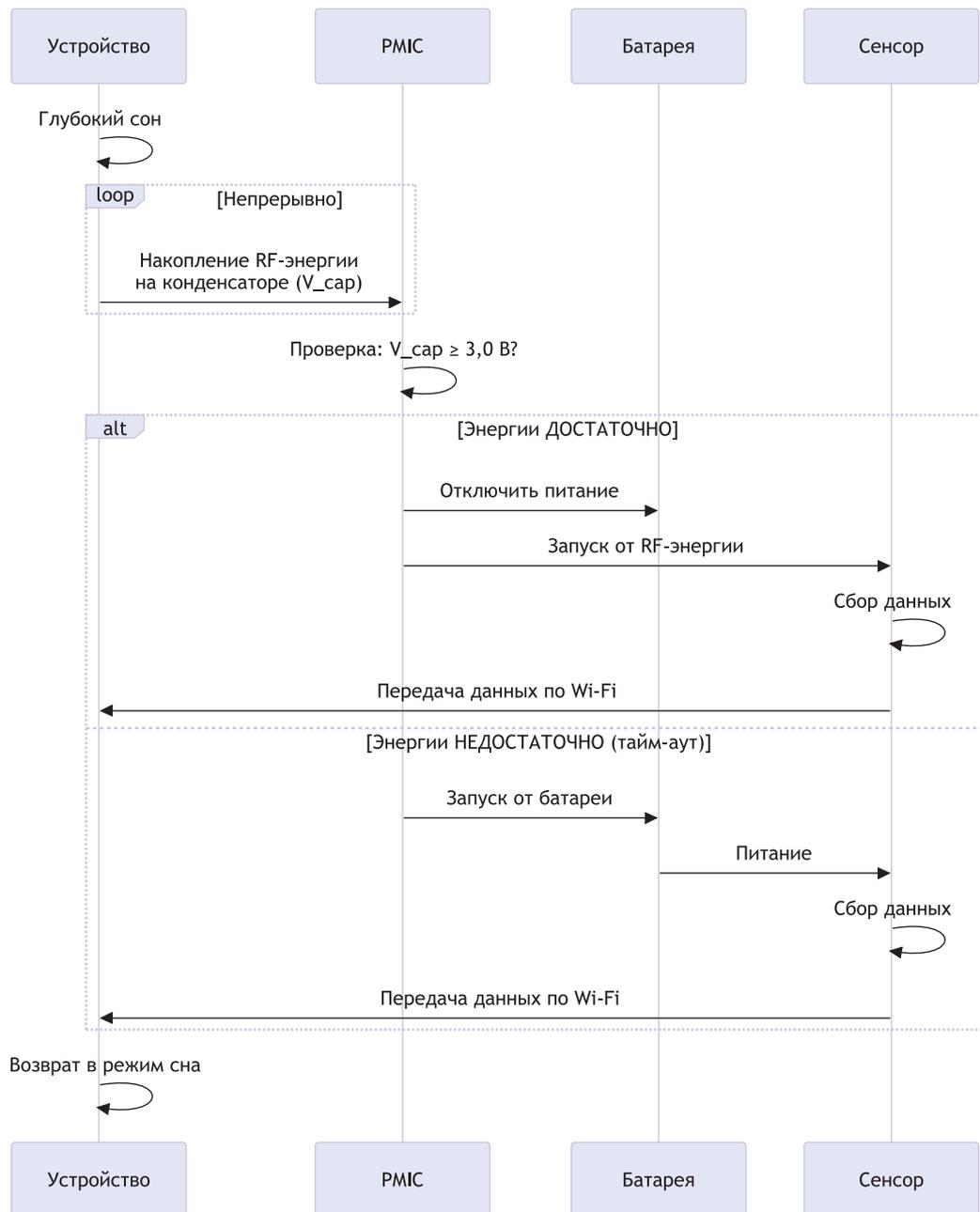


Рис. 4. Диаграмма последовательности работы адаптивного управления
Fig. 4. Adaptive control sequence diagram

Результаты экспериментального исследования, представленные на рис. 5, выявили выраженную корреляцию между эффективностью сбора энергии и параметрами расстояния до источника сигнала и степенью загрузки беспроводного канала. На дистанции 2 м при загрузке канала 70 % наблюдалась стабильная работа системы с регулярным достижением порогового напряжения каждые 2–3 мин. На расстоянии 6 м требования к загрузке канала значительно возрастали.

Адаптивный алгоритм управления на основе АЦП ESP32 продемонстрировал эффективность в переключении между энергетическими источниками. На рис. 6 представлено сравнение разряда батареи в различных конфигурациях: линия 1 – отдельный источник питания, 2 – гибридная система, 3 – стандартная батарея без оптимизации. График показывает значительное увеличение времени автономной работы при использовании гибридной системы. На дистанции 4 м при загрузке канала 50 % гибридная система позволила увеличить время автономной работы на 35 %, в то время как на дистанции 2 м система продемонстрировала практически полную энергетическую автономию.

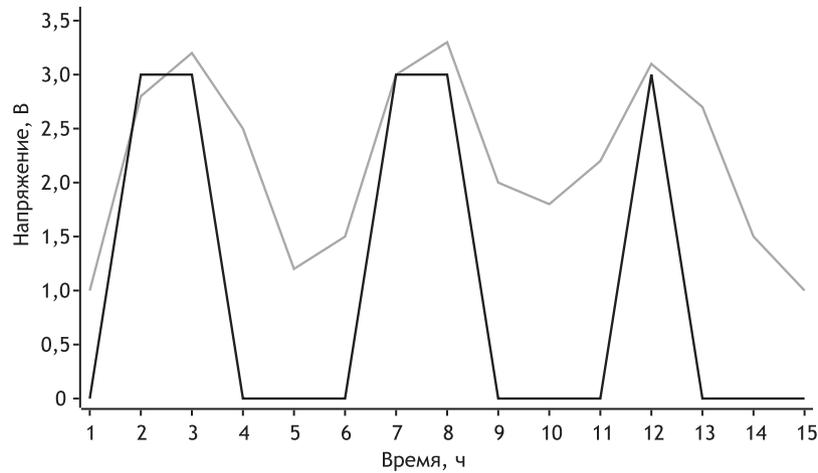


Рис. 5. Концептуальный график напряжения на конденсаторе
Fig. 5. Conceptual graph of voltage across a capacitor

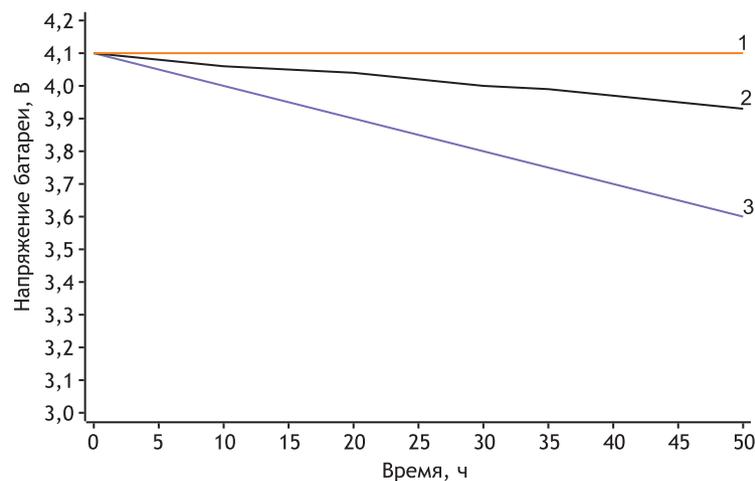


Рис. 6. Сравнение разряда батареи: 1 – отдельный источник питания; 2 – гибридная система; 3 – стандартная батарея без оптимизации
Fig. 6. Battery discharge comparison: 1 – separate power source; 2 – hybrid system; 3 – standard battery without optimization

Проведенное исследование доказывает практическую целесообразность и эффективность применения гибридных систем питания на базе доступных микроконтроллеров, таких как ESP32, в современных IoT устройствах, открывая новые перспективы для создания автономных интеллектуальных систем.

Заключение

Установлено, что, несмотря на теоретический потенциал и повсеместную распространенность Wi-Fi-инфраструктур, использование стандартных Wi-Fi-роутеров для надежного питания удаленных датчиков в настоящее время не представляется возможным. Ключевым ограничением, подтвержденным в ходе эксперимента, является прерывистый (пакетный) характер передачи данных в Wi-Fi, который приводит к постоянным циклам заряда-разряда накопительной емкости и не позволяет достичь минимального порогового напряжения, необходимого для запуска электроники устройства (300 мВ на расстоянии 3 м).

Список литературы / References

1. Lu X., Pi Guo (2016) Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 18 (4), 1413–1452.

2. Lavric A., Petrariu A. (2019) Long Range (LoRa) Low-Power WANs for Internet of Things: A Review. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR): Conference Proceedings. Cluj-Napoca, Romania*. 1–9. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2019/3502987>.
3. Benini L., Bogliolo A., De Micheli G. (2000) A Survey of Design Techniques for System-Level Dynamic Power Management. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 8 (3).
4. *ESP32 Technical Reference Manual*. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (Accessed 4 November 2025).

Поступила в редакцию 17.12.2025

Принята в печать 30.01.2026

Received: 17 December 2025

Accepted: 30 January 2026

Сведения об авторе

Андрейчук А. О., асп. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 33 340-12-20
E-mail: and.sasha@mail.ru
Андрейчук Александр Олегович

Information about the author

Andreichuk A., Postgraduate of the Department of Information Radiotechnologies, 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 33 340-12-20
E-mail: and.sasha@mail.ru
Andreichuk Aliaksandr



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-91-99>

УДК 615.47

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА С ПОВЕРХНОСТЬЮ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И БИООБЪЕКТОВ

А. Н. ОСИПОВ¹, Т. МА¹, М. В. ТУМИЛОВИЧ¹, А. В. ПАЦЕЕВ², С. В. ПАЦЕЕВ³

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

²Республиканский центр медицинской реабилитации и бальнеолечения (Минск, Республика Беларусь)

³ООО «Клиника «Мерси» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Применение плазменных технологий в технике, и особенно в здравоохранении, требует решения задач оценки воздействия и взаимодействия плазмы с поверхностью материалов. В статье представлены разработанные методы достоверного контроля состояния плазмы и ее взаимодействия с поверхностью объектов, что обеспечивает воспроизводимость технологических процессов обработки поверхностей материалов и терапевтических процедур, расширенные возможности повышения эффективности применения плазменных технологий в здравоохранении. Проведена оценка воздействия плазмы на поверхность различных органических и неорганических материалов, биологических тканей, а также оценка взаимодействия с ними. Для качественной и количественной оценки предложено использовать вольт-амперные характеристики и мощность, выделяемую в нагрузку «плазма–объект». Установлено, что мощность, выделяемая на нагрузку при взаимодействии с холодной плазмой, зависит от материала, на который воздействует плазма. Этот параметр необходимо контролировать при обработке материалов и биологических тканей. Показано, что имеются различия в значениях активной мощности, выделяемой на электродах разрядной системы, для образцов биологической ткани (подкожно-жировая клетчатка и мышечные ткани). При этом данное различие увеличивается с ростом выходного напряжения.

Ключевые слова: холодная атмосферная плазма, вольт-амперные характеристики, биологические ткани, электрическое напряжение, генератор плазмы, активная мощность, взаимодействие плазмы с поверхностью материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Оценка взаимодействия холодной атмосферной плазмы диэлектрического барьерного разряда с поверхностью различных материалов и биообъектов / А. Н. Осипов [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 91–99. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-91-99>.

EVALUATION OF THE INTERACTION OF COLD ATMOSPHERIC PLASMA OF A DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE WITH THE SURFACE OF VARIOUS MATERIALS AND BIOLOGICAL OBJECTS

ANATOLY OSIPOV¹, TIANBAO MA¹, MIRASLAU TUMILOVICH¹,
ALEXANDR PATSEYEV², SEARHEI PATSEYEU³

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

²Republican Center for Medical Rehabilitation and Balneotherapy (Minsk, Republic of Belarus)

³LLC “Mercy Clinic” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The application of plasma technologies in engineering, and particularly in healthcare, requires assessing the impact and interaction of plasma with material surfaces. This article presents developed methods for reliably monitoring the plasma state and its interaction with the surface of objects, ensuring the reproducibility of techno-

logical processes for surface treatment of materials and therapeutic procedures, as well as expanded opportunities for increasing the efficiency of plasma technologies in healthcare. An assessment of the impact of plasma on the surface of various organic and inorganic materials, biological tissues, and an assessment of the interaction with them was carried out. For a qualitative and quantitative assessment, it is proposed to use the volt-ampere characteristics and the power released in the “plasma-object” load. It has been established that the power released at the load during interaction with cold plasma depends on the material being exposed to the plasma. This parameter must be monitored when processing materials and biological tissues. It is shown that there are differences in the values of active power released at the electrodes of the discharge system for biological tissue samples (subcutaneous fat and muscle tissue). Moreover, this difference increases with increasing output voltage.

Keywords: cold atmospheric plasma, volt-ampere characteristics, biological tissues, electric voltage, plasma generator, active power, interaction of plasma with the surface of the material.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Osipov A., Ma T., Tumilovich M., Patseyev A., Patheyeu S. (2026) Evaluation of the Interaction of Cold Atmospheric Plasma of a Dielectric Barrier Discharge with the Surface of Various Materials and Biological Objects. *Doklady BGUIR*. 24 (1), –. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-XX-XX> (in Russian).

Введение

Разработка новых подходов к методам возбуждения и генерации холодной атмосферной плазмы (ХАП) обусловлена постоянно возрастающими уникальными возможностями ее применения. В настоящее время наблюдается бурный рост внедрения технологии ХАП в самых различных областях реального сектора экономики: микроэлектронике (производство изделий электронной техники), оптике (обработка и нанесение покрытий), химической и фармацевтической промышленности, при получении новых материалов (изменение свойств поверхности различных материалов неразрушающим способом), в охране окружающей среды (технологии очистки воды, воздуха и др.), биологии и т. д. [1]. Следует отметить появление нового направления в здравоохранении – области плазменной медицины, в которой выделяют пять подобластей: плазменная обработка биомедицинских материалов, плазменная дезактивация, плазменная биология, плазменное заживление ран и плазменная онкотерапия [2–4]. При этом характеристики ХАП имеют свои особенности в зависимости от области применения, а диагностика плазмы остается одним из краеугольных камней достижений в области науки ХАП.

Однако сложная природа плазменных устройств и отсутствие соответствующих технических средств не позволяют оценить степень взаимодействия плазмы с поверхностью материалов [5, 6]. В этой связи применение плазменных технологий в технике, и особенно в здравоохранении, требует решения задач оценки воздействия и взаимодействия плазмы с поверхностью материалов. В соответствии с ИЕС 60601-1:2020, гарантия «точности регулирования отдаваемой энергии ПАЦИЕНТУ» является одним из основных требований, обеспечивающих безопасность применения электрических медицинских изделий. Поэтому разработка методов и устройств, позволяющих достоверно контролировать состояние плазмы, ее взаимодействия с поверхностью объектов, воспроизводимость измерений и расширенные возможности верификации, – важная и актуальная задача, решение которой обеспечит повышение эффективности применения плазменных технологий в здравоохранении.

Методика и оборудование для проведения исследований и обработки результатов

В [7] показано, что атмосферная плазма характеризуется нелинейным импедансом. Изменение характера взаимодействия с поверхностью объекта сопровождается изменением нагрузочного импеданса и, соответственно, изменением параметров сигнала (мгновенных значений напряжений и токов), возбуждающих плазму. Для оценки изменения импеданса плазмы в [7, 8] предложены методики анализа ее проходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) и анализа мощности, выделяемой в нагрузку, при изменении различных параметров генератора. Построение проходных ВАХ и расчет мощности, выделяемой в нагрузку, осуществляются на основе регистрации и обработки данных о мгновенных значениях тока и напряжения в выходной цепи.

В процессе экспериментов исследовано воздействие ХАП на материалы, широко применяемые в здравоохранении, такие как медицинская сталь (скальпели, зажимы, стоматологические

инструменты и др.), стекло (лабораторное стекло, посуда и др.), фторопласт (покрытия для эндоскопов и катетеров, искусственных сосудов и клапанов, мембраны в стоматологии для направленной регенерации тканей и др.), латекс и резина (медицинские перчатки и др.). Размеры названных объектов составляли $3 \times 3 \times 1$ см. Материалом для исследования биологических тканей служили образцы (размерами $3 \times 3 \times 3$ см) из брюшной стенки свиньи (подкожно-жировая клетчатка и мышечные ткани).

При проведении исследований использовали экспериментальный стенд (рис. 1), включающий генератор ХАП с разрядной системой коаксиального типа и электродами, баллон с инертным газом аргоном, датчики тока и напряжения для регистрации значений тока и напряжения, протекающих/подаваемых на электроды, осциллограф и персональный компьютер (ПК) для регистрации тока и напряжения и расчета на их основе параметров оценки взаимодействия плазмы с поверхностью объектов. Размеры плазменного факела: длина – до 3 см, диаметр – около 1 см. Напряжение сигнала, возбуждающего плазму, изменялось в пределах 4–8 кВ, резонансная частота составляла 50 кГц. Для всех проводимых экспериментов выполнялось условие постоянства объема расхода инертного газа – 25–26 л/ч.

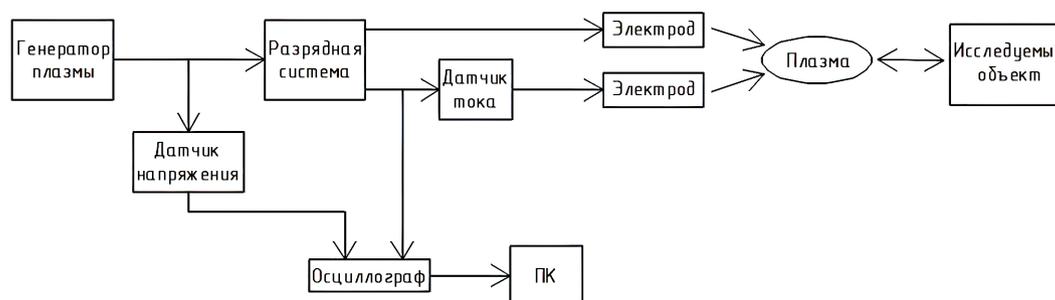


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда
Fig. 1. Structural diagram of the experimental setup

Для исследования взаимодействия плазмы с поверхностью объектов использовалась оригинальная методика, основанная на измерении параметров сигналов, возбуждающих плазму (мгновенных значений напряжения и токов), вычислении и анализе изменений форм проходных ВАХ, расчете активной мощности, выделяемой на нагрузке «плазма–объект» [7, 8]. На первом этапе изучалось изменение формы ВАХ при изменении частоты возбуждающего сигнала без взаимодействия с объектом для различных напряжений на электродах разрядной системы. Для оценки этих изменений рассчитывались площадь $S_{ВАХ}$, периметр кривых $L_{ВАХ}$ и отношение $S_{ВАХ}/L_{ВАХ}$. На втором этапе исследовалось взаимодействие плазмы с поверхностью объектов, изготовленных из металлов, неорганических и органических материалов, а также с образцами, полученными из тканей биоматериалов. Оценка взаимодействия выполнялась на основе анализа изменения активной мощности, выделяемой в нагрузку, и изменения формы ВАХ. Активную мощность рассчитывали с учетом измеренных мгновенных значений напряжений и токов [9].

Результаты исследований и их обсуждение

Проводили исследование изменения формы ВАХ, выделяемой в нагрузку, при изменении частоты для различных напряжений на выходе генератора плазмы. На рис. 2 изображены ВАХ, построенные на основе зависимостей мгновенных напряжений (кВ) и токов I .

Частота сигнала, возбуждающего плазму в первичной обмотке повышающего трансформатора, изменялась от 45 до 50 кГц. Согласно рис. 2, рост амплитуды напряжения на электродах разрядной системы приводит не только к увеличению выходного тока (а значит, – и площади, ограниченной кривой ВАХ), но и существенно влияет на форму ВАХ. Наблюдается тенденция стремления формы ВАХ к эллипсоидной при увеличении выходного напряжения. Аналогичным образом проявляется влияние частоты на форму ВАХ. Изменение частоты возбуждающего сигнала в сторону приближения к резонансной приводит к увеличению амплитуды напряжения и, соответственно, площади кривой под ВАХ, а также к изменению ее формы.

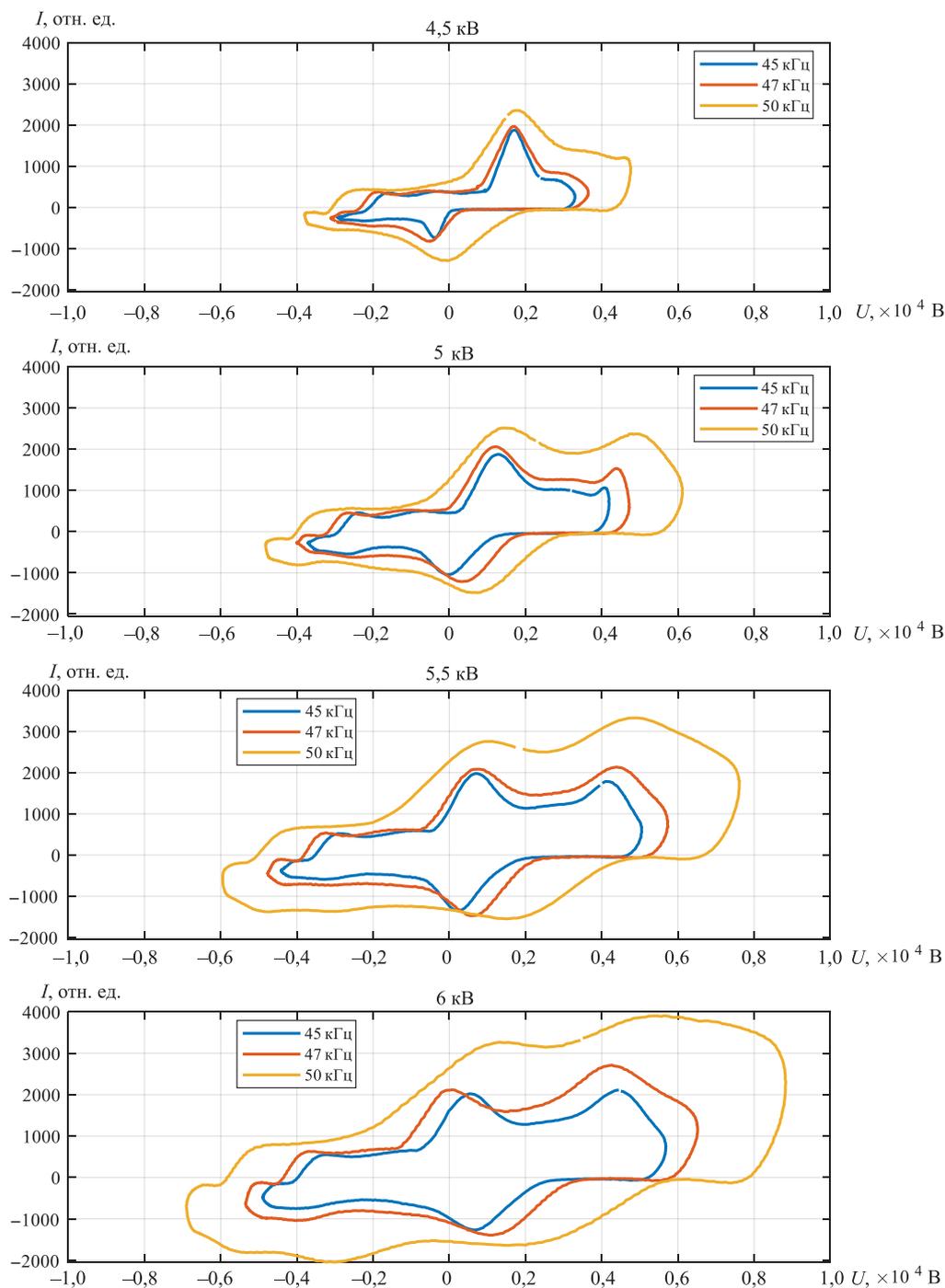


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики, построенные на основе зависимостей мгновенных напряжений и токов
Fig. 2. Volt-ampere characteristics constructed on the basis of the dependencies of instantaneous voltages and currents

Для оценки изменений формы ВАХ в зависимости от изменения частоты f и амплитуды возбуждающего сигнала проводились расчеты коэффициента формы $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$. Результаты представлены на рис. 3.

Зависимости изменения $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$ носят возрастающий характер. Увеличение напряжения U на электродах разрядной системы и изменение частоты в сторону приближения к резонансной приводят к эллипсовидной форме сигнала и росту $S_{\text{BAX}}/L_{\text{BAX}}$. Таким образом, коэффициент формы ВАХ может быть использован для настройки в резонанс генератора при взаимодействии генератора с исследуемой поверхностью.

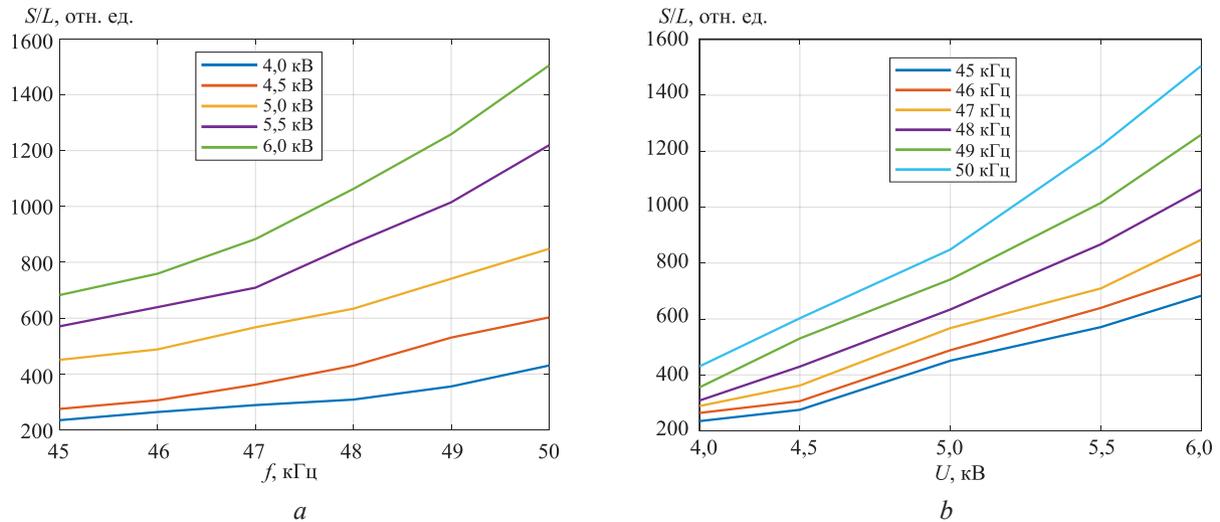


Рис. 3. Зависимость коэффициента формы $S_{\text{ВАЗ}}/L_{\text{ВАЗ}}$ от изменения: a – частоты; b – напряжения
Fig. 3. Dependence of the form factor $S_{\text{VAC}}/L_{\text{VAC}}$ on the change: a – frequency; b – voltage

Исследовали взаимодействие ХАП с поверхностью объектов, изготовленных из нержавеющей стали, стекла, латекса, резины, силикона и фторопласта. На рис. 4 показаны зависимости средней активной мощности P_{ext} , рассчитанной в относительных единицах для разных материалов при различных напряжениях на электродах в случае непосредственного контакта плазмы с поверхностью материала ($D = 0$ см).

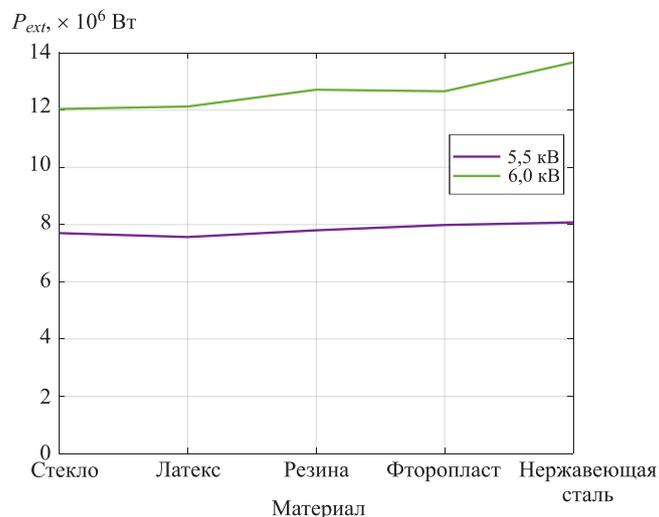


Рис. 4. Зависимость P_{ext} , рассчитанной в относительных единицах, выделяемой в нагрузку, при взаимодействии с различными материалами
Fig. 4. Dependence of P_{ext} , calculated in relative units, allocated in the load, when interacting with different materials

Как видно из рис. 4, взаимодействие ХАП с поверхностью разных материалов отличается: различия возрастают с увеличением напряжения на электродах. Наименьшее значение P_{ext} при 6 кВ наблюдается для стекла. Наибольшие значения P_{ext} характерны при взаимодействии плазмы с нержавеющей сталью. Для случая обработки поверхности из нержавеющей стали при напряжении на электродах 6 кВ мощность, выделяемая в нагрузку, примерно на 15 % больше мощности для случая взаимодействия с поверхностью объекта, изготовленного из стекла. Таким образом, взаимодействие плазмы с поверхностью различных материалов приводит к изменению выходной активной мощности генератора. При этом регистрируемая мощность для каждого типа материала индивидуальна.

На рис. 5 изображены зависимости изменения $S_{\text{BAХ}}/L_{\text{BAХ}}$ от расстояния L между факелом плазмы и поверхностью объекта. Как следует из рисунка, при непосредственном контакте с плазмой имеются существенные отличия в значениях $S_{\text{BAХ}}/L_{\text{BAХ}}$ для различных материалов. На расстоянии более 20 мм эти изменения минимальные. Таким образом, выделение энергии плазмы на поверхности материалов максимально при непосредственном контакте и практически не регистрируется на расстоянии более 20 мм.

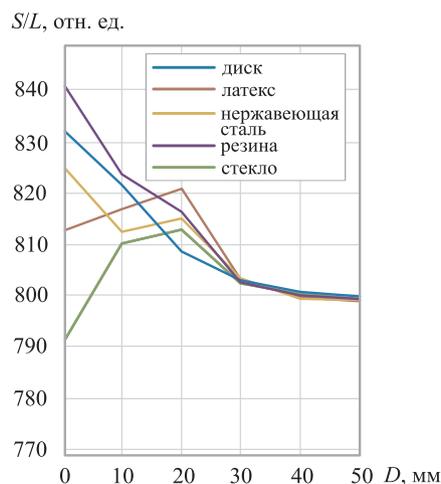


Рис. 5. Зависимость параметра формы от расстояния между факелом плазмы и поверхностью объекта
Fig. 5. Dependence of the shape parameter on the distance between the plasma torch and the surface of the object

В процессе исследований изучалось взаимодействие плазмы с поверхностью тканей биологических объектов. На рис. 6 представлены ВАХ в зависимости от расстояния D между факелом плазмы и поверхностью биологической ткани (поперечно-полосатая мышечная ткань). Отмечено изменение площади и формы ВАХ в диапазоне от 0 до 20 мм. Увеличение расстояния более 30 мм не приводит к существенному изменению формы ВАХ.

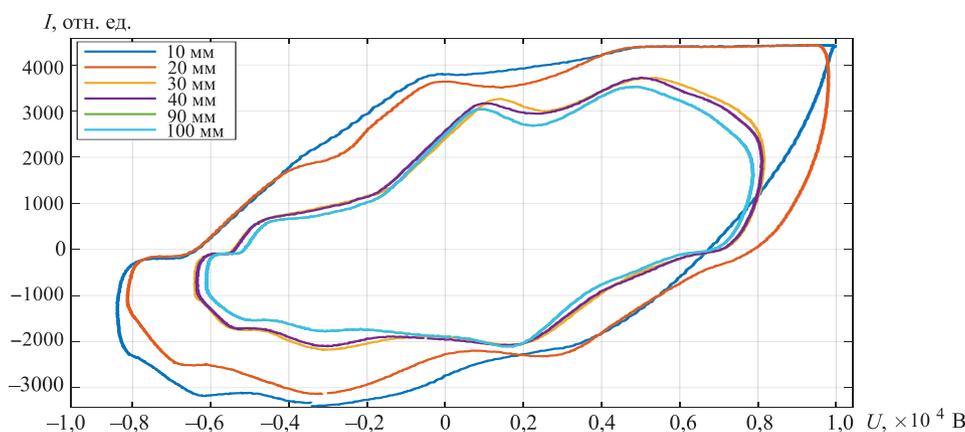


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики при взаимодействии плазмы с биологическими тканями (поперечно-полосатая мышечная ткань)
Fig. 6. Volt-ampere characteristics during the interaction of plasma with biological tissues (striated muscle tissue)

На рис. 7 показаны изменения коэффициента $S_{\text{BAХ}}/L_{\text{BAХ}}$ от расстояния между плазмой и поверхностью биологических тканей, которые наиболее существенны в диапазоне до 30 мм.

На рис. 8 приведены зависимости активной мощности P_{ext} , выделяемой в нагрузку, от напряжения на электродах разрядной системы при взаимодействии плазмы с подкожно-жировой клетчаткой и поперечно-полосатой мышечной тканью. Из рисунка видно, что при напряжении 4,5 кВ мощность P_{ext} для скелетной мышечной ткани на 18 % больше, чем для подкожно-жировой клетчатки, и с ростом выходного напряжения различие увеличивается. Это может объясняться отличиями в структуре и морфологии биологических тканей.

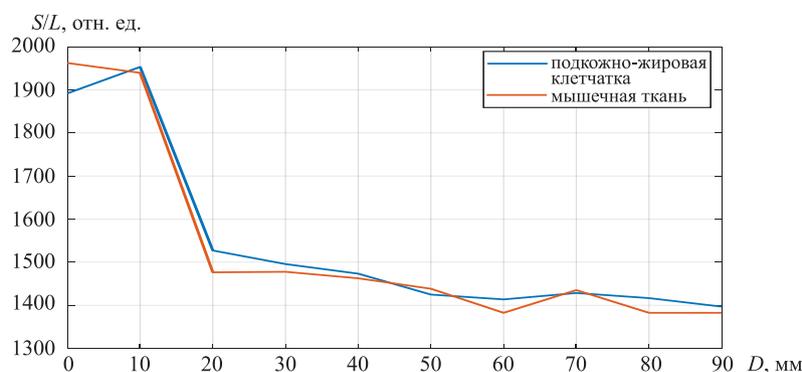


Рис. 7. Зависимость коэффициента формы вольт-амперной характеристики от расстояния между плазмой и поверхностью биологических тканей

Fig. 7. Change in the form factor of the volt-ampere characteristic depending on the distance between the plasma and the surface of biological tissues

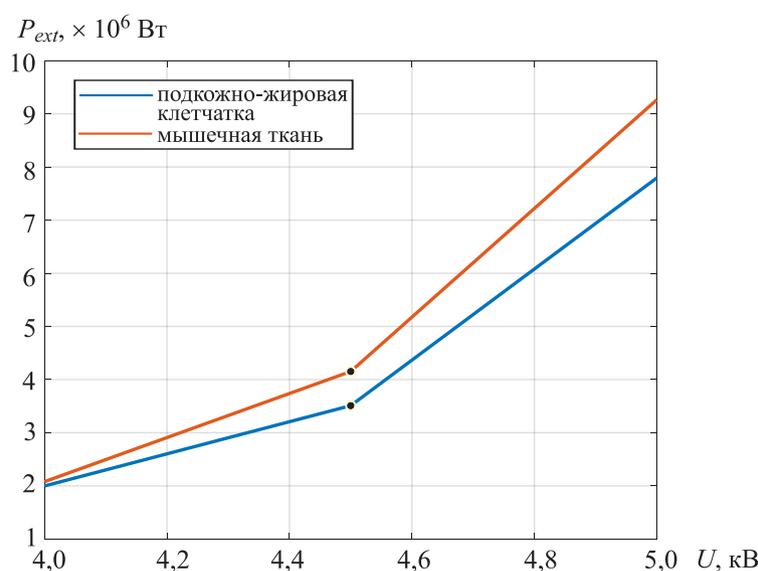


Рис. 8. Зависимость активной мощности P_{ext} , выделяемой в нагрузку, от напряжения на электродах разрядной системы

Fig. 8. Dependence of the active power P_{ext} released in the load on the voltage at the electrodes of the discharge system

Заключение

1. Для качественной и количественной оценки взаимодействия холодной атмосферной плазмы с поверхностью объектов предложено использовать изменение формы проходных вольт-амперных характеристик и значения активной мощности, выделяемой в нагрузку «плазма–объект».

2. Проведенные оценка воздействия плазмы на поверхности различных органических и неорганических материалов, биологических тканей, а также оценка взаимодействия с ними позволили установить, что мощность, выделяемая в нагрузку при взаимодействии с холодной плазмой, зависит от того материала, на который воздействует плазма. Этот параметр необходимо контролировать при обработке материалов и биологических тканей. Показано, что имеются различия в активной мощности, выделяемой на электродах разрядной системы, для образцов из брюшной стенки свиньи (подкожно-жировая клетчатка и мышечные ткани). При этом данное различие увеличивается с ростом выходного напряжения.

3. Активная мощность, выделяемая в нагрузку «плазма–объект», резко уменьшается при увеличении расстояния между факелом плазмы и поверхностью обрабатываемых объектов и практически отсутствует при расстоянии более 30 мм.

4. Увеличение напряжения на электродах разрядной системы и изменение частоты в сторону приближения к резонансной приводят к эллипсовидной форме сигнала и росту коэффициента формы вольт-амперной характеристики. Поэтому коэффициент формы может быть использован для настройки в резонанс генератора при взаимодействии генератора с поверхностью исследуемых объектов.

Список литературы

1. Review of the Cold Atmospheric Plasma Technology Application in Food, Disinfection, and Textiles: A Way Forward for Achieving Circular Economy / Reema [et al.] // *Frontiers in Physics*. 2022. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.942952>.
2. Козырева, В. О. Плазменная медицина: перспективы и опыт применения низкотемпературной аргоновой плазмы в медицинской реабилитации / В. О. Козырева // *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. 2022. Т. 21, № 5. С. 359–367. <https://doi.org/10.17816/rjpbr115273>.
3. Weltmann, K. D. Plasma Medicine – Current State of Research and Medical Application / K. D. Weltmann, Th. von Woedtke // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2016. Vol. 59, No 1. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014031>.
4. *Plasma Medical Science* / S. Toyokuni [et al.]. Cambridge: Academic Press, 2018.
5. Laroussi, M. Perspective: The Physics, Diagnostics, And Applications of Atmospheric Pressure Low Temperature Plasma Sources Used in Plasma Medicine / M. Laroussi, X. Lu, M. Keidar // *Journal Applied Physics*. 2017. Vol. 122, Iss. 4. <https://doi.org/10.1063/1.4993710>.
6. The Future for Plasma Science and Technology / K. D. Weltmann [et al.] // *Plasma Processes and Polymers*. 2019. Vol. 16, Iss. 1. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>.
7. Осипов, А. Н. Анализ электрических сигналов, возбуждающих низкотемпературную атмосферную плазму диэлектрического барьерного разряда / А. Н. Осипов, Т. Ма, В. А. Рокач // *Доклады БГУИР*. 2025. Т. 23, № 2. С. 44–52. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52>.
8. Generation of Low-Temperature Plasma by Pulse-Width Modulated Signals and Monitoring of the Interaction with the Surface of Objects / Tianbao Ma [et al.] // *Plasma Science and Technology*. Vol. 27, No 1.
9. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. М.: Высш. шк., 1996.

Поступила 05.12.2025

Принята в печать 05.02.2026

References

1. Reema, Ruchel Khanikar R., Bailung H., Sankaranarayanan K. (2022) Review of the Cold Atmospheric Plasma Technology Application in Food, Disinfection, and Textiles: A Way Forward for Achieving Circular Economy. *Frontiers in Physics*. 10. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.942952>.
2. Kozyreva V. O. (2022) Plasma Medicine: Prospects and Experience of Using Low-Temperature Argon Plasma in Medical Rehabilitation. *Physiotherapy, Balneology and Rehabilitation*. 21 (5), 359–367. <https://doi.org/10.17816/rjpbr115273> (in Russian).
3. Weltmann K. D., von Woedtke T. (2016) Plasma Medicine – Current State of Research and Medical Application. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 59 (1). <https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014031>.
4. Toyokuni S., Ikehara Y., Kikkawa F., Hori M. (2018) *Plasma Medical Science*. Cambridge, Academic Press Publ.
5. Laroussi M., Lu X., Keidar M. (2017) Perspective: The Physics, Diagnostics, And Applications of Atmospheric Pressure Low Temperature Plasma Sources Used in Plasma Medicine. *Journal of Applied Physics*. 122 (4). <https://doi.org/10.1063/1.4993710>.
6. Weltmann K. D., Kolb J. F., Holub M., Uhrlandt D., Šimek M., Ostrikov K., et al. (2019) The Future for Plasma Science and Technology. *Plasma Processes and Polymers*. 16 (1). <https://doi.org/10.1002/ppap.201800118>.
7. Osipov A. N., Ma T., Rokach V. A. (2025) Analysis of Electrical Signals Exciting Low-Temperature Atmospheric Plasma of Dielectric Barrier Discharge. *Doklady BGUIR*. 23 (2), 44–52. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-2-44-52> (in Russian).
8. Tianbao Ma, Kalenkovich Ya., Rokach V., Osipov A. (2025) Generation of Low-Temperature Plasma by Pulse-Width Modulated Signals and Monitoring of the Interaction with the Surface of Objects. *Plasma Science and Technology*. 27 (1).
9. Bessonov L. A. (1996) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits*. Moscow, Graduate School Publ. (in Russian).

Received: 5 December 2025

Accepted: 5 February 2026

Вклад авторов / Authors' contribution

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

Сведения об авторах

Осипов А. Н., канд. техн. наук, доц., зав. отрасл. лаб. центра «Приборы, системы и технологии медицинского назначения», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Ма Т., мл. науч. сотр. отрасл. лаб. «Приборы, системы и технологии медицинского назначения», БГУИР

Тумилович М. В., д-р техн. наук, проф., проф. каф. электронной техники и технологии, БГУИР

Пацеев А. В., гл. врач, Республиканский центр медицинской реабилитации и бальнеолечения

Пацеев С. В., директор, ООО «Клиника Мерси»

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Осипов Анатолий Николаевич

Information about the authors

Osipov A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Sectoral Laboratory at the Center for “Devices, Systems and Technologies for Medical Purposes”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Ma T., Junior Research Fellow at an Industry Laboratory of the Center for “Devices, Systems and Technologies for Medical Purposes”, BSUIR

Tumilovich M., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor of the Department of Electronic Engineering and Technology, BSUIR

Patseyev A., Chief Physician, Republican Center for Medical Rehabilitation and Balneotherapy

Patseyeu S., Director, LLC “Mercy Clinic”

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Osipov Anatoly

